

# Røykventilasjon i lukkede parkeringsanlegg

**Björn Erik Olof Magnusson**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Harald Landrø, BAT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for bygg, anlegg og transport





Oppgavens tittel: Røykventilasjon i lukkede parkeringsanlegg	Dato: 11. juni 2012		
	Antall sider (inkl. bilag): 171 (27)		
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Navn: Björn Erik Olof Magnusson			
Faglærer/veileder: Harald Landrø			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Dag Denstad, Rambøll			

#### Ekstrakt:

Denne masteroppgaven gir en innføring av dimensjonering av røykventilasjon i parkeringsanlegg med CFD- analyser. Oppgaven er delt i fire deler.

Første del av oppgaven presenterer et litteraturstudium der designbranner for parkeringsanlegg blir undersøkt og diskutert. Litteraturstudiet tar også for seg røykventilasjon for røykkontroll og sammenligner kravene i Norge med andre europeiske land. Det presenteres også en kort oppsummering av noen publiserte artikler som omhandler simuleringer av parkeringsgarasjer med CFD-programmet FDS, Fire Dynamics Simulator.

Andre delen gir en innføring i fluiddynamikk og matematiske modeller som benyttes av CFD-program. Avsnittet ble skrevet for å skape en dypere forståelse for videre simulering og tolking av resultatene.

Den tredje delen omhandler CFD-simulering med FDS 5.5.3 r7031. Jetvifter blir simulert med forskjellige innstillinger for å verifisere og validere modellen og programvaren for den videre simuleringen. Tilbakestrømming av røyk, mot ventilasjonsretningen er undersøkt med to parameterstudier.

Konklusjonen fra simuleringene er at kravet til røykventilasjon for tilrettelegging for rednings- og slökkemannskap i VTEK bør endres. Det bør ikke angis en hastighet for å forhindre tilbakestrømming, men i stedet en bestemt avstand som røyk tillates å strømme mot ventilasjonsretningen, såkalt backlayering. Det bør også vurderes å røykventilere sprinklede garasjer, siden en bilbrann ikke vil bli begrenset av sprinkler, men kun forhindrer at brannen sprer seg til tiliggende biler. Spesifikke designbranner med anbefalte innstillinger for CFD simulering presenteres også.

#### Stikkord

1. Røykventilasjon
2. Parkeringsgarasjer
3. CFD
4. Simulering



## Forord

Denne oppgaven er den avsluttende delen av det femårige masterprogrammet Bygg- og miljøteknikk på Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet, NTNU. Oppgaven er skrevet for instituttet bygg, anlegg og transport innenfor faggruppen Bygnings- og materialteknikk.

Jeg vil takke min veileder ved NTNU/Tresentret, professor II Harald Landrø og min eksterne veileder ved Rambøll, Dag Denstad. Det er mange flere som har bidratt med god veiledning og gode innspill, spesielt takk vil jeg gi Sven Egil Nørsett og Trond Sedeniussen ved Rambøll.

Parallelt med denne oppgaven tok jeg faget «Simulation of Fires in Enclosures, VBR200» som fjernundervisning ved Lunds Teknisk Högskola. Før dette siste semesteret hadde jeg ingen erfaring med brannsimulering, men læringskurven har vært bratt. For å lære meg mer om de matematiske modellene bak CFD-simulering skrev jeg Del B av oppgaven, som gir en innføring i fluiddynamikk, turbulens mm. som ligger til grunn for slike analyser

Simuleringene har skapt mye problemer, dette har vært meget tidskrevende men samtidig lærerikt. Jeg har benyttet en ny dynamisk turbulensmodell som ikke er standard i CFD programmet FDS, Fire Dynamics Simulator 5.5.3 r7031. Dette har ført til mange uventede problemer. Det har også vært vanskelig å få tak i målte hastighetsdata for jetvifter slik at simuleringene kunne verifiseres. Produsentene ville ikke oppgi denne informasjonen slik at prosessen med å finne grunnlag til verifisering av jetviftene har vært tidskrevende.

Jeg håper at resultatet av denne oppgaven kan bidra med føringer til en oppdatering av gjeldende krav for tilrettelegging for rednings- og slokkemannskap i VTEK, Veiledning om tekniske krav til byggverk. Simuleringer har vist at prosjektering og dimensjonering etter dagens anbefalinger ikke gir tilfredsstillende sikkerhet.



## Sammendrag

Det blir stadig vanligere med parkeringskjellere i næringsbygg og boliger. Brann i slike lukkede garasjelegger har vist seg å være vanskelige for brannvesenet å håndtere på grunn av blant annet den store røykutviklingen, uoversiktlig areal og lange angrepsveier. Et røykventilasjonsystem som er prosjektert for røykkontroll vil kunne holde deler av garasjen fri for røyk og slik legge til rette for rednings- og slokkemannskap.

En sammenligning mellom de norske kravene og anbefalingene i standarder fra Belgia, Nederland og Storbritannia og utkast til CEN standard, viste store forskjeller. I VTEK angis det at tilbakestrømming av røyk skal forhindres, mens det i de andre europeiske landene tillater en viss tilbakestrømming men gir krav til maksimal lengde på tilbakestrømmingen. VTEK angir at det normalt er tilstrekkelig med en ventilasjonshastighet på 1m/s i hele tverrsnittet, men angir ikke noen forutsetninger. Simuleringer i oppgaven viser at dette ikke er tilstrekkelig, for å hindre røykfylling av store deler av garasjen.

En litteraturstudie har sammenlignet fullskala branntester av biler. Designbrannene med konstante verdier oppgitt i utkastet til CEN standard gjenspeiler resultatet fra litteraturstudien. For sprinklet garasje bør det forutsettes en 4MW brann på 12,5m<sup>2</sup> brannareal (tilsvarende én bil). For dimensjonering av garasjer uten sprinkler bør det benyttes en 10MW brann på 37,5m<sup>2</sup> brannareal (tilsvarende tre biler).

Simuleringene viste at bruk av jetvifter øker hastigheten ved taket slik at tilbakestrømmingen av røyk blir mindre, selv uten å øke kapasiteten til tilluft og avtrekk. Simuleringer med biler i garasjen viste at lufthastigheten økte slik at tilbaketrømmingen ble mindre sammenlignet med simuleringer uten biler. Forskjellige randbetingelser ga store forskjeller på resultatene. Dette bør undersøkes nærmere og er tatt med som et av punktene for videre arbeid.

Validering og verifisering av jetviftene viste at standardinnstillingene i FDS 5.5.3 ikke kan modellere jetstrømmen fra en jetvifte korrekt. Den dynamiske turbulensmodellen ga bedre resultat.

Opgaven konkluderer med at kravene i VTEK §11-17 Tilrettelegging for rednings- og slokkemannskap – preaksepterte ytelser for parkeringsgarasjer bør hensynta med følgende forslag til forandringer:

- Det bør stilles krav om røykventilasjon av garasjer med sprinkler siden brannen ikke blir redusert av sprinkler, kun spredning som blir forhindret. Det er ikke tilrettelagt for rednings- og slokkemannskaper i forhold til sikt og lokalisering av brannen og eventuelle skadde når garasjen bare er sprinklet.
- Det bør tillates tilbakestrømming av røyk en gitt avstand i en tom garasje, for å gjøre det mulig å benytte en noe lavere ventilasjonshastighet. Siden det er mange faktorer som påvirker hvilken hastighet som kreves i hvert enkelt tilfelle bør det angis en avstand for tilbakestrømming (mellom 10-15 meter) i stedet for en generell hastighet. Hvis det likevel ønskes å oppgi kravet som et ventilasjonskrav må det være betydelig høyere. Forenklet metode i NEN6098:2012 angir at det må sikres en hastighet på minimum 1,5 m/s i hele tverrsnittet.





## Summary

Enclosed car parks in office buildings and residential buildings are becoming more and more common. Fires in structures of this kind have shown to be difficult to handle for the fire fighters due to the excessive smoke generation and complex layout. A ventilation system designed for smoke control will keep large part of the car park free so that for fire fighters and rescue personnel

Comparing requirements in Norwegian design codes to design codes in Belgium, the Netherlands, Great Britain and the draft for the CEN code showed significant differences. VTEK states that smoke backlayering should be prevented; other countries allow for some backlayering being present, but a maximum length of the backlayering is given. A ventilation velocity of 1 m/s in the entire cross section is required by VTEK, but no further explanation is given. Simulations conducted in this thesis show that this is not adequate to prevent smoke from filling up the car park.

A literature study was carried out where full scale tests of burning cars were investigated. The design fires where constant values from the CEN code are used reflect the results from the literature study. Garages where fire sprinklers are installed should be designed for a 4 MW fire in a 12.5 m<sup>2</sup> area (equivalent to a car).

The simulations show that the air velocity near the ceiling is increased by the use of jet fans, causing less smoke backlayering without the need for increasing the capacity of the ventilation. Simulations where cars were present in the garage exhibited less backlayering than simulations where cars were not present. Boundary conditions influenced the results significantly; this should be investigated more closely, and is included as one of the suggestions for further work.

Validation of the jet fans proved that the standard settings in FDS 5.5.3 could not model the air flow correctly, a dynamic turbulence model yielded better results.

The thesis concludes that the demands in VTEK §11-17 should be changed, the following is suggested:

- Garages with fire sprinklers should have mandatory smoke ventilation, since the sprinklers do not reduce the fire itself. This would ease the visibility and consequently the ability to localize the fire and injured personnel.
- Some extent of backlayering of smoke should be allowed in an empty garage to facilitate a lower ventilation velocity. Many factors influence the velocity in each specific case, so a backflow distance should be set, instead of a generic velocity. If it is desired to keep the velocity-requirement, the limit should be considerably higher. The simplified method in NEN6098:2012 states that a minimum velocity of 1.5 m/s should be present in the entire cross-section.



# Innholdsfortegnelse

Forord.....	I
Sammendrag .....	III
Summary .....	V
Vedlegg .....	X
Figurliste .....	XI
Tabelliste .....	XIII
Nomenklatur .....	XIV
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn .....	1
1.2 Problemstilling .....	1
1.3 Målsetting.....	1
1.4 Terminologi .....	2
1.5 Krav i Norge.....	2
1.6 Krav i andre europeiske land.....	3
1.6.1 Storbritannia.....	4
1.6.2 Belgia .....	4
1.6.3 Nederland .....	5
1.6.4 CEN Standard .....	5
1.7 Introduksjon til garasjeventilasjon .....	6
1.7.1 Impuls- og induksjonsventilasjonssystemer .....	6
1.7.2 System for røykfjerning/uttynning.....	7
1.7.3 System for røykkontroll .....	8
1.7.4 System for røykkontroll, spesielt for tilrettelegging av rømning.....	8
Del A – Litteraturstudie.....	9
2 Designbrann .....	9
2.1 Brannenergi per bil.....	9
2.2 Forbrenningsenergi.....	10
2.3 Antall biler involvert i brannen .....	11
2.4 Tid til brannspredning .....	14
2.5 Varmeavgivelseshastighet .....	15
2.5.1 Konstant HRR.....	16
2.5.2 Tidsavhengig HRR.....	17
2.6 Brannareal .....	23
2.7 Røyk og sot.....	24

3	Ventilasjon.....	25
3.1	Kritisk ventilasjonshastighet .....	25
3.2	Backlayering distance .....	26
4	Simulering .....	27
4.1	Forenklete simuleringer med utsnitt av garasje.....	27
4.2	Simuleringer med hele garasjer.....	29
5	Diskusjon.....	31
5.1	Designbrann .....	31
5.2	Ventilasjonshastighet.....	36
5.3	Simuleringer.....	37
6	Uklarheter fra litteraturstudiet.....	37
Del B – Om CFD .....		39
7	Numeriske metoder og grunnleggende fluid dynamikk.....	39
7.1	Bevarelseligningene på differentialform .....	40
7.1.1	Bevarelse av masse .....	40
7.1.2	Bevarelse av impuls .....	41
7.1.3	Bevarelse av energi .....	42
7.1.4	Bevarelse av skalare størrelser/kjemiske stoffer.....	43
7.1.5	Tilstandsligninger.....	44
7.1.6	Generell form – Transportligningen.....	44
7.2	Diskretisering for feltmodellering .....	45
7.2.1	Grid .....	45
7.2.2	Numeriske metoder.....	46
7.2.3	Differansemetoden.....	46
7.2.4	Kontrollvolummetoden.....	46
8	Turbulens.....	48
8.1	Generelt .....	48
8.2	Karakteristiske størrelser.....	49
8.3	Turbulenssimulering.....	51
8.3.1	DNS – Direct Numerical Simulation .....	51
8.3.2	LES – Large Eddy Simulation .....	52
8.3.3	RANS – Reynolds Averaged Navier Stokes equations.....	57
9	CFD-programmet Fire Dynamics Simulator.....	58
9.1	Grid.....	58
9.2	Subgrid turbulensmodell .....	59
9.3	Randbetingelser.....	60

9.4	Andre innstillinger.....	60
DEL C	– Simulering .....	61
10	Validering og verifisering av simuleringsmodell.....	62
10.1	Validering av jetsimulering .....	63
10.1.1	Fritt strømningsbilde fra jetvifte .....	65
10.1.2	Jet nær takflaten .....	72
10.1.3	Resultat .....	73
10.2	Verifisering av simuleringer av jetvifter.....	75
10.2.1	Oppsett .....	76
10.2.2	Resultat .....	77
10.2.3	Diskusjon .....	81
10.2.4	Konklusjon.....	82
10.3	Simulering av forenklet garasje.....	83
10.3.1	Oppsett .....	83
10.3.2	Resultat .....	85
10.3.3	Diskusjon .....	86
10.3.4	Konklusjon.....	89
10.4	Simulering av garasje med tilluft, avtrekk og jetvifter.....	90
10.4.1	Oppsett .....	90
10.4.2	Resultat .....	94
10.4.3	Diskusjon .....	101
10.4.4	Konklusjon.....	103
DEL D	– Oppsummering .....	104
11	Diskusjon .....	104
12	Konklusjon.....	106
12.1	Simulering med FDS .....	106
12.2	Krav i VTEK .....	106
13	Anbefaling til videre arbeid .....	107
14	Bibliografi.....	109

## Vedlegg

Vedlegg 1 – Oppgavetekst

Vedlegg 2 – Empirisk beregning av hastighet

Vedlegg 3 - Gridstørrelser

Vedlegg 4 – Resultat simulering #19

Vedlegg 5 – TEK og VTEK \$11-17 Tilrettelegging for rednings og slokkemannskap

Vedlegg 6 – Hastighetsprofiler fra produsenten Fläktwoods

Vedlegg 7 – Sammenstilling av simuleringer i artikler

Vedlegg 8 – FDS input-fil for simulering #04

Vedlegg 9 – FDS input-fil for simulering #09

Vedlegg 10 – FDS input-fil for simulering #12

Vedlegg 11 – FDS input-fil for simulering #V09

Vedlegg 12 – FDS input-fil for simulering #F03 Dynsmag betong

Vedlegg 13 – FDS input-fil for simulering #G12

Vedlegg 14 – FDS input-fil for simulering #GB03

Vedlegg 15 – FDS input-fil for simulering #GC06

## Figurliste

FIGUR 1-1 MEKANISK VENTILASJONSSYSTEM MED VENTILASJONSKANALER. VENSTRE BILDE (9). HØYRE BILDE: LUFTINNTAK 1, AVTREKK 2. AVTREKK FORDELT 50% OPPE OG 50% NEDE (6).....	6
FIGUR 1-2 IMPULSVIFTE (12).....	7
FIGUR 1-3 INDUKSJONSVIFTE (12).....	7
FIGUR 1-4 A) IMPULSVENTILASJONSSYSTEM FOR RØYKFJERNING/UTTYNNING. B) IMPULSVENTILASJONSSYSTEM FOR RØYKKONTROLL (6).....	8
FIGUR 1-5 IMPULSVENTILASJON FOR RØYKKONTROLL. DELER AV ETASJEN HOLDES RØYKFRI. (9).....	8
FIGUR 2-1 GJENNOMSNIITTLIG FORBRENNINGSENERGI SORTERT PÅ DET ÅRET TESTEN BLE GJENNOMFØRT. DATA ER HENTET FRA SAMMENSTILLINGEN I (13).....	11
FIGUR 2-2 BILBRANNER I PARKERINGSBYGNINGER I NEW ZEALAND SORTERT PÅ ANTALL BILER INVOLVERT. (24).....	12
FIGUR 2-3 ANTALL BILER INVOLVERT I BRANN (16).....	12
FIGUR 2-4 SAMMENSTILLING AV FULLSKALA TESTER AV BILBRANNER. DATA ER HENTET FRA (17).....	15
FIGUR 2-5 REFERANSEKURVEN HADDE HØYERE VARMEAVGIVELSEHASTIGHET SAMMENLIGNET MED ALLE TIDLIGERE FULLSKALA BRANNFORSØK (15).....	17
FIGUR 2-6 DE TO REFERANSEKURVENE FRA CTICM (15).....	18
FIGUR 2-7 REFERANSEKURVER FRA CTICM MED BRANNSPREDNING. DET ER 12 MINUTTERS FORSINKELSE FRA DET AT EN BIL TAR FYR TIL BRANNEN SPREDER SEG TIL NESTE BIL. (15).....	18
FIGUR 2-8 DEN NYE REFERANSEKURVEN FRA TNO SAMMEN MED GJENNOMFØRTE TESTER UNDER STUDIEN. (18).....	19
FIGUR 2-9 REFERANSEKURVER FRA TNO OG ECSC. DATA FOR KURVENE ER HENTET FRA (15) OG (18). .....	19
FIGUR 2-10 REFERANSEKURVE FRA BELGISK STANDARD NBN 21-208-2:2006 (14).....	20
FIGUR 2-11 REFERANSEKURVE FRA NEN 6098:2012. BRANNSPREDNING ETTER 10 OG 15 MINUTT.....	21
FIGUR 2-12 REFERANSEKURVE FRA CEN PREN/TS12101-11:2012.....	22
FIGUR 2-13 BRANN MED TRE BILER, BRANNSPREDNING ETTER 5 OG 15 MINUTTER. TOTAL BRANNENERGI 18000 MJ (33).....	23
FIGUR 4-1 GARASJEN SOM BLE BRUKT FOR BÅDE SIMULERINGENE OG FULLSKALA TESTENE AV DECKERS ET AL (50).....	29
FIGUR 4-2 MODELL AV GARASJEN I SIMULERINGENE TIL LU ET AL. (38). A) HORIZONTALSNITT, B) VERTIKALSNITT. FIGUREN ER HENTET FRA (38).....	30
FIGUR 5-1 REFERANSEKURVER FRA TNO OG ECSC FOR SAMMENLIGNING MED TIDLIGERE TESTER VED MVRI.....	31
FIGUR 5-2 MULIGE SCENARIOER FOR BRANNSPREDNING.....	32
FIGUR 5-3 BRANNSPREDNING MED 12 MINUTTERS MELLOM I EN RETNING MED REFERANSEKURVEN FRA ECSC (15). JMF. FIGUR 5-2A. ....	33
FIGUR 5-4 BRANNSPREDNING MED REFERANSEKURVE FRA TNO 1999. TID TIL BRANNSPREDNING: 10 OG 15MINUTTER. DETTE VIL VÆRE SCENARIET I NEN6098:2012 (5) HVIS IKKE BRANNVESENET SLUKKER ETTER 22 MIN. ....	34
FIGUR 5-5 BRANNSPREDNING MED REFERANSEKURVE FRA TNO 1999. TID TIL BRANNSPREDNING: 10, 15, 22, 27 MINUTTER.....	34
FIGUR 5-6 KRITISK (UNIFORM) VENTILASJONSHASTIGHET INN FOR Å UNNGÅ TILBAKESTRØMNING AV RØYK. FIGUREN ER EN GRAFISK PRESENTASJON AV LIGNING (3.1).....	36
FIGUR 7-1 ILLUSTRASJON AV ET KONTROLLVOLUM OG DE FIRE BEVARELSLIGNINGENE.....	40
FIGUR 7-2 FORSKJELLIGE TYPER GRID. FIGURENE ER HENTET FRA (60).....	45
FIGUR 8-1 ENERGISPEKTRUM FOR TURBULENT STRØMNING. FIGUREN ER LAGD UT FRA INFORMASJON OG DELVIS LIGNENDE FIGURER FRA WILCOX (63) OG RUBINI (58).....	50
FIGUR 8-2 LARGE-EDDY-TURN-OVER-TIME. FIGUREN ER HENTET FRA «CFD BEST PRACTICE» (71) ...	56
FIGUR 10-1 FORENKLET MODELL AV JETVIFTEN.....	64
FIGUR 10-2 BEREGNINGSDOMENE FOR SIMULERING #01-07 OG #10. TOTALT 4 MESH.....	65
FIGUR 10-3 BEREGNINGSDOMENE FOR SIMULERING #08 OG #09. TOTALT 11 MESH.....	65
FIGUR 10-4 SNITT AV VIFTEN SOM ER BRUKT I #09. A) SETT FRA SIDEN B) SETT FORAN I FRA.....	65
FIGUR 10-5 SIMULERING #07. GRID 10CM.....	67
FIGUR 10-6 SIMULERING #04. GRID 20CM.....	67
FIGUR 10-7 SIMULERING #05. GRID 10CM, $C_s=0,2$ . ....	67
FIGUR 10-8 SIMULERING #08 GRID 5CM, $C_s=0,2$ .....	67
FIGUR 10-9 SIMULERING #09 GRID 5CM, $C_s=0,2$ .....	67
FIGUR 10-10 HASTIGHET SOM FUNKSJON AV AVSTANDEN FRA JETVIFTEN, VALIDERINGSFORSØK #01-1068	

FIGUR 10-11 SAMMENLIGNING AV #04 MED OG UTEN FREE_SLIP=.TRUE .....	69
FIGUR 10-12 #04 MEASUREMENT OF TURBULENT RESOLUTION .....	70
FIGUR 10-13 #09 MEASUREMENT OF TURBULENT RESOLUTION .....	70
FIGUR 10-14 BEREGNINGSDOMENE FOR SIMULERING #11 OG 12. DE FØRSTE 18 METERNE ER GRIDSTØRRELSEN KONSTANT (10 RESP 20 CM). DERETTER ER GRIDSTØRRELSEN DOBLET.....	72
FIGUR 10-15 HASTIGHET SOM FUNKSJON AV AVSTANDEN FRA JETVIFTEN, VALIDERINGSFORSØK #11-1273	
FIGUR 10-16 SIMULERING #11. GRID 20CM. ØVERST: SNITT. NEDERST: PLAN.....	73
FIGUR 10-17 SIMULERING #12. GRID 10CM. ØVERST: SNITT. NEDERST: PLAN.....	73
FIGUR 10-18 SIMULERING AV 400MM JETVIFTE PÅ FULL HASTIGHET I CFX. SIMULERINGEN ER LAGET AV FLÅKTWOODS. FOR BEDRE KVALITET, SE VEDLEGG 5.....	75
FIGUR 10-19 BEREGNINGSDOMENE FOR SIMULERING #09-19. FIRE LIKE STORE GRID.....	76
FIGUR 10-20 VARIANTER AV JETVIFTEN SOM BLE UNDERSØKT. DEN RØDE SKIVEN ER FLATEN SOM REPRESENTERER VIFTEN A) VIFTEN PLASSERT I MIDTEN, B) VIFTEN PLASSERT VED ÅPNINGEN, C) VIFTEN PLASSERT 20 CM INN FRA ÅPNINGEN, D) VIFTEN PLASSERT 20 INN FRA ÅPNING. I TILLEGG ER DET EN VERTIKAL VIFTEN SOM GIR EN HORIZONTAL HASTIGHETSKOMPONENT.....	77
FIGUR 10-21 15 GRADERS SPREDNING SAMMENLIGNET MED RESULTATENE. FLÅKTWOODS SIMULERING ØVERST, RESULTAT FRA SIMULERING#19 NEDERST. ....	81
FIGUR 10-22 BEREGNINGSDOMENE: 80 X 34 X 2,4 M. KONSTANT HASTIGHET PÅ TILLUFTEN TIL VENSTRE, HØYRE VEGG ER «OPEN». ....	83
FIGUR 10-23 #F01 DYNMAG ADIABATISK. SNITT GJENNOM SENTERAKSEN PÅ MODELLEN. TILLUFT PÅ VENSTRE SIDE. BACKLAYERING ETTER 380 SEKUNDER. SIMULERINGEN ER IKKE I STEADY STATE, RØYKEN FORTSETTER BAKOVER. ....	85
FIGUR 10-24 FORSKJELL PÅ TILLUFT OG AVTREKK FOR #F03. ....	86
FIGUR 10-25 VARMEAVGIVELSESHASTIGHET FOR #F03 MED STANDARD SMAGORINSKY TURBULENSMODELL.....	87
FIGUR 10-26 VARMEAVGIVELSESHASTIGHET FOR #F03 MED DYNAMISK SMAGORINSKY TURBULENSMODELL FOR TRE FORSKJELLIGE INNSTILLINGER. ....	87
FIGUR 10-27 .....	92
FIGUR 10-28 .....	92
FIGUR 10-29 FIGUR 10-30.....	92
FIGUR 10-31 .....	92
FIGUR 10-32 .....	92
FIGUR 10-33 .....	92
FIGUR 10-34 #GB03 BJELKER I TAKET, VIFTEKONFIGURASJON 2 .....	92
FIGUR 10-35 GARASJEN FYLT MED BILER. OVER: #G09. BRANN I MIDTEN, VIFTEKONFIGURASJON 2. NEDE: #G10. BRANN VED VEGGEN, VIFTEKONFIGURASJON 2.....	93
FIGUR 10-36 #G09 TVERRSNITT AV MODELLEN. BILENE ER PARKERT MED FRONTEN MOT VEGGEN OG MOT MIDTEN. AVSTAND MELLOM TAK OG VIFTE ER 36CM.....	93
FIGUR 10-37 #G05 KONFIGURASJON 1. ....	93
FIGUR 10-38 #G07 KONFIGURASJON 2 .....	93
FIGUR 10-39 #G11 KONFIGURASJON 3 .....	93
FIGUR 10-40 HRR INNVIRKNING PÅ TILLUFT NÅR KONSTANT AVTREKKS VOLUM ER SPESIFISERT. #G05 .	95
FIGUR 10-41 VARMEAVGIVELSESHASTIGHET FOR #G03.....	98
FIGUR 10-42 VARMEAVGIVELSESHASTIGHET FOR #GC3 .....	98



## Tabelliste

TABELL 2-1 BILMODELLER Plassert i forsikringskategorier (15) .....	10
TABELL 2-2 MIDDELS VEKT, MASSETAP OG ENERGI SOM ER MULIG Å AVGI (15) .....	10
TABELL 2-3 NETTO FORBRENNINGSENERGI FOR NOEN AKTUELLE STOFFER I PERSONBILER. TALLENE ER KUN GYLDIGE FOR FULLSTENDIG FORBRENNING .....	11
TABELL 2-4 SAMMENSTILLING AV STATISTIKK OVER BILBRANNER .....	13
TABELL 2-5 SAMMENSTILLING AV KONSTANT HRR FOR BILBRANNER I USPRINKLEDE GARASJER .....	16
TABELL 2-6 SAMMENSTILLING AV KONSTANT HRR FOR BILBRANNER I SPRINKLEDE GARASJER .....	16
TABELL 2-7 FORUTSETNINGER FOR SIMULERING I HENHOLD TIL BELGISK STANDARD NBN 21-208-2:2006 (14) .....	20
TABELL 2-8 FORUTSETNINGER FOR SIMULERING I HENHOLD TIL NEDERLANDSK STANDARD NEN6098:2012 .....	21
TABELL 2-9 FORUTSETNINGER FOR SIMULERING I HENHOLD TIL UTKAST TIL CEN STANDARD, PREN/TS 12101-11:2012 .....	22
TABELL 5-1 KRITISK VENTILASJONSHASTIGHET OPPGITT FOR TRE DESIGNBRANNER MED STATISKE VERDIER. BEREGNINGER I HHT LIGNING (3.1) .....	36
TABELL 10-1 SAMMENSTILLING AV VALIDERINGSFORSØK .....	66
TABELL 10-2 SAMMENSTILLING AV SIMULERINGER MED JETVIFTE NÆRT TAKET .....	72
TABELL 10-3 SAMMENSTILLING AV SIMULERINGER MED JETVIFTE NÆRE TAKET. 20CM GRID .....	76
TABELL 10-4 SAMMENSTILLING AV SIMULERINGER MED JETVIFTE NÆRE TAKET. 9 OG 18CM GRID .....	77
TABELL 10-5 BRANNSTØRRELSE I SIMULERING #01-03 .....	84
TABELL 10-6 SAMMENSTILLING AV PARAMETERE OG GEOMETRI FOR #V01-03 .....	84
TABELL 10-7 RESULTATER FRA SIMULERING #F01-03. RESULTATENE SAMMENLIGNES MED EMPIRISKE BEREGNINGER FRA AVSNITT 3.2 .....	85
TABELL 10-8 SAMMENSTILLING AV PARAMETERE OG GEOMETRI FOR #G01-12 OG #GB01-03 .....	91
TABELL 10-9 BESKRIVELSE AV INNSTILLINGER FOR HVER ENKELT SIMULERING. ....	92
TABELL 10-10 SAMMENSTILLING AV RESULTAT MED FORSKJELLIGE AVTREKKSHASTIGHETER .....	94
TABELL 10-11 FORSKJELL PÅ HASTIGHET MELLOM TILLUFT OG AVTREKK FOR DE ADIABATISKE SIMULERINGENE .....	95
TABELL 10-12 RANDBETINGELSENS INNVIRKNING PÅ TILBAKESTRØMNING AV RØYK. SIMULERINGER MED JETVIFTER OG TO Plasseringer for brannen .....	96
TABELL 10-13 RANDBETINGELSENS INNVIRKNING PÅ BACKLAYERING. SIMULERINGER MED OG UTEN VIFTER, OG MED FORSKJELLIGE AVTREKKSHASTIGHETER .....	97
TABELL 10-14 INNVIRKNINGEN AV FULL ELLER TOM GARASJE PÅ BACKLAYERING .....	99
TABELL 10-15 INNVIRKNING AV BJELKER PÅ BACKLAYERING. ....	99
TABELL 10-16 HASTIGHETSProfiler etter 60s med de tre forskjellige viftekonfigurasjonene. BRANNEN ER Plassert i midten .....	100
TABELL 12-1 STATISKE VERDIER FOR DESIGNBRANN SOM OPPGITT I PREN/TS12101-11:2012 .....	107

# Nomenklatur

## Latinske bokstaver, store

$C$	Courant-nummeret	-
$C_s$	Smagorinsky konstanten	-
$D^*$	karaktteristisk brann diameter	$m$
$H_r$	reaksjonsenergi	$J/mol$
$\dot{Q}$	varmeavgivelseshastighet (HRR)	$kW$
$R$	universelle gasskonstanten,	$8,314 J/molK$
$Re$	Reynolds tall	-
$T$	temperatur	$K$
$T_\infty$	omgivelsestemperatur	$^\circ C$
$U$	hastighet	$m/s$
$Y_\alpha$	molfraksjon av stoff $\alpha$	-

## Latinske bokstaver, små

$c_p$	spesifikk varmekapasitet, konstant trykk	$J/kgK$
$c_v$	spesifikk varmekapasitet, konstant volum	$J/kgK$
$g$	gravitasjon	$m/s^2$
$k$	varmekonduktivitet	$J/mK$
$u$	hastighet, x-retning	$m/s$
$v$	hastighet i y-retning	$m/s$
$w$	hastighet i z-retning	$m/s$

## Greske bokstaver

$\eta$	Kolmogorov micro scale	$m$
$\mu$	dynamisk viskositet	$kg/ms$
$\mu_T$	«eddy viscosity»	$kg/ms$
$\rho$	massetetthet	$kg/m^3$
$\rho_\infty$	massetetthet, luft	$kg/m^3$
$\tau$	skjærspenning	$N/m^2$
$\tau_T$	«vortex shear stress»	$N/m^2$

## Forkortelser

BRE	British Research Establishment
CEN	Comité Européen de Normalisation
CFD	Computational Fluid Dynamics
CTICM	Centre Technique Industriel de la Construction Métallique
DNS	Direct Numerical Simulation
ECSC	European Coal and Steel Commission
FDS	Fire Dynamic Simulator
HRRPUA	Heat release rate per unit area
LES	Large-Eddy-Simulation
LETOT	Large-Eddy-Turn-Over-Time

NIST	National Institute of Standards and Technology
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes equations
SGS	Subgrid-scale
TEK	Byggteknisk forskrift
TNO	Oversatt fra nederlandsk: Netherlands Organization for Applied Scientific Research
VTEK	Veiledning om tekniske krav til byggverk



# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Kommunenes arealplaner angir krav til antallet parkeringsplasser for blant annet næringsbygg og boliger. For å oppfylle disse kravene etableres det gjerne parkeringskjellere i sentrumsnære strøk. Det blir derfor flere og flere parkeringskjellere rundt om i landet.

Brann i slike lukkede garasjeanlegg har vist seg å være vanskelige for brannvesenet å håndtere, på grunn av blant annet den store røykutviklingen, uoversiktlig areal og lange angrepsveier. Ved en røykdykkerinnsats i vanlige bygninger etterstrebtes det å få ventilert ut røyken for å senke temperaturen og skape bedre siktforhold. Brannvesenet angriper en bygning nedenfra og opp og har alltid sikker vei ned samme vei de kom. Ved branner i blant annet parkeringskjellere vil forholdene være annerledes, røyken stiger opp mens røykdykkerne må ned gjennom røyken. I tillegg vil det være vanskelig å få ventilert røyken uten hjelp fra ventilasjonssystem. I følge brigadeleder Trond Fjellsæter (1) ved Trøndelag Brann og Redningstjeneste er det ikke en selvfølge å gjennomføre en røykdykkerinnsats i slike tilfeller, sikkerheten til mannskapet må vurderes spesielt.

Et røykventilasjonssystem som er prosjektert for røykkontroll vil kunne holde deler av garasjen fri for røyk og skape gode angrepsveier for brannvesenet oppstrøms ventilasjonsretningen. Ifølge VTEK §11-17 er det krav at brannvesenet skal ha angrepsvei som er uavhengig av rømningsveiene og at maksimalt slangeutlegg er 50 meter. Avstanden kan ifølge Fjellsæter være lengre hvis det er røykfrie angrepsveier bak brannen, det kan for eksempel sammenlignes med tunnelbranner.

Gir prosjektering etter dagens gjeldene regelverk tilstrekkelig sikkerhet for rednings og slökkemannskaper?

## 1.2 Problemstilling

Denne oppgaven tar for seg bilbranner i lukkede parkeringsgarasjer der røykventilasjon benyttes som et tiltak for å tilrettelegge for rednings- og slökkemannskap. Oppgaven vil diskutere hvilken størrelse på brannen som bør ligge til grunn for kravene til røykventilasjon i Norge. Videre vil kravene til røykventilasjon i Norge bli sammenlignet med krav i andre europeiske land og et utkast av en CEN standard. Oppgaven relatert til ovenfor nevnte problemstilling, vil i hovedsak være simulering av branner i lukkede parkeringsanlegg med mekanisk røykventilasjon, ved bruk av simuleringverktøyet FDS, Fire Dynamics Simulator.

## 1.3 Målsetting

Opgaven vil sammenligne dagens krav til røykventilasjon i lukkegarasjeanlegg i Norge med andre europeiske land i den grad informasjon er tilgjengelig. Simuleringer med CFD programvaren Fire Dynamics Simulator vil benyttes for å sammenligne scenarier, danne grunnlag for nye anbefalinger og resultere i konkrete tips for utforming av lukkede garasjer. For å få god forståelse av forutsetninger og tolking av resultater fra CFD analysene vil grunnleggende fluid dynamikk og matematiske modeller for turbulenssimulering gjennomgås. Hvis resultater fra litteraturstudien og/eller simuleringene viser at dagens anbefalinger kan oppdateres vil det bli gitt forslag til føringer for ny tekst i VTEK. Simuleringer og rapport vil fullføres på normert tid, slik at innlevering av endelig rapport kan skje før den 11. juni 2012.

## 1.4 Terminologi

Det finnes ikke egnede norske ord for å beskrive alle fenomener som har å gjøre med turbulens og brann. I rapporten benyttes derfor noen engelske ord i stedet for å skrive en hel setning på norsk. Eksempel på dette er «tilbakestrømning av brannrøyk» eller «røyk som strømmer mot ventilasjonsretningen» som erstattes av det engelske ordet «backlayering».

I avsnittet som omhandler turbulens benyttes det norske ordet «virvel». Dette er en oversettelse som benyttes for de engelske ordene «vortex» og «eddy».

Det engelske ordet «ceiling jet» oversettes ifølge Kollegiet for brannfaglig terminologi (2) til «jetstrøm». I simuleringsskapittelet benyttes ordet jeten for å beskrive strømmingen ut av jetviftene. For at ordene «jeten» og «jetstrømmen» ikke skal forveksles vil det engelske ordet «ceiling jet» benyttes for å beskrive den horisontale strømmingen av varm røyk oppunder himling på grunn av oppdriften fra en røyksøyle (2).

## 1.5 Krav i Norge

Siden 1997 når funksjonsbaserte forskrifter ble introdusert har det vært mulig å benytte to forskjellige framgangsmåter ved prosjektering, forenklet prosjektering som følger VTEK eller analytisk prosjektering som oppfyller kravene i Byggteknisk forskrift (3), videre benevnt TEK (4). Ved den analytiske prosjekteringen kan det fravikes fra de forhåndsdokumenterte løsningene i VTEK men det kan ikke fravikes fra kravene i TEK uten særskilt dispensasjon fra byggesakskontoret i kommunen.

Formålet med TEK er angitt i første paragraf:

### *TEK §1-1 Formål*

*Forskriften skal sikre at tiltak planlegges, prosjekteres og utføres ut fra hensyn til god visuell kvalitet, universell utforming og slik at tiltaket oppfyller tekniske krav til sikkerhet, miljø, helse og energi.*

For parkeringskjellere er det spesielt TEK §11-17 Tilrettelegging for rednings- og slökkemannskap, som har en spesielt sentral rolle i forhold til denne oppgaven.

### *TEK §11-17 Tilrettelegging for rednings- og slökkemannskap*

- (1) Byggverk skal plasseres og utformes slik at rednings- og slökkemannskap, med nødvendig utstyr, har brukbar tilgjengelighet til og i byggverket for rednings- og slökkeinnsats.*
- (2) Byggverk skal tilrettelegges slik at en brann lett kan lokaliseres og bekjempes.*
- (3) Branntekniske installasjoner som har betydning for rednings- og slökkeinnsats skal være tydelig merket.*

Det er særlig punkt 2 som går på røykventilasjon. Med tradisjonelle ventilasjonskanaler er det ikke mulig å kontrollere røykspredningen ved en brann, noe som fører til reduserte siktforhold i hele garasjen. Dette kan medføre at brannmannskapet får det vanskelig å orientere seg i lokalet og finne brannen. Med riktig utført og velfungerende horisontal ventilasjon med eller uten jetvifter, er det mulig å skape gode nok siktforhold bak brannen i ventilasjonsretningen for at brannmannskapet skal kunne utføre en rask slökkeinnsats. (5)

For tiden finnes det ikke en nasjonal eller europeisk standard for røykventilasjon i lukkede garasjeanlegg. Det er derfor gitt spesielle krav i Veiledning om tekniske krav til byggverk (VTEK) §11-17 (4) for å ivareta tilrettelegging for retnings- og slokkemannskap. Denne paragrafen er gjengitt i vedlegg 5. Mange av disse kravene har sin opprinnelse fra en studierapport som tre ansatte ved Brann- og redningsetaten i Oslo laget etter en studietur til Tyskland, Belgia og Nederland i 2010 (6).

VTEK §11-17 angir at hvis parkeringskjelleren har et mindre bruttoareal enn 400m<sup>2</sup> eller har et automatisk slukkeanlegg er det tilstrekkelig med normal ventilasjon, anpasset for eksos og klima. Hvis dette kravet ikke er oppfylt må garasjen ha røykventilasjon. Det angis at denne røykventilasjonen kan være antingen termisk røykventilasjon basert opp Temaveiledning HO/03 Røykventilasjon (7) eller mekanisk ventilasjon basert på langsgående ventilasjons prinsipp. Naturlig ventilasjon er ikke aktuell siden paragrafen kun spesifiserer parkeringskjellere, dvs. lukkede parkeringsanlegg.

Termisk ventilasjon krever åpninger i taket som er jevnt plassert over hele takflaten (7). Dette er ikke praktisk mulig i de fleste tilfeller på grunn av bygningen som er plassert over parkeringsgarasjen. Det fører til at parkeringskjellere under bygninger enten må sprinkles eller utstyres med røykventilasjon med lateralt ventilasjonsprinsipp.

Videre i VTEK §11-17 spesifiseres det at ventilasjonsretningen må være vekk fra inn- og utkjøringsrampe og til røykutkast i motsatt ende av rommet. Røykventilasjonen må også dimensjoneres slik at det oppnås en lufthastighet i alle deler av rommet som hindrer tilbakestrømning av brannrøyk, normalt minimum 1,0 m/s. Når de preaksepterte ytelsene først ble utgitt november 2010, var det angitt at ventilasjonshastigheten skulle være minimum 1,5m/s i hele tverrsnittet. Dette ble justert ned til 1,0m/s i versjonen som ble utgitt våren 2011. Ifølge Bent Børresen (8) ved Norconsult ble den senket av praktiske årsaker siden kravet på 1,5m/s krevde meget stor kapasitet på avtrekk og tilluft. Det kan derfor stilles tvil til om kravet med 1,0m/s er godt nok.

## 1.6 Krav i andre europeiske land

Måten ventilasjonskravet er spesifisert på i Norge skiller seg fra nåværende nasjonale røykventilasjonsstandarder i Belgia (9), Nederland (10) og Storbritannia (11), samt utkastet til ny CEN standard (12). Siden røykventilasjon først og fremst er et tiltak for å underlette for retnings- og slukkemannskap med verneutstyr tillater disse standardene en viss tilbakestrømning av røyk. På grunn av de mange faktorene som spiller inn på tilbakestrømningen av røyk, spesifiserer disse standardene kun en avstand fra brannen der det skal være røykfritt. Ventilasjonshastigheten og konfigurasjon med vifter må simuleres slik at kravene er oppfylt. De angir blant annet også brannstørrelse og innstillinger for randbetingelser, slik at resultatene fra simuleringer baseres på det samme grunnlaget. Disse standardene stiller også krav til røykventilasjon selv om parkeringskjelleren er sprinklet.

Regelverket i Storbritannia, Belgia og Nederland blir kort beskrevet. Spesifikke krav fra standardene blir oppgitt senere i oppgaven. Utkastet til CEN standarden blir også presentert, selv om det kan bli forandringer frem til den endelige versjonen.

## **1.6.1 Storbritannia**

### **1.6.1.1 Approved Documents**

Approved Documents (AD) er det engelske motstykket til VTEK. Dokumentene er gyldig i England og Wales, mens andre deler av Storbritannia har egne veiledninger. Approved Documents B tar for seg brannsikkerhet og gir anbefalinger og løsninger som tilfredsstiller lovgivningen, akkurat som preaksepterte løsninger i VTEK.

Approved Document B setter følgende krav til mekanisk ventilasjon: Røykventilasjons-systemet i garasjen skal være separert fra ventilasjonen i øvrige deler av bygget. I tilfelle brann skal systemet være dimensjonert for å yte minimum 10 luftskifter pr time. Systemet skal være delt i to uavhengige deler med 50 % kapasitet (minimum 5 luftskifter) i hver, der hver del skal kunne fungere uavhengig av den andre.

Avtrekkspunktene skal være fordelt slik at halvparten er plassert nær gulvflaten og den andre halvparten plassert nær taket. Viftene skal være klassifisert som F300 i henhold til NS-EN12101-3:2006 (13), det vil si at de skal motstå 300 °C branngasser i minimum 1 time. For rømning skal det dimensjoneres med to personer per parkeringsplass.

Det henvises videre til NS-EN 12101-3 for mer informasjon om røykventilasjonsutstyr og til BS7346-7 for funksjonsbasert prosjektering (se utdrag under).

### **1.6.1.2 BS7346-7:2006**

BS7346-7:2006 Components for smoke and heat systems- Part 7: Code of practice on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat control systems for covered car parks (11).

Standarden er en veiledning med anbefalinger. På grunn av de store variasjonene i rammebetingelser til garasjeanlegg skal spesifikasjonene i standarden ikke refereres til som absolutte krav, men det må tas hensyn til forskjeller mellom hvert enkelt prosjekt.

Standarden gir blant annet anbefalinger på designbranner, krav til ventilasjonssystemer, størrelse på røyksoner og presentasjon av de forskjellige røykventilasjonsprinsippene. Verdier og løsninger fra standarden vil bli referert til senere i rapporten under respektive delkapittel.

## **1.6.2 Belgia**

### **1.6.2.1 NBN S21-208-2:2006**

Brandbeveiliging in gebouwen Ontwerp van rook- en armteafvoersystemen in gesloten parkeergebouwen. Engelsk oversettelse av tittelen er: Fire protection inside buildings – Design of smoke and heat exhaust ventilation systems (SHEVS) for indoor car park.

Standarden er gyldig for lukkede garasjeanlegg med total grunnflate større enn 1000m<sup>2</sup> som strekker seg over flere etasjer.

Tillegg B angir nøkkeltall for bruk ved CFD simuleringer. Det oppgis tabellverdier for hvordan brannen utvikler seg over tid. Tallene som oppgis er blant annet varmeavgivelseshastighet, omkrets av brannen, sotproduksjon og total sotproduksjon. Det oppgis to tabeller, en tabell for scenario der en bil brenner og en tabell for scenarioet der 2 biler brenner (14).

Det arbeides med en ny versjon av standarden. Denne inneholder blant annet et nytt tillegg der det er mulig å finne krav til lufthastighet for dimensjonering av ventilasjonsanlegget hvis dimensjonene i garasjen er kjent. Det er gitt krav til luftmengder med og uten sprinkler. Vedlegget er gyldig for garasjer over 1000m<sup>2</sup> grunnflate. (15)



### **1.6.3 Nederland**

#### **1.6.3.1 NEN6098:2012**

Rookbeheersingssysteem voor mechanisch geventileerde parkeergarages. Engelsk oversettelse: Smoke control systems for powered smoke exhaust ventilators in car parks.

Standarden stiller spesifikke krav til bl.a. CFD simulering. Det angis også minimumskrav til dokumentasjon av resultatene fra simuleringene. Hvis det ikke gjennomføres en CFD-analyse må det sikres at ventilasjonshastigheten i alle deler av tverrsnittet er mellom 1,5 og 5m/s.

### **1.6.4 CEN Standard**

#### **1.6.4.1 prEN/TS 12101-11:2012**

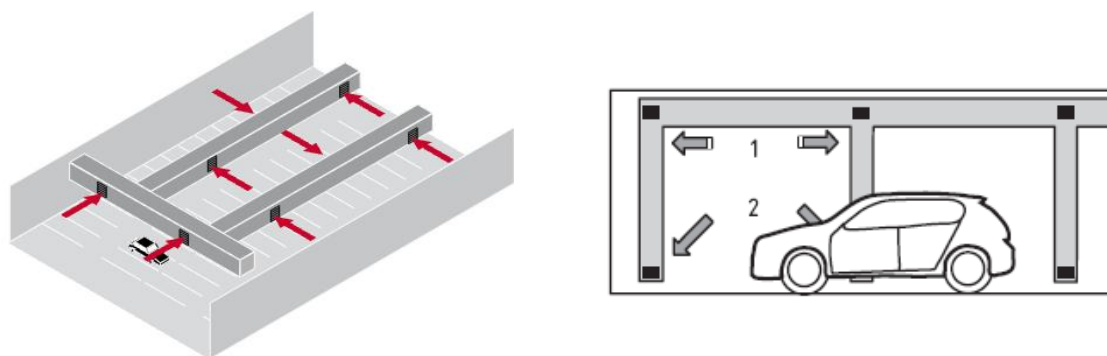
Smoke and heat control systems – Part 11: Design, installation & commissioning requirements for enclosed car parks.

En felles europeisk CEN standard på temaet røykventilasjon i garasjeanlegg er under utvikling. Arbeidet startet i desember 2008 og pågår fortsatt i arbeidsgruppen CEN TC 191 SC1 WG9. Utkastet til standarden har flere vedlegg for forenklet dimensjonering uten simulering (12). Disse baseres på blant annet artikkelen ”*Extending the principles of Impulse Ventilation in Tunnels to apply to Smoke Control in Car Parks*” (16). Beregningsmetoden beskrevet i artikkelen gjør det mulig å beregne horisontal spredning av jetstrømmen under taket. Metoden tar høyde for forskjellige typer tak, dette på grunn av at hastigheten på ”ceiling jet” vil være forskjellige for flate tak, tak med langsgående bjelker og tak med tverrgående bjelker (17). Det stilles spesifikke krav til CFD analyser. Standarden vil være gyldig for bensin- og dieslbiler opp til 3,5 tonn i en eller flere etasjer men vil ikke dekke automatiske parkeringsanlegg.

## 1.7 Introduksjon til garasjeventilasjon

I garasjeanlegg har det tradisjonelt vært brukt ventilasjonskanaler for å sørge for tilstrekkelig ventilasjon og fjerning av eksos og røykgasser. I senere tid har det blitt mer og mer vanlig å ta i bruk impulsventilasjon i likhet med tunneler. For å danne et grunnlag for oppgaven vil det i følgende avsnitt bli gitt en introduksjon til garasjeventilasjon, prinsipper og bruksområder.

Tradisjonelle system for ventilasjon i garasjeanlegg benytter seg av ventilasjonskanaler. Avtrekkspunktene i kanalene skal være jevnt fordelt over parkeringsarealet for å sørge for at det ikke blir stillestående områder der røyk og avgasser akkumuleres. I tillegg må det være avtrekkspunkter i gulvnivå for avtrekk av avgasser og andre gasser som er tyngre enn luft. Kanalene til de lave avtrekkspunktene kan skades av biler hvis de ikke blir spesielt beskyttet (5). Noen av ulempene med bruk av ventilasjonskanaler er høye material- og byggekostnader. Lukkede garasjeanlegg har generelt lav takhøyde, så det vil være begrensninger på fri høyde under ventilasjonskanalene for kjøretøy. Det kan derfor føre til at takhøyden i garasjen må bli høyere sammenlignet med bruk av andre ventilasjonsprinsipper.



Figur 1-1 Mekanisk ventilasjonssystem med ventilasjonskanaler. Venstre bilde (18). Høyre bilde: Luftinntak 1, Avtrekk 2. Avtrekk fordelt 50% oppe og 50% nede (11).

### 1.7.1 Impuls- og induksjonsventilasjonssystemer

For å forenkle ventilasjonssystemene i garasjeanlegg ble det på 1990-tallet brukt kompetanse fra tunnelventilasjon for å overføre prinsippene fra tunnelventilasjon til garasjeanlegg. Ved hjelp av impulsvifter er det mulig å forflytte store mengder luft til avtrekksviftene på samme måte som i tunneler. Men dette er avhengig av nøyaktig planlegging og simulering for å oppnå ønskede resultater.

Systemet benytter seg av to hovedtyper av ventilasjonsvifter, impuls og induksjon. I tillegg brukes det avtrekksvifter og i noen tilfeller tilluftsvifter. For å kontrollere strømningsforholdene kan det også benyttes røykskjermer/porter og motorspjeld.

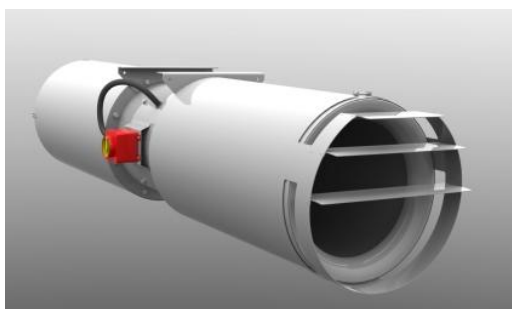
For smale parkeringsgarasjer der luften tilføres i den ene enden og trekkes ut i den andre kan det være nok med bare tillufts- og avtrekksvifter med store dimensjoner. Luften i garasjen får på den måten en stempeleffekt, hele luftvolumet presses gjennom garasjen.

Prinsippet for impuls- og induksjonsviftene er at de skyver den inntilliggende luften/røyken mot avtrekket. Kapasiteten måles ikke i volum per tidsenhet men i skyvekraft og angis med enheten Newton [N], se ligning (1.1).

$$F = ma = \frac{\text{volum luft}}{\text{tidsenhet}} \cdot \text{densitet} \cdot \text{hastighet} \quad (1.1)$$

Impulsvifter eller jetfans som de også kalles, er lik de som brukes i tunneler men er naturlig nok noe mindre, se Figur 1-2. Disse kan oftest reverseres og skyve luften den ene eller den andre veien med den samme effekten. Flere store firmaer produserer denne type vifter, kapasiteten er oftest mellom 25 og 50 Newton (19) (20). Dekningsområde for en vifte avhenger av modell og geometri av lokalet men typiske verdier fra en produsent er oppgitt til mellom 170-330m<sup>2</sup> (21).

Induksjonsvifter har samme prinsippet som impulsvifter men de trekker inn luften på undersiden og skyver den ut i et bredt munnstykke med høy hastighet, se Figur 1-3. Disse viftene er mindre i høyden som gjør at de kan plasseres der det er begrenset med takhøyde. Skyvekraften er opp til 100 Newton, det dobbelte av impulsvifter (19) (20). Dette gjør at det er mulig å oppnå samme resultat med et mindre antall induksjonsvifter sammenlignet med impulsvifter. Disse kan kun brukes til å skyve luften en retning og i tillegg lager de mer støy sammenlignet med impulsvifter. Dekningsområde er oppgitt til mellom 380 og 480m<sup>2</sup>, avhengig av modell og geometri (21).



**Figur 1-2 Impulsvifte (22)**



**Figur 1-3 Induksjonsvifte (22)**

Impuls og induksjonsventilasjonsystemer kan helt erstatte bruken av ventilasjonskanaler i garasjeanlegg for både vanlig drift og ved tilfelle brann hvis det blir riktig prosjektert. Til hverdagsventilasjon brukes viftene til omrøring av luften og sørger for at det ikke oppstår dødsoner der luften ikke blir skiftet ut. Ved å benytte seg av CO sensorer vil det være mulig å behovsstyre viftene. Det kan også installeres andre typer detektorer, for eksempel gassdetektorer for å oppdage lekkasjer fra LPG-kjøretøy.

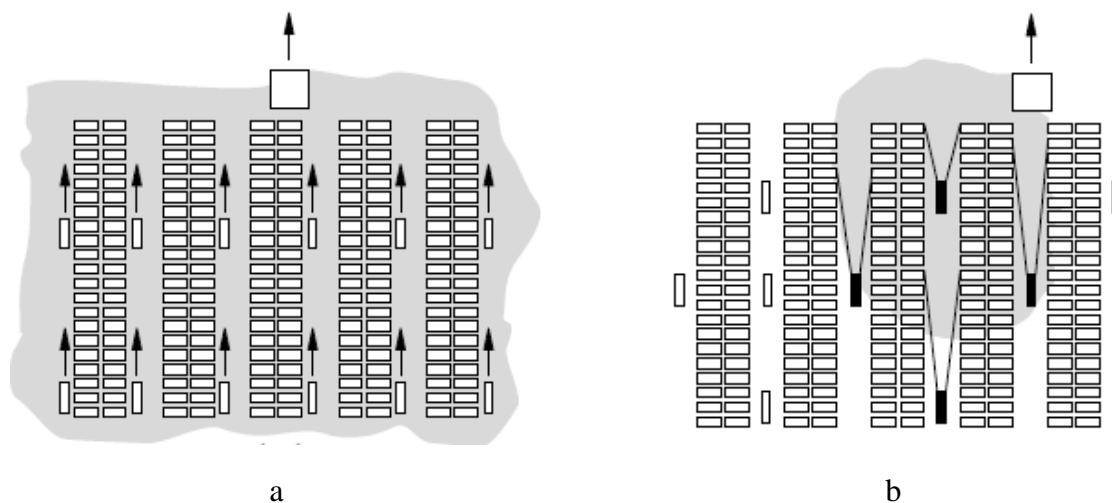
Som brannventilasjon kan impuls- og induksjonsventilasjonsystemer prosjekteres med tre forskjellige formål, røykfjerning/uttynning, røykkontroll for tilrettelegging for rednings- og slukkemannskap og røykkontroll for tilrettelegging av rømning. De to sistnevnte er like, bortsett fra skjerpete krav mht. røykfrie rømningsveier. Figur 1-4 illustrerer forskjellen mellom de to systemene (uttynning og røykkontroll).

### **1.7.2 System for røykfjerning/uttynning**

System for røykfjerning/uttynning har til formål å forbedre mulighetene ved slukking og fjerne røyken etter en brann. Det kan også forbedre forholdene i garasjen under brannen ved å redusere røyktetthet og temperatur men systemet er ikke dimensjonert for å holde røyk og temperatur under gitte verdier. Systemet kan heller ikke forbedre rømning.

Denne typen system har en mindre ventilasjonskapasitet sammenlignet med et system for røykkontroll. Lufthastigheten vil derfor være for lav til å unngå tilbakestrømming av røykgasser.

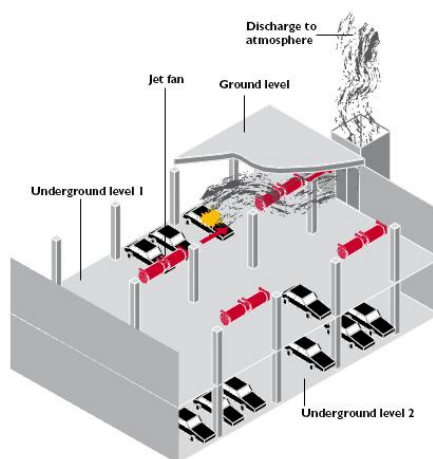
Fullskalaforsøk har vist at impuls- og induksjonssystemer har minst like bra evne til å fjerne røyk fra et lokale som tradisjonell ventilasjon. Ved sammenligningen var det brukt den samme avtrekksmengden. (5)



Figur 1-4 a) Impulsventilasjonsystem for røykfjerning/uttynning.  
b) Impulsventilasjonsystem for røykkontroll (11)

### 1.7.3 System for røykkontroll

Et godt prosjektert system med tilstrekkelig kapasitet kan holde deler av lokalet fritt for røyk noe som letter slukking. Det vil være mulig for brannmannskapet å ta seg inn i lokalet bak brannen og gjøre sin innsats raskere sammenlignet med å lokalisere brannen i en helt røykfylt garasje. Røykskader på biler vil også kunne bli mindre sammenlignet med full røykspredning.



Figur 1-5 Impulsventilasjon for røykkontroll. Deler av etasjen holdes røykfri. (18)

### 1.7.4 System for røykkontroll, spesielt for tilrettelegging av rømning

Et system for tilrettelegging for rømning skal i tillegg til kravene for tilrettelegging for rednings- og slukkemannskaper, sørge for at følgende punkter er oppfylt. Det skal være nok antall rømningsveier upåvirket av røyk, slik at det dimensjonerende personantallet i lokalet kan rømme ut disse ved en eventuell brann. Alle røyksoner utenfor den som er påvirket av brann skal være røykfrie. Det skal påvises at tilgjengelig tid for rømning er større enn nødvendig tid pluss en sikkerhetsmargin. (11)

# Del A – Litteraturstudie

Deler av dette litteraturstudiet som omhandler designbranner er blitt gjennomført i forbindelse med fordypningsprosjektet «Designbranner og røykventilasjon i parkeringsanlegg» (23) høsten 2011. I tillegg har det blitt gjennomgått flere nye publikasjoner. Blant annet er det publisert en spesial utgave av tidskriften «Fire Safety Journal» med fokus på brannsikkerhet i parkeringsanlegg. Flere av artiklene i denne utgaven er utarbeidet i forbindelse med et forskningsprosjekt (14) i Belgia der røykventilasjon har vært hovedfokus. Denne litteraturstudien er delt i tre hoveddeler, først presenteres designbranner, deretter røykventilasjon og til slutt en oppsummering av artikler som har omhandlet simulering av røykventilasjon i garasjeanlegg med programvaren Fire Dynamics Simulator. Disse tre hoveddelene blir diskutert og uklarheter blir trukket frem. Diskusjonsdelen vil danne grunnlag for videre kontrollsimuleringer som vil bli gjennomgått senere i oppgaven.

## 2 Designbrann

Når det kommer til simulering av branner er sentrale spørsmål blant annet hvor stor brannen er og hvor raskt utvikler den seg. Dette avsnittet vil presentere resultat fra fullskala brannforsøk i form av blant annet referansekurver for brannutvikling. En referansekurve viser varmeavgivelseshastigheten for en representativ brann der utviklingen er raskere enn de fullskalaforsøkene som den er basert på. Avsnittet tar også for seg krav fra Storbritannia, Nederland og Belgia. Disse landene har nasjonale standarder for røykventilasjon i garasjeanlegg. Kravet for røykventilasjon i VTEK §11-17 (4) gjelder når garasjen ikke er sprinklet, det vil derfor bli lagt vekt på branner som sprer seg til inntilliggende kjøretøy.

### 2.1 Brannenergi per bil

I forbindelse med fullskalatestene ved CTICM i 1997 (24) ble det gjennomført en studie på nye biler for å finne ut massen av mengde brennbart materiale og total brannenergi. Bilmodellene i

Tabell 2-1 var alle 1996 modell. Verdiene i Tabell 5 fikk de frem ved å demontere bilene og veie det brennbare materialet. Legg merke til at det er den teoretiske mengden energi som er angitt i høyre kolonne. De forutsatte fullstendig forbrenning og full bensintank. Ved en eventuell brann vil det reelle tallet være 70-80% av den mulige brannenergien (25) på grunn av ufullstendig forbrenning og ubrent materiale. Noen forsøk har midlertid vist enda lavere forbrenningen, helt ned i 56% for en eldre bil (25) men det er ikke forklart nærmere årsak til denne avvikelsen.

Tabell 2-1 Bilmodeller plassert i forsikringskategorier (24)

Bilmerke	Kategori				
	1	2	3	4	5
Peugeot	106	306	406	605	806
Renault	Clio/Twingo	Mégane	Laguna	Safrane	Espace
Citroen	Saxo	ZX	Xantia	XM	Evasion
Ford	Fiesta	Escort	Mondeo	Scorpio	Galaxy
Opel	Corsa	Astra	Vectra	Omega	Frontera
Fiat	Punto	Bravo	Tempra	Croma	Ulysse
Volkswagen	Polo	Golf	Passat	-	Sharan

Tabell 2-2 Middels vekt, massetap og energi som er mulig å avgi (24)

Kategori	Total masse [kg]	Mulig Massetap [kg]	Mulig total brannenergi [MJ]
1	850	200	6000
2	1000	250	7500
3	1250	320	9500
4	1400	400	12000
5	1400	400	12000

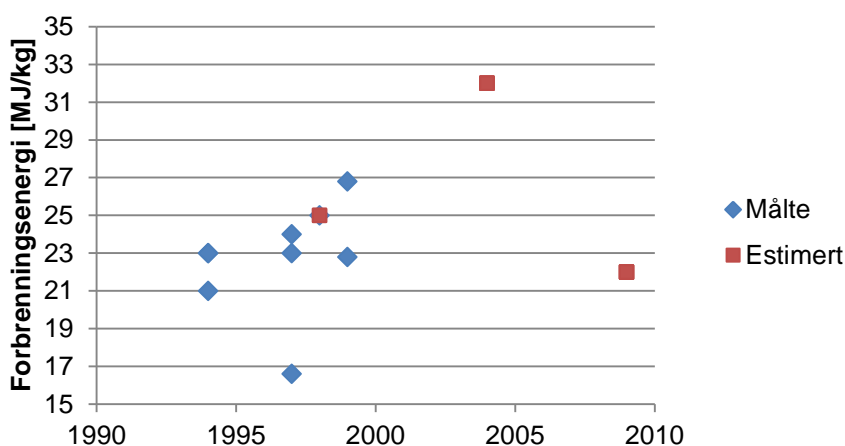
Mengde på bensin i bensintanken har mye å si for den totale brannenergien. Densiteten på bensin er  $740\text{kg/m}^3$ , det vil si at bensinen i en full tank (60 liter) veier 44,4 kg. Totalbrannenergi i en full bensintank vil derfor være ca 1940 MJ (forbrenningsenergien er gitt i Tabell 2-3), som for en kategori 3 bil tilsvarer 20%.

Bilene ble klassifisert etter forsikringskategorier der hver klasse ble gitt en middels verdi av masse, massetap og mulig brannenergi. Fordelingen av bilene ble undersøkt i en senere studie (25). Statistikken ble registrert i tidsrommet 1995-1998 og dekket kun fordelingen i Frankrike. Det viste seg at ca 90% av bilene var i kategori 3 eller lavere. I rapporten ble det nevnt at i brannene med flere biler involvert, var det aldri mer enn en bil fra kategori 3, 4 eller 5. Sannsynligvis vil det være en høyere andel kategori 3-biler i Norge sammenlignet med Frankrike.

## 2.2 Forbrenningsenergi

Fra fullskalatestene som er presentert i (23) er gjennomsnittlig forbrenningsenergi sammenstilt i Figur 2-1. Generelt kan det konkluderes med at eldre biler har en lavere forbrenningsenergi sammenlignet med nyere biler (26) (27). Forsøkene ved CTICM (24) målte verdier fra 16,6 MJ/kg til 29 MJ/kg. I den belgiske standarden NBN 21-208-2:2006 er det benyttet 24 MJ/kg mens den nederlandske standarden NEN6098:2012 benytter 25MJ/kg. Den høyeste verdien som er benyttet er Okamoto et al. (28) sine forsøk som ble gjennomførte i 2009. De målte ikke verdien men estimerte den til å være 32 MJ/kg, som er det samme som for plastikk ifølge forfatterne. De har ikke spesifisert hvilken type plastikk de har som referanse.

Undersøkelsen som er omtalt i avsnitt 2.1 har brukt 30MJ/kg som referanse for å estimere den totale brannenergien ut fra den brennbare massen.



**Figur 2-1 Gjennomsnittlig forbrenningsenergi sortert på det året testen ble gjennomført. Data er hentet fra sammenstillingen i (23)**

For å sammenligne hva en full bensintank har å si for den gjennomsnittlige forbrenningsenergien er det tatt utgangspunkt i en kategori 3 bil. Bensinen i en full tank veier 44 kg som 17% av total brennbar masse. Med en gjennomsnittlig forbrenningsenergi på 25 MJ/kg vil forskjellen mellom en full og tom tank tilsvare ca 3 MJ/kg ( $0,17 \times (43-25)$ ) under forutsetningen at bensinen forbrennes fullstendig. Netto forbrenningsenergi for bensin i tillegg til en rekke andre brennbare stoffer fra biler er angitt i Tabell 2-3.

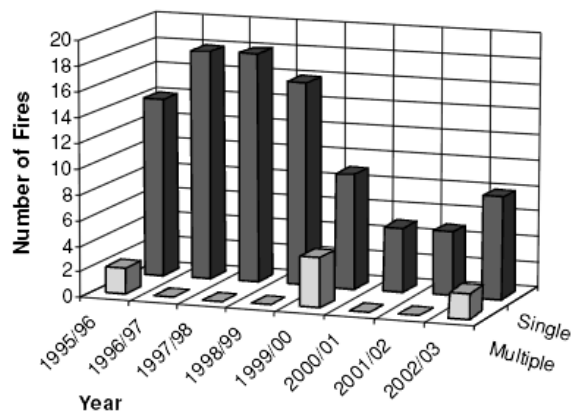
**Tabell 2-3 Netto forbrenningsenergi for noen aktuelle stoffer i personbiler. Tallene er kun gyldige for fullstendig forbrenning**

Stoff	Netto forbrenningsenergi (29)	
Bensin	43,7	MJ/kg
Polypropylen	42,66	MJ/kg
Polyuretanskum	23,2-28	MJ/kg
Nylon	28-34	MJ/kg
Gummi (dekk)	32,6	MJ/kg

### 2.3 Antall biler involvert i brannen

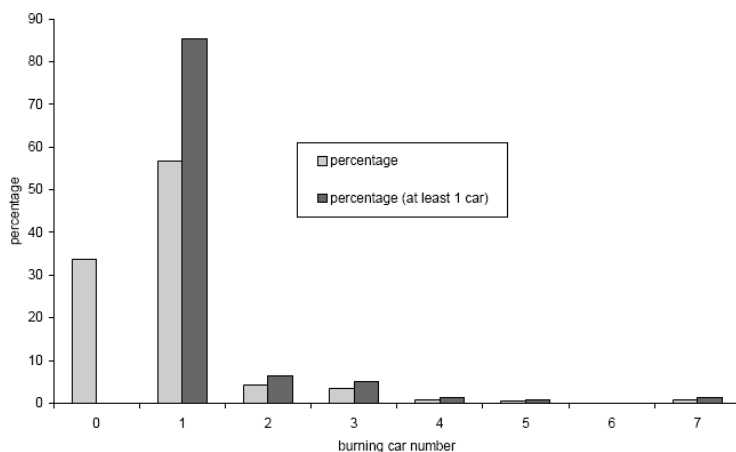
Flere studier har vist at brannen sjeldent sprer seg fra den første bilen som begynner å brenne. Som nevnt tidligere har forsøk ved CTICM (25), Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, SP (30) og BRE (31) rapportert at brannstart i kupen med lukkede vinder og dører slukket av seg selv etter relativt kort tid på grunn av ventilasjonskontrollert brann. Hvis lokalet er sprinklet vil heller ikke en utviklet brann spre seg til inntilliggende biler (31) (32).

I New Zealand var det mellom 1995 og 2003 totalt 96 bilbranner i parkeringsgarasjer, av disse var det kun tre branner som spredde seg til flere biler, se Figur 2-1. Brannene i 1995/96 og 2002/03 involverte to biler hver, brannen i 1999/00 involverte 4 større biler. Dette viser at i New Zealand spredde bare 3% av bilbrannene seg til inntilliggende kjøretøy. (33)



**Figur 2-2 Bilbranner i parkeringsbygninger i New Zealand sortert på antall biler involvert. (33)**

Li og Spearpoint (33) og European Coal and Steel Commission, ECSC (24) har i sine rapporter oppsummert statistikk fra USA. De gjengir fra American Fire Journal (34) at kun 7% av bilbrannene i amerikanske parkeringsgarasjer spredde seg til inntilliggende biler. De fleste av de undersøkte brannene som spredde seg involverte kun to biler, mens to branner involverte henholdsvis 3 og 4 biler.



**Figur 2-3 Antall biler involvert i brann (25)**

Joyeux et al. (25) konkluderer i sin rapport at det meste av statistikken fra branner i garasjeanlegg var fra USA og var fra 70 og 80-tallet. De innhentet derfor statistikk fra brannvesenet i Paris og tok sine konklusjoner ut fra den undersøkelsen. Omlag 15% av bilbranner i lukkede parkeringsgarasjer i Paris spredde seg til inntilliggende biler. Av disse involverte 97,9% mindre enn 4 biler. Brannen med mest involverte biler spredde seg til 7 biler. Statistikken viste også at 32% av alle branner i lukkede garasjeanlegg inkluderte ikke biler men annet brennbart materiale (papir, søppel etc.). Figur 2-3 påviser fordelingen av antall biler involvert i brann. De lyse stablene viser alle branner, også de uten biler. De mørke stablene viser fordelingen når det er sett vekk fra brannene som ikke involverte biler.



**Tabell 2-4 Sammenstilling av statistikk over bilbranner**

Kilde	Antall biler biler involvert	1	2	3	4	5	Totalt
New Zealand 1995-2003	Antall branner	93	2	0	1	0	96
Li & Spearpoint (33)	Total%	97%	2%		1%		
USA 1986-1988	Antall branner	376	18	8	1	1	404
Denda (34)	Total%	93%	4,5%	2%	0,25%	0,25%	100%
USA 1980-tallet	Antall branner	368	-	-	-	-	395
ECSM (24)	Total%	93,2%	-	-	-	-	
USA 1970-tallet	Antall branner	98	-	-	-	-	105
ECSM (24)	Total%	93,2%	-	-	-	-	
Frankrike 1990-tallet	Antall branner				2	1	158
Joyeux, et al (25)	Total%	75%					

I en brannrapport fra TNO (35) er det presentert noen branner i Nederland. Mange av dem har gitt store røyk og brannskader på bygningene. De tre mest alvorlige brannene involverte henholdsvis 11, 10 og 7 biler.

Litteraturen viser at de aller fleste brannene ikke sprer seg til mer enn 3 biler som kan skyldes at de har blitt slukket uten at statistikken angir dette. Det finnes tilfeller der spesielle faktorer har gitt store konsekvenser for brannspredningen, her presenteres to branner.

I oktober 2002 begynte det å brenne i garasjen til et bilutleiefirma ved Schiphol flyplassen i Nederland. Bilene var nye, tett parkert uten kjørevei og hadde bensintanker av plastikk fulle med drivstoff. Når det begynte å brenne dannet det seg væskebranner med bensin som spredde brannen videre til inntilliggende biler. Totalt ble alle 30 bilene i garasjen utbrent. (36)

I oktober 2007 begynte det å brenne i en parkeringsgarasje i Harbour Edge, Rotterdam. Garasjen hadde tre etasjer over terreng, hadde naturlig ventilasjon og var ikke sprinklet. Ut i fra brannforløp, vitneutsagn og skadeomfang er det estimert varmeavgivelse og tid for spredning til inntilliggende biler. Fra den første bilen begynte å brenne tok det 12 respektive 14 minutter for brannen å spre seg til de to inntilliggende bilene. Etter 22 og 24 minutter spredde brannen seg til bil nummer 4 og 5. Etter 45 minutter var det meste av brennbart materiale i bilene brent opp og brannen ble slukket. Brannvesenet var på plass og hadde startet bekjempelsen men måtte trekke seg ut da det ble registrert at betong begynte å løsne fra taket. I ettertid viste det seg at flere av hulldekkene var helt ødelagte og manglet bunnflensen. Simuleringer utført i ettertid viste at brannen utviklet mer enn 22MW på grunn av den raske brannspredningen. (37)

Dette viser at det kan finnes spesielle omstendigheter som må tas hensyn til ved dimensjonering av garasjeanleggene (36).

## 2.4 Tid til brannspredning

I rapporten til ECSC (24) foreslår de en konservativ verdi på 12 minutter. I forkant av rapporten ble det gjennomført en studie for å finne avstanden mellom parkerte biler. Totalt var 1624 målinger utført i 18 forskjellige parkeringsanlegg i 4 forskjellige land. I forsøket der det ble målt 12 minutter til brannspredning, var bilene parkert med 50 cm mellomrom, dette var ifølge rapporten konservativt fordi i 75% av fallene var avstanden større (24).

I Joyeux, et. al. sin rapport “Demonstration of real fire tests in car parks and high buildings” (25) beskrives det to tester med fire biler i hver. Bilen som først ble satt fyr på var plassert i midten mens de andre tre bilene var plassert bak og til sidene for den første bilen. Den korteste tiden som ble målt til spredning av brannen var 16 minutter. Brannen spredde seg ikke til alle bilene.

I CTICM (24) sine forsøk i en åpen parkeringsgarasje i 1999 spredde brannen seg til de tre bilene som var plassert på rekke. Den første bilen (ikke den i midten) ble antent under motoren, etter 16,5 minutt begynte dekket på bil nr 2 å brenne. Etter 40 min begynte bil nummer tre å brenne. Den forholdsvis lange tiden begrunnes i rapporten at vinden førte røyken ut av garasjen og dannet ikke et røyklag over bilene. Ved test nummer to var det samme bilmodeller som ved test 1 men denne gangen var det bilen i midten som ble antent. Brannen spredde seg raskt under bilen til den bakre delen, etter 5,5min rant bensinen ut fra den første bilen og dannet en væskebrann under både bil 2 og 3. Disse tok fyr innen et minutt. Brannen fortsatte noe langsommere i bil 3 sammenlignet med bil 2. Etter 30 min var brannen på vei ned igjen.

Testen med to biler vendt mot hverandre førte til brannspredning etter 5 min ved en av testene ved BRE i 2010 (31). Bilene var da plassert med 50 cm mellomrom. Ved BRE test 3 var alle tre bilene i brann etter 10 min mens det i test 4 tok 21 minutter før brannen spredde seg. Den raske brannutviklingen mener «Car park fire safety» (14) kan skyldes den lille garasjen og dermed strålevarme fra nærliggende konstruksjoner.

Det er stor spredning på dataen og det ser ut til at hastigheten på brannutviklingen til stor del skyldes hvordan og hvor brannen starter. Antennelse i kupen med åpne vinduer skaper en raskere brannvekst sammenlignet med brann som starter i motorrommet. Hvis større mengder bensin lekker ut vil brannen raskt kunne spre seg til inntilliggende biler. Ifølge BRE (31) har så mye som 85% av nye biler i Europa bensintanker av plastikk som gjør faren for store lekkasjer reell.

Forsøk av CTICM (24), Joyeux, et al. (25), Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, SP (30) og BRE (31) rapporterte at brannstart i kupeen med lukkede vinduer og dører slukket av seg selv etter relativt kort tid på grunn av manglende ventilasjon. Naturlige branner i kupen vil altså ikke utvikle seg til en stor brann.

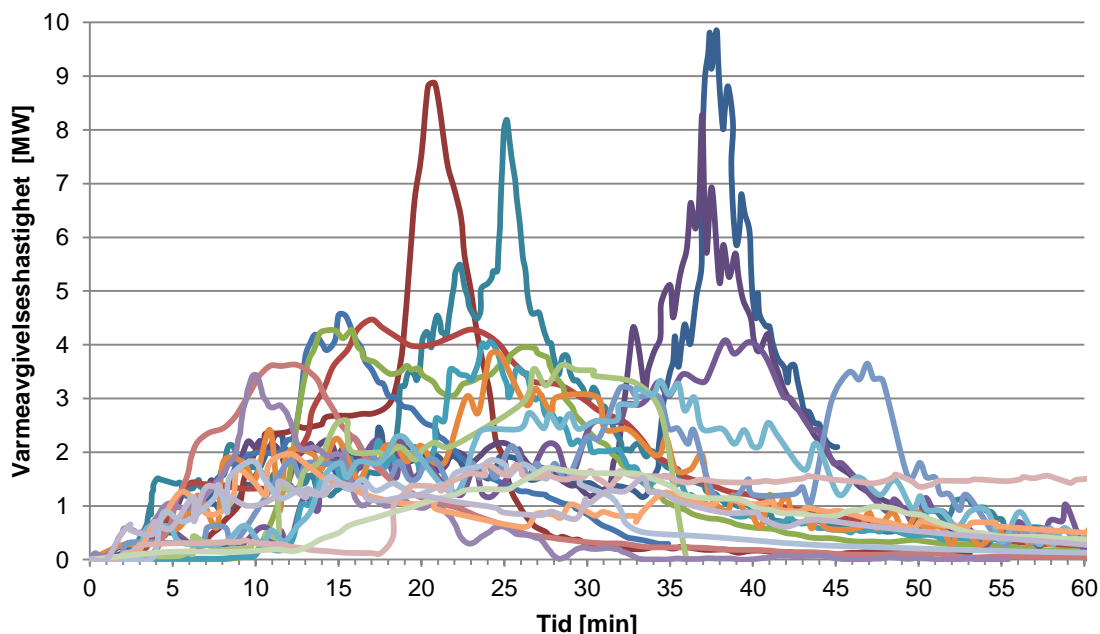
## 2.5 Varmeavgivelseshastighet

Det finnes to forskjellige tilnæringsmåter som kan benyttes når en bilbrann skal simuleres. Den vanligste og mest konservative metoden er statiske verdier der brannen er konstant (14). Hvis ventilasjonssystemet kan klare denne typen brannscenario kan den klare alle andre scenarioer også. Den andre tilnæringsmåten er tidsavhengige designscenarioer.

For å danne grunnlag for disse tidsavhengige og konstante bilbrannene har det blitt gjennomført en rekke fullskala branntester med personbiler. Flere tester er vist og diskutert i (23). En sammenstilling av databasen som Southwest Research Institute (26) har satt sammen er vist i Figur 2-4. Som Figur 2-4 og resultatene i (23) viser er det store forskjeller på hvordan brannene har utviklet seg. Den store spredningen skyldes mange forskjellige faktorer som blant annet type, størrelse og alder på bilen. Mengde bensin vil ha stor innvirkning på lokale topper og total brannenergi på grunn av det store energiinnholdet. Andre faktorer som har vist seg å ha stor innvirkning på brannforløpet, er hvor brannen starter og hvor stor ventilasjon det er. Omgivelsene vil også påvirke og kan føre til rask brannvekst på grunn av tilbakestrålende energi fra tak, vegger og røyk. Det kan for eksempel være små parkeringsanlegg eller at bilen er parkert i et hjørne. (23)

Det skal merkes at forsøkene i Figur 2-4 er gjennomført med gamle biler (15-30 år gamle). Utviklingen med utstrakt bruk av plastmaterialer og større biler, viser at nyere biler har en større varmeavgivelseshastighet og total varmeavgivelse sammenlignet med eldre biler (24) (10).

Det er mange forskjellige måter en brann kan utvikle seg på, det vil derfor være vanskelig å velge en så realistisk brann som mulig. Det må kompenseres for usikkerheter og antakelser, likevel må ikke designbrannen være alt for konservativ da dette fører til unødige store dimensjoner og kostnader. (14)



Figur 2-4 Sammenstilling av fullskala tester av bilbranner. Data er hentet fra (26)

### 2.5.1 Konstant HRR

Det angis noe forskjellige verdier for en typisk bilbrann. Verdier fra noen aktuelle standarder i andre europeiske land er presentert i Tabell 2-5. Det finnes ikke egne standarder for røykventilasjon i Norge, derfor er det angitt tall fra Temaveiledning H/03-2000 (7) og Byggforskbladet 520.380 (38).

**Tabell 2-5 Sammenstilling av konstant HRR for bilbranner i usprinklede garasjer**

Kilde	Storbritannia (39)	Belgia (9)	Utkast til CEN-standard (12)	Norge NBI 520.380 (38)	Norge HO/03-2000 (7)
Brannareal	5x5m = 25 m <sup>2</sup>	5x5m = 25 m <sup>2</sup>	7,5x5m = 32,5m <sup>2</sup>		25 m <sup>2</sup>
HRR, 1 bil				6 MW	
HRR, 2 biler		6 MW			
HRR, 3 biler	8 MW*		10 MW	8 MW	12,5MW**
Omkrets	20 m	20 m	25 m	-	-

\* Er ikke oppgitt som antall biler men som et areal

\*\* Er ikke oppgitt som antall biler men som et areal. Ikke spesifikk tall for biler men generell verdi på 500kW/m<sup>2</sup>.

I de fleste standarder kan man regne med en redusert varmeavgivelseshastighet når garasjen er utstyrt med sprinkler. Byggforskbladet 520.380 Røykkontroll i bygninger (38) gir anbefaling at det kun tas hensyn til at en bil brenner og at varmeavgivelsen er redusert hvis garasjen har sprinkleranlegg. Den Britiske Standarden BS 7346-7:2006 omtaler ikke designbrannen i form av antall biler men angir størrelse og areal av brannen. I utkastet til CEN standarden prEN/TS 12101-11 benyttes verdiene oppgitt i Tabell 2-5 og i Tabell 2-6 (12).

**Tabell 2-6 Sammenstilling av konstant HRR for bilbranner i sprinklede garasjer**

	Storbritannia (39)	Belgia (9)	Utkast til CEN standard (17)	Norge NBI 520.380 (38)
Brannareal	5x2m = 10 m <sup>2</sup>	5x2m = 10 m <sup>2</sup>	5x2m = 10m <sup>2</sup>	
HRR, 1 bil	4 MW***	4MW* 6 MW **	4 MW* 10 MW**	2,5 MW
Omkrets	14 m	14 m	14 m	-

\* Garasjen har sprinkler og *hellende* gulv. \*\* Garasjen har sprinkler og *flatt* gulv

\*\* Er ikke oppgitt som antall biler men som et areal

I den gjeldende belgiske standarden NBN S 21-208-2:2006 og i utkastet til CEN standarden prEN/TS 12101-11:2012 gjøres det forskjell på om garasjen har helning eller ikke. Hvis garasjen er sprinklet men ikke har helning, skal det regnes med de samme verdiene som uten sprinkler. Grunnen til denne forskjellen er at en hydrokarbonbrann vil kunne spre seg over et større areal på det stillestående vannet. CEN standarden stiller også krav om minste avstand til sluk for å forhindre at bensin/diesel kan spre brannen over et større areal. Ifølge sammenstillingen fra carparkfiresafety.com (14) og beskrivelsen i rapporten til Li (32) er det referert til de sveitsiske branntestene (40) der det viste seg at sprinkleren spredde den brennende bensinen inn under bilen ved siden av. Generelt kan det konkluderes med at hvis brenselstanken går i stykker og brenselet renner ut vil risikoen for brannspredningen øke betraktelig. (14)

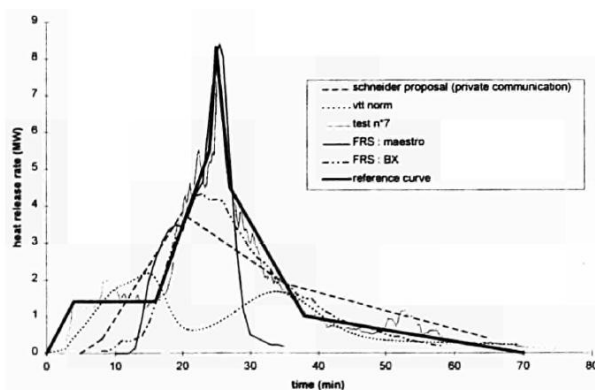
## 2.5.2 Tidsavhengig HRR

I standarder fra Belgia (NBN 21-208-2:2006) og Nederland (NEN 6098:2012) er det benyttet referansekurver fra tidligere brannforsøk ved TNO (27) og CTICM (24). Kurvene ble utviklet i forbindelse med en stor mengde fullskala forsøk på slutten av nittitallet, disse er nærmere beskrevet i (23). I følgende kapittel blir referansekurvene fra CTICM, TNO, NBN og NEN presentert og det blir diskutert hvordan brannspredning kan presenteres ved hjelp av kurvene. Det blir også vist den preliminnære brannkurven fra utkastet til CEN standarden prEN/TS 12101-11:2012 (12).

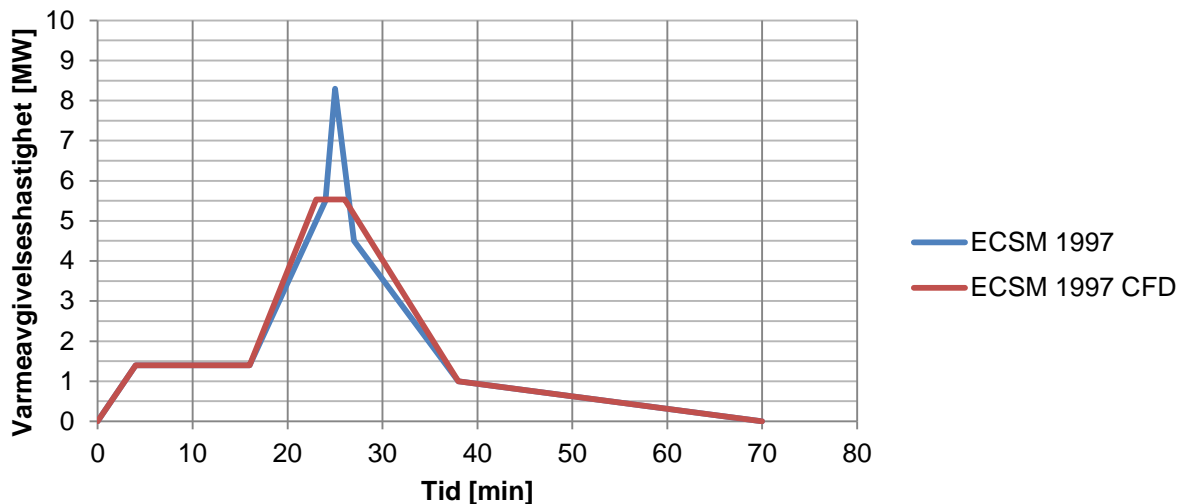
### ➤ CTICM 1997 (24)

Ut fra de ni forsøkene som ble gjennomført presenterte forfatterne en referansekurve for bruk ved dimensjonering av stålkonstruksjoner i lukkede garasjelegger, se Figur 2-5. Referansekurven hadde ved tidspunktet den ble presentert høyere maksimum verdi enn alle tidligere gjennomførte målinger både ved CTICM og ved andre forskningsinstitusjoner. Referansekurven har en maksimal varmeavgivelseshastighet på 8,3 MW og en total brannenergi på 6,79 GJ.

I den samme studien som referansekurven ble presentert ble det gjort CFD simuleringer for å sammenligne resultatene med numeriske beregninger. Den skarpe toppen på kurven førte til konvergensproblemer i programmet som ble brukt, sannsynligvis på grunn av for stor gridstørrelse/oppløsning på beregningsdomenet. Det ble derfor foreslått en likverdig kurve der den skarpe toppen var erstattet med et platå på 5,53 MW, den totale energimengden var fortsatt 6,79 MJ. Kurvene er presentert i Figur 2-6. Den totale energimengden på 6,79 GJ samsvarer bra med en kategori 3 bil med ca 70% forbrenning av brennbart material, tidligere nevnt i avsnitt 2.1.

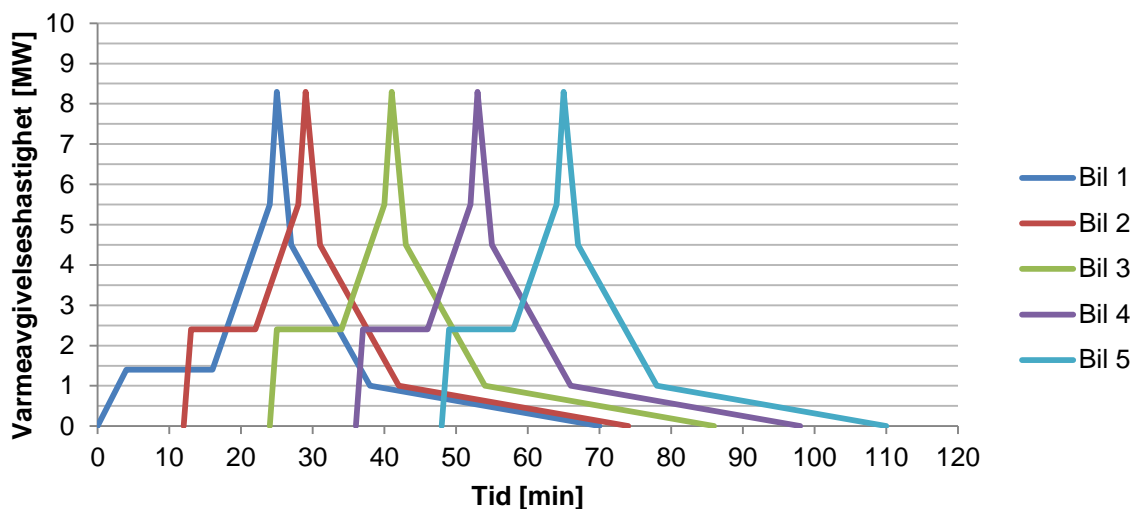


Figur 2-5 Referansekurven hadde høyere varmeavgivelseshastighet sammenlignet med alle tidligere fullskala brannforsøk (24)



Figur 2-6 De to referansekurvene fra CTICM (24)

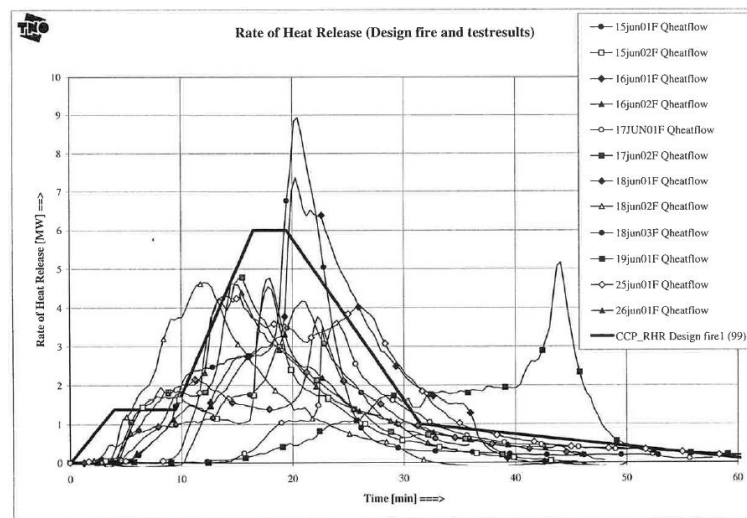
Rapporten tar også for seg problemstillingen med brannspredning til inntilliggende biler. Det er presentert en bølge av branner der det tar 12 minutter for brannen å spre seg til inntilliggende bil. På grunn av at nabobilen vil være forvarmet er det presentert en forandret referansekurve med en kortere startfase med 1 MW høyere varmeavgivelseshastighet. Bølgeteorien er presentert i Figur 2-7. Det skal merkes at de har forutsatt at brannen kun sprer seg i en retning fra den første bilen.



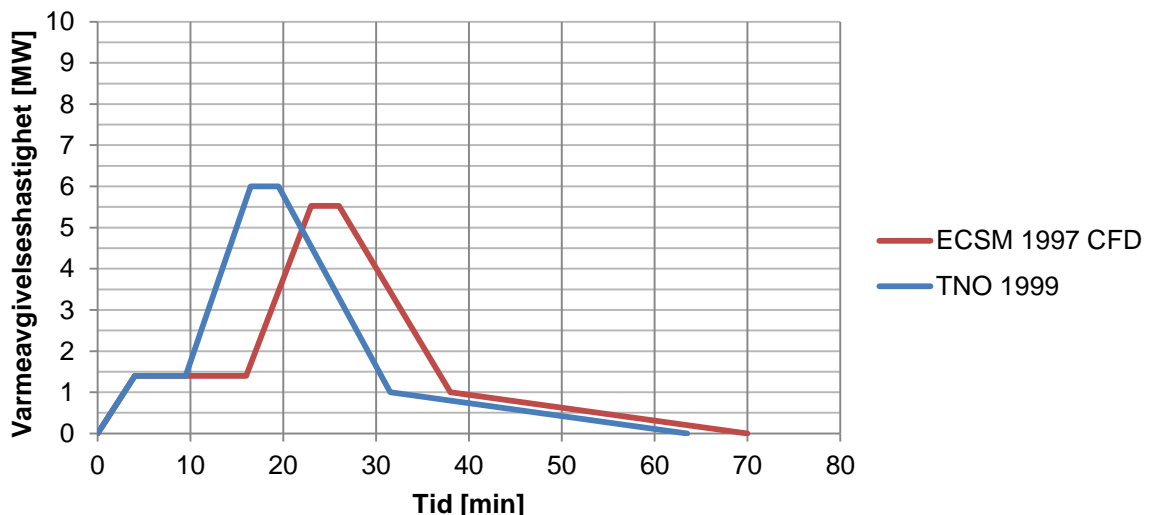
Figur 2-7 Referansekurver fra CTICM med brannspredning. Det er 12 minutters forsinkelse fra det at en bil tar fyr til brannen sprer seg til neste bil. (24)

➤ **TNO 1999 (27)**

Ved TNO presenterte de en modifisert versjon av CFD-kurven fra ECSC 1997. De økte den høyeste varmeavgivelseshastigheten til 6 MW og forkortet startfasen. Argumentasjonen for forandringen var at den første kurven som ble presentert var tilpasset en spesifikk test som hadde en forholdsvis lang startfase. De nye testene ved TNO viste en raskere brannvekst, dermed valgte de å forkorte startfasen. Økningen av maksimal varmeavgivelseshastighet ble begrunnet med at det stemte bedre overens med de nye testene samt et forsøk med bilbrann i Repperfjordtunnelen. Den nye kurven og de gjennomførte testene er presentert i Figur 2-8. Den nye referansekurven og den tidligere fra CTICM i 1997 er presentert i Figur 2-9.



**Figur 2-8 Den nye referansekurven fra TNO sammen med gjennomførte tester under studien. (27)**



**Figur 2-9 Referansekurver fra TNO og ECSC. Data for kurvene er hentet fra (24) og (27).**

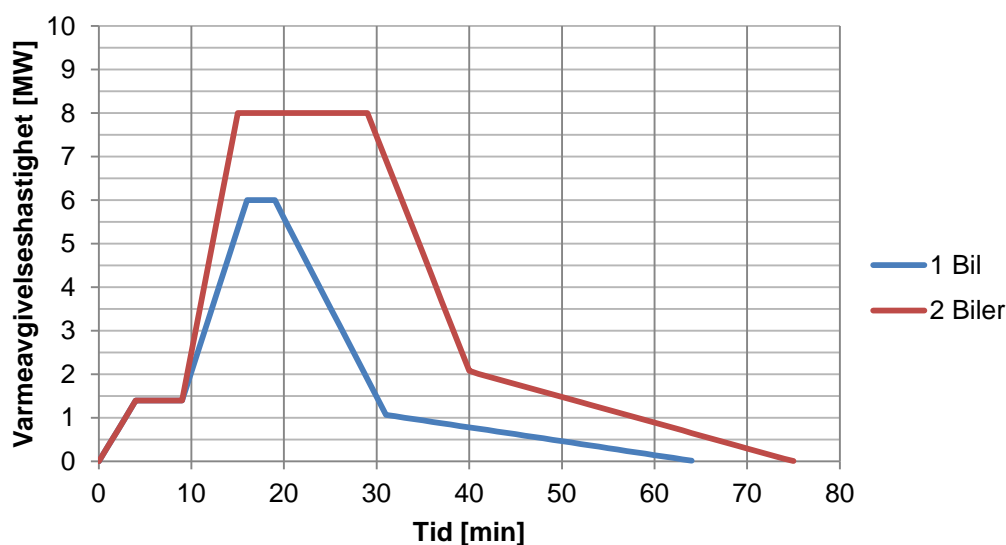
➤ **Belgisk standard, NBN 21-208-2:2006 (14)**

Den belgiske standarden NBN 21-208-2:2006 gir verdier på en og to biler i brann (14). Ved nærmere undersøkelse er kurven for to biler, en noe tilpasset kurven fra to enkelbranner for å få et jevnt platå på 8 MW. Bil nummer to er antatt å starte å brenne etter 10 minutter. Kurven for 1 bil er hentet fra forsøkene ved TNO i 1999 (27). Total varmeavgivelse er 14500 MJ for to biler og 6840 MJ for en bil.

Noe som gjør den belgiske standarden spesiell er at de også oppgir tallverdier for massetap, brannareal, brannenergi og mengden sot i et minutters intervaller. Tallverdiene er direkte avhengig av varmeavgivelseshastigheten. Den konvektive varmeavgivelseshastigheten er beregnet ut fra teorien om at 34% av avgitt energi er i form av stråling. Verdien ble målt ved CTICM i 1997 (24), som ifølge Car park fire safety (14) konservativt på grunn av at det gir en høyere gjennomsnittlig røyktemperatur sammenlignet med virkelig temperatur. Massetapet er beregnet fra en forbrenningsenergi på 24 MJ/kg og mengden sot er beregnet ut fra massetapet og en soffaktor på 0,22. En soffaktor på 0,22 vil si at 22% av massetapet er i form av sot. Denne verdien er hentet fra ECSC sine forsøk i 1997. (14)

**Tabell 2-7 Forutsetninger for simulering i henhold til Belgisk standard NBN 21-208-2:2006 (14)**

<b>Forutsetninger</b>	
Sotfaktor	0,22 g/g
Forbrenningsenergi	24 MJ/kg
Varmefluks avgitt som stråling	34% av total varmekraft
Tid til brannspredning	10 minutter
Antall biler i brann	2 stk



**Figur 2-10 Referansekurve fra Belgisk standard NBN 21-208-2:2006 (14)**



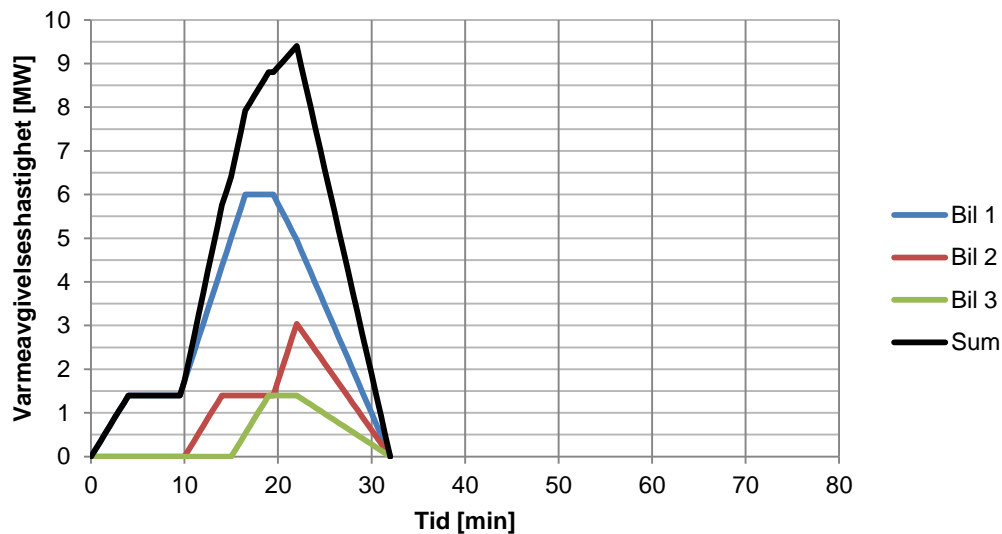
➤ **Nederlandsk standard, NEN 6098:2012 (10)**

Den nye nederlandske standarden NEN 6098:2012 har også benyttet referansekurven fra TNO (27). Denne standarden forutsetter brann i tre biler mens den belgiske standarden forutsatte brann i to biler. Brannspredning til bil to og tre skjer etter henholdsvis 10 og 15 minutter. Det kommenteres med en merknad i standarden og av (14) at dette er et konservativt scenario.

Standarden forutsetter i sin referansekurve at brannvesenet begynner slukking etter 22 minutter. Dette får til følge at brannen aldri blir større enn 9,4MW. Fra toppen ved 22 minutter går den linjært ned til null ved 32 minutter.

**Tabell 2-8 Forutsetninger for simulering i henhold til  
Nederlandsk standard NEN6098:2012**

<b>Forutsetninger</b>	
Røykpotensial	400 m <sup>-1</sup> m <sup>3</sup> /kg
Forbrenningsenergi	25 MJ/kg
Varmefluks avgitt som stråling	30% av total varmefluks
Tid til brannspredning	10 og 15 minutter
Antall biler i brann	3 stk
Brannareal	2,5m x 5m per bil



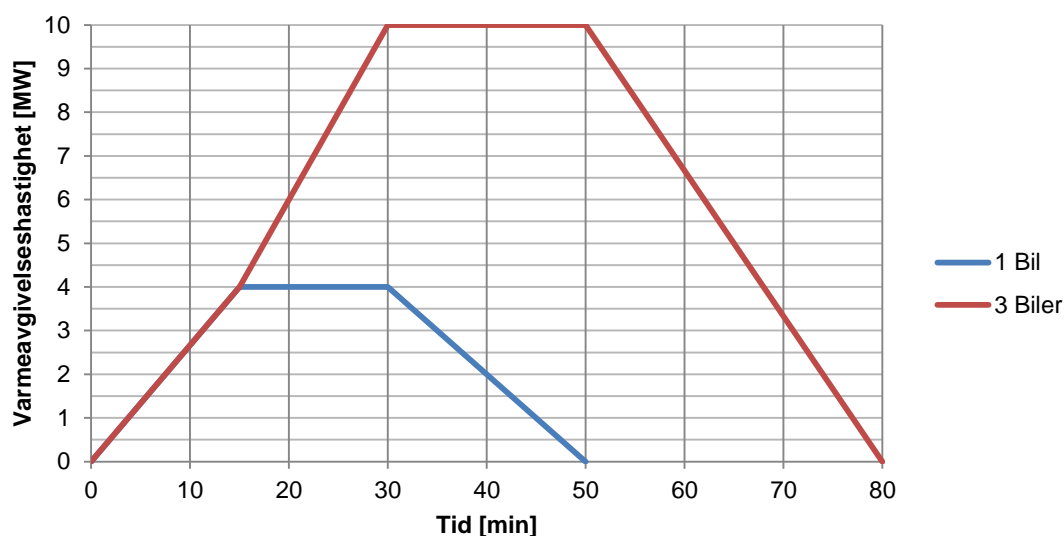
**Figur 2-11 Referansekurve fra NEN 6098:2012. Brannspredning etter 10 og 15 minutt**

➤ **Utkast til CEN Standard, prEN/TS 12101-11 :2012 (12)**

Det seneste utkastet til en ny CEN standard forutsetter 3 biler. Grunnlaget er hentet fra den samme rapporten som den Belgiske og Nederlandske standarden men har ikke tatt utgangspunkt i den foreslåtte CFD-kurven (27). I stedet baserer den seg på fullskalatester med flere biler og fullstendige brannforløp uten slukking (12). Brannarealet skal være konstant i hele brannforløpet, med  $12,5\text{m}^2$  for sprinklet garasje med helning til sluk (1 bil i brann), og  $37,5\text{m}^2$  for usprinklet garasje eller sprinklet garasje uten helning. Forbrenningsenergien er satt til  $24\text{MJ/kg}$  og soffaktorn til 0,2. Designkurven i Figur 2-12 er ikke endelig. Ifølge De Smedt, leder av arbeidsgruppen som utarbeider standarden, er det fortsatt en diskusjon om det er nødvendig å ta med de smale toppene der hver bil overtennes eller om det kan benyttes en forenklet flat kurve.

**Tabell 2-9 Forutsetninger for simulering i henhold til utkast til CEN standard, prEN/TS 12101-11:2012**

<b>Forutsetninger</b>	
Sotfaktor	0,2
Forbrenningsenergi	24 MJ/kg
Varmefluks avgitt som stråling	30% av total varmekraft
Tid til brannspredning	15 minutter
Antall biler i brann	3 stk
Brannareal	2,5m x 5m per bil



**Figur 2-12 Referansekurve fra CEN prEN/TS12101-11:2012**

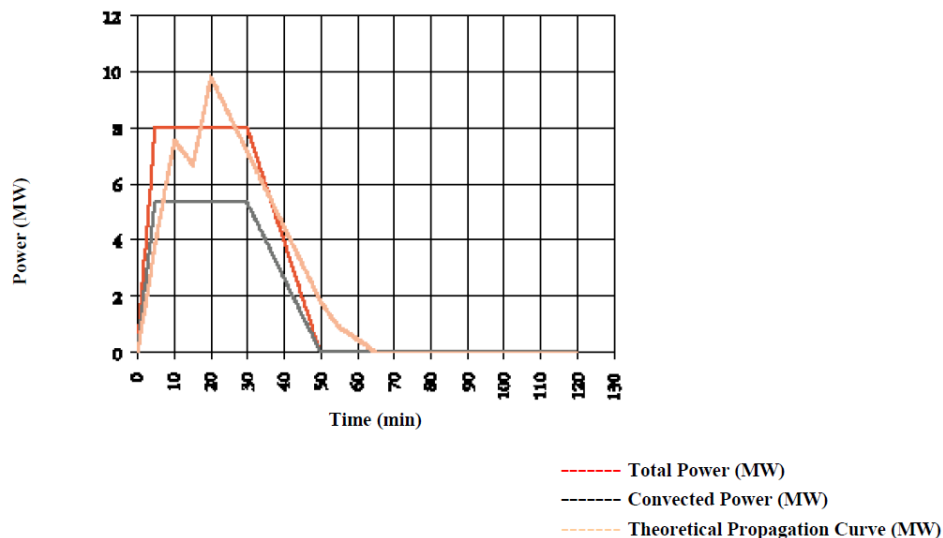
## ➤ CETU – Fransk tunnel forskningscenter (41)

I Frankrike må alle veitunneler som er lengre enn 300 meter ha godkjent sikkerhetsdokumentasjon. For å lette for de som skal gjøre lage denne dokumentasjonen og for de som skal gjøre beregninger og vurderinger er det laget en beskrivelse i seks deler. «Guide to road tunnel safety documentation - Booklet 4» inneholder flere standardiserte brannkurver for forskjellige brannscenarier som kan legges til grunn ved simuleringer og beregninger. Dokumentet skiller mellom liten og stor bil på henholdsvis 6000MJ / 4MW og 12000MJ / 8 MW. I tillegg er det beskrevet en «turist bil» med de samme verdiene som en stor bil.

De angis blant annet brannkurver for følgende scenarier:

- 1 liten bil (4MW / 6000GJ)
- 1 stor bil (8MW / 12000GJ)
- 1 liten bil, sprer seg til 2 små biler etter 5 og 15min (8MW / 18000GJ)
- 1 stor bil, sprer seg til 1 liten bil etter 10 min (8MW / 18000GJ)

Brannutviklingen er meget rask, det er også brannspredningen. En mulig årsak til dette er at det troligvis forutsettes ulykker siden det er i en tunnel med trafikk. Det velges likevel å presentere den brannkurven der 1 liten bil sprer seg til 2 andre små biler etter henholdsvis 5 og 15 minutter, se Figur 2-13.



Figur 2-13 Brann med tre biler, brannspredning etter 5 og 15 minutter.  
Total brannenergi 18000 MJ (41)

## 2.6 Brannareal

Størrelsen på brannen har blitt presentert fra noen kilder allerede. I prinsippet skiller det lite mellom de forskjellige kildene når det kommer til varmeavgivelseshastigheten og antall biler innblandet i brannen. For en brennende personbil angir den BS7346:2006 (11) og NBN S21-208-2:2007 (9) brannarealet til 10m<sup>2</sup> (5m x 2m) mens NEN6098:2012 og prEN/TS12101-11:2012 angir brannarealet til 12,5m<sup>2</sup> (5m x 2,5m). (42) benyttet 9m<sup>2</sup> (3m x 3m) mens 4,5m<sup>2</sup> (3m x 1,5m) ble brukt av Xavier Deckers i (43).

Brannarealet påvirker «ceilingjeten», dette vil bli diskutert videre i avsnitt 3.2. Et større areal er mer konservativt og gir en lengre tilbakestrømning av brannrøyk (backlayering) sammenlignet med et mindre brannareal. I utkastet til den belgiske standarden er det foreslått at brannarealet skulle følge brannutviklingen. Dette er ikke tatt med i de nyere standardene fra Nederland og CEN, disse benytter konstant areal for hele brannforløpet.

## 2.7 Røyk og sot

Det finnes flere måter å beskrive røykproduksjon og mengde sot. Drysdale (44) beskriver tre forskjellige måter å måle sotproduksjon ved en brann. For småskala testing kan røyken filtreres, sotet samles opp og måles. For større tester kan den optiske densiteten måles i et bestemt volum eller i en kanal ved avtrekk. Mengden sot angis da gjerne som et røykpotensial med enheten  $\text{Bel}\cdot\text{m}^{-1}\text{m}^3/\text{kg}$ . Det er mulig å konvertere røykpotensial til sotfaktor hvis blant annet forbrenningsenergien og densiteten til stoffet er kjent.

### ➤ Sofaktor

Sotfaktoren er et mål på hvor stor andel av materialet som forbrennes som avgår som sot. Den måles i gram sot per gram forbrent stoff. En generell sotfaktor for en bygningsbrann er 0,055 (45), dvs 5,5% av massen blir til sot. I artikkelen til Lu et. al. (46) er det benyttet 0,05. NBN 21-208-2:2006 benytter seg av resultatet fra CTICM i 1997 (24). Det ble der funnet at sotfaktoren kan settes til 0,22 som en konservativ antakelse. I prEN/TS12101-11:2012 (12) er sotfaktoren satt til 0,2. Standarden begrunner dette med at i en typisk godt ventilert brann med materialer som er vanlige i biler, vil sotfaktoren være i størrelsesorden 0,1 (12). I tillegg vil en ventilasjonskontrollert brann ha et forholdstall mellom masse røyk og masse forbrent stoff, som er dobbelt så høy som for en godt ventilert brann. De antas derfor at sotfaktoren også dobles, slik at  $2 \times 0,1 = 0,2$ .

### ➤ Røykpotensial

Røykpotensial måles som røykdensiteten hvis du samler forbrenningsgassene fra 1kg forbrent stoff i et volum på 1m<sup>3</sup>. Som eksempel er typisk verdi for tre material 100  $\text{Bel}\cdot\text{m}^{-1}\text{m}^3/\text{kg}$ . Ifølge rapporten fra TNO (27) brukte de i sine simuleringer 250  $\text{Bel}\cdot\text{m}^{-1}\text{m}^3/\text{kg}$  men i konklusjonen anbefaler de å bruke 400  $\text{Bel}\cdot\text{m}^{-1}\text{m}^3/\text{kg}$ . Denne verdien på 400  $\text{Bel}\cdot\text{m}^{-1}\text{m}^3/\text{kg}$  skal også benyttes ved simulering i henhold til den nederlandske standarden NEN6098:2012 (10).

I de kjente artiklene som er gjennomgått er forbrenningsenergien til bilene alltid oppgitt i enheten MJ/kg. Densiteten til det brennbare stoffet har ikke vært kjent, derfor har det ikke vært mulig å konvertere røykpotensial til sotfaktor for sammenligning.

### ➤ Røykproduksjon

I ventilasjonssammenheng kan det forenklet angis en røykproduksjon i volum per tidsenhet. I byggforskbladet BKS 520.380 Røykkontroll i bygninger (38) angis røykproduksjonen i en bilbrann til 10-20 m<sup>3</sup>/s. I VVS-bransjens håndbok Ventøk 3.12 angis røykproduksjonen ved bilbrann til 30-40000 m<sup>3</sup>/h (47) som vil være av størrelsesorden 10 m<sup>3</sup>/s.

## 3 Ventilasjon

### 3.1 Kritisk ventilasjonshastighet

Med kritisk ventilasjonshastighet menes den hastighet som kreves for å forhindre tilbakestrømming av brannrøyk mot ventilasjonsretningen (43). Dette er det samme som «fortrengning» i NBI bladet 520.380 Røykkontroll i bygninger (38) og Temaveiledning HO/03-2000 Røykventilasjon (7).

520.380 Røykkontroll angir at lufthastigheten som kreves for fortrengning generelt er mellom 0,5 – 3 m/s uten nærmere beskrivelse av kilder, geometrier eller brannstørrelser. Det spesifiseres at for korridorer og døråpninger bør det benyttes 0,7 m/s. Temaveiledningen beskriver at den nødvendige lufthastigheten for å forhindre tilbakestrømming av røyk er avhengig av overtemperatur og røykgassmengde, dvs. brannstørrelse, samt høyde og bredde av rommet. Typiske verdier er angitt til mellom 0,7 og 3,0 m/s. For korridorer og døråpninger må det benyttes minimum 0,75m/s (7).

NFPA 92B (48) angir to ligninger for å forhindre røykspredning i uønsket retning ved hjelp av minimum ventilasjonshastighet i motsatt retning. Den ene ligningen er for å forhindre at røyk fra et inntilliggende rom sprer seg til et større rom og den andre er røyk i et stort rom sprer seg til et inntilliggende rom. De to ligningene har et gyldighetsområde med en maksverdi på 1,02 m/s. Den ene har i tillegg krav om minimum takhøyde på 3 meter, som sjelden er tilfellet i en parkeringskjeller. Metodene i NFPA 92B er derfor ikke egnet ved dimensjonering av røykventilasjon for røykkontroll i parkeringsgarasjer.

Den nederlandske standarden NEN6098:2012 Mekanisk røykventilasjon for røykkontroll i parkerings anlegg (10), har et generelt krav om at det skal gjennomføres CFD simuleringer for å sikkerstille røykkontroll. Det angis at en forenklet metode (uten CFD) kan benyttes hvis det kan vises at røyken ikke strømmer mot ventilasjonsretningen i noen del av flere vertikale tverrsnitt. For å sikre dette skal den midlere ventilasjonshastigheten i et tverrsnitt være minimum 1,5 m/s og maksimum 5 m/s. Som en kommentar angis det i standarden at denne verdien kan gi praktisk sett urealistisk store systemer (10). Det kan tolkes som en oppfordring til at det bør benyttes CFD simulering for å dimensjonere et mindre, mer tilpasset system.

I forbindelse med det statlig finansierte prosjektet «car park fire safety» i Belgia er det gjennomført en rekke studier for å danne nytt grunnlag til nye standarder for mekanisk ventilasjon i lukkede parkeringsgarasjer. En av disse studiene har fokusert på å etablere matematiske ligninger for å forutsi parametere slik som kritisk ventilasjonshastighet og hvor langt røyk strømmer mot ventilasjonsretningen (43). Viktige forenklinger i artikkelen er forutsetningene at taket er flatt, garasjen er tom for andre biler enn den som brenner og at ventilasjonshastigheten er uniform i hele tverrsnittet. I en reell garasje vil det ikke være mulig å oppnå uniform hastighet og garasjen vil heller ikke være tom for andre biler. Forfatterne kommenterer forutsetningen at garasjen er tom med at dette er utgangspunktet i nåværende røykventilasjonsstandarder (10) (9) (49), men vil ikke ta stilling til om dette er konservativt eller ikke. Ut fra mer enn 350 simuleringer der en og en parameter ble variert, ble det blant annet funnet kritisk (uniform) ventilasjonshastighet inn i garasjen, se ligning (3.1). Der  $q''_{conv}$  er konvektiv varmeavgivelseshastighet per kvadratmeter [ $\text{kW/m}^2$ ] og  $A_F$  er brannarealet [ $\text{m}^2$ ]. Konvektiv varmeavgivelse er beregnet ut fra en forutsetning om at 30% av avgitt varme er i form av stråling, ledning er liten i

forhold og er ikke tatt med (43). Det er viktig å skille på hastigheten inn og ut av garasjen. Luften vil ekspandere når den blir varmet opp slik at volumet av tilluft vil være mindre enn volumet som kreves for avtrekket.

$$v_{cr,in} = 0,26q''_{conv}{}^{1/4} A_F^{1/5} \quad (3.1)$$

I grunnen er det hastigheten på «ceiling jeten» som skal møtes med en minst like høy hastighet fra ventilasjonen for å unngå at røyken strømmer motsatt vei. Morgan et al. (50) overfører prinsipper fra impulsventilasjon i tunneler, til å gjelde røykkontroll i parkeringsanlegg. De presenterer forskjellige empiriske ligninger fra tidligere studier for beregning av hastighet, temperatur og tykkelse til ceiling jet. Artikkelen gir anbefalinger for både åpne og lukkede garasje anlegg, med og uten jetvifter. Artikkelen har vært utgangspunkt til forenklede dimensjoneringsmetoder i prTS/EN12101-11 og er delvis gjengitt i et av tilleggene.

Tilley et al. (51) gjennomførte sammenligninger mellom LES og RANS simuleringer for branner i lukket parkeringsgarasje. I en av simuleringene som er presentert i artikkelen var det en ekstra bil til stede oppstrøms brannen. Resultatet viste at dette førte til mer tilbakestrømming, høyere lokale temperaturer og et mer komplekst strømningsmønster. I rapporten ble det ikke gjennomført simuleringer med biler i hele garasjen, kun til høyre og venstre for bilen i brann.

### 3.2 Backlayering distance

Siden røykventilasjon i parkeringsgarasjer er et tiltak for å underlette for rednings- og slukkemannskap skal det legges til rette for at de raskt finner frem til brannen og eventuelle skadde. Ved å tillate en viss tilbakestrømming av røykgasser er det mulig å prosjektere et noe mindre system med lavere kapasitet men likevel gode nok forhold for rednings- og slukkemannskap men verneutstyr. Dette illustreres godt med ligning (3.2), hastigheten til «ceiling jeten» er nesten i direkte proporsjon med brannen (50). Ligningen er gyldig for ceiling jets med radielle spredning under et flatt tak uten hindringer og med forholdene  $r/h > 0,15$ . Der  $Q$  er total varmeavgivelseshastighet i kW og  $h$  er takhøyden i meter. Brannareal og diameter er inkludert i de empiriske ligningene (52).

$$v_{jet} = \frac{0,195Q^{1/3}h^{1/2}}{(r)^{5/6}} \quad (3.2)$$

Den nederlandske røykventilasjonsstandard for røykkontroll i garasjeanlegg NEN6098:2012 (10) angir at det skal være røykfritt 15 meter fra brannen, 10 cm under taket og mot ventilasjonsretningen. Som definisjon på røykfritt er det gitt at røykkonsentrasjonen på denne avstanden ikke skal overstige  $0,02 \text{ gr/m}^3$  (10). Utkastet prEN/TS12101-11:2012 oppgir de samme kravene. I standarden er det presisert at denne avstanden er satt med hensyn til at vannstrålen fra brannvesenet skal nå brannen. I Den britiske standarden BS7346-7:2006 (11) stiller krav at tilbaketrømningen av røyk skal begrenses til maksimum 10 meter. Akseptkriter for mekanisk røykventilasjon i Singapore (53) er noe strengere. De har et minimumskrav på 3 meter takhøyde der jetvifter skal installeres. Disse viftene skal klare å begrense backlayering fra en ceiling jet til 5 meter fra brannkilden.

Tilley et al. (43) fant ut at avstanden for tilbakestrømmende røyk var linjert proporsjonal med ventilasjonshastighet og den kritiske ventilasjonshastigheten (avsnitt 3.1) hvis taket var uten hindringer, se ligning 3.1.

$$d = 40(v_{cr} - v) \quad (3.3)$$

## 4 Simulering

Det har blitt publisert en del artikler som tar for seg simulering av branner og røykventilasjon i lukkede garasjelegger med FDS. Noen simuleringer er blitt gjennomført med jetvifter, andre er forenklete problemer med et utsnitt i midten av en lengre garasje med konstant hastighet på tverrsnittet inn og ut av beregningsdomenen. Ved å forenkle simuleringen på denne måten unngås problemene med høye hastigheter som genereres av vifter, men det gjenspeiler ikke virkeligheten der det mest sannsynlig ikke vil være mulig å oppnå lik hastighet i et helt tverrsnitt.

I følgende avsnitt vil det kort presenteres noen av de artikler som er blitt publisert innen fagfeltet. Det vil også nevnes noen simuleringer som er gjennomført ved universiteter uten at de er publisert i tidsskrifter. Noen av de viktigste spesifikke innstillinger for programvaren FDS som er beskrevet i artiklene er gitt i Vedlegg 7 – Sammenstilling av simuleringer.

### 4.1 Forenklete simuleringer med utsnitt av garasje

- Numerical simulations of some possible fire scenarios in a closed car park with RANS and LES

Jangi et al (42) sammenlignet simuleringer med forskjellige beregningsprogram. LES og RANS simuleringer (se avsnitt 0 for beskrivelse) ble gjennomført med gratisprogrammet OpenFoam (54). Det ble brukt en 4MW brann, et ustrukturert grid med celledørrelser mellom 0,03 og 0,25 m. RANS simuleringene med  $k-\epsilon$  turbulensmodellen var 10 ganger raskere sammenlignet med LES simuleringene. Likevel var det gode overensstemmelser av resultatene, men med noen forskjeller nærmest brannen. Det ble benyttet symmetriplan som delte brannen i to, for både LES og RANS simuleringene. Dette anbefales ikke i FDS user guide (55) og er også kommentert av forfatterne. Kontroll simulering av hele garasjen viste kun mindre avvik i temperatur. Artikkelen avslutter med en sammenligning av LES simuleringer fra OpenFoam og FDS (Fire Dynamic Simulator). 20 cm uniform gridstørrelse ble benyttet. Resultatene overensstemte godt, særlig et stykke unna brannen, selv om FDS viste mer ustabilitet (fluktuasjoner).

- CFD study of relation between horizontal ventilation velocity and smoke backlayering distance in large closed car parks

Tilley et al (43) gjennomførte over 350 simuleringer med FDS 5.2.5 for å danne grunnlag til empiriske ligninger. Fire parametere; bredde, høyde, brannareal og HRR, ble variert en og en. Resultatene ble presentert i grafer. Ut i fra disse ble det laget tre ligninger for å beskrive kritisk hastighet, forskjell mellom mengden tilluft og avtrekk, samt avstanden for backlayering som en funksjon av kritisk hastighet og tillufts hastighet. Det påpekes at ligningene kun er gyldige for uniformt hastighetsbilde der taket er flatt. Celledørrelsen

var 20 x 20 x 10 cm for alle simuleringene, standard verdiene for turbulensmodellen ( $C_s = 0,2$ ) ble brukt. Strålingsmodellen var stengt av, andel stråling var satt til 30%.

- Numerical simulations on fire spread and smoke movement in an underground car park

Zhang et al (56) undersøkte hvilke varmeavgivelseshastigheter som det var å forvente i en lukket garasje. I modellen var deler av biler lagd av brennbart material slik at det var mulig for brannen til å spre seg mellom biler. Simuleringer med en bil viste maks HRR på 4MW noe de mente stemte godt overens med tidligere fullskala forsøk. De gjennomførte simulering med en hel garasje, 75x16x3m, og ventilasjonen var satt til henholdsvis 6 og 12 luftskiften per time. Brannstarten midt i rommet førte til meget rask spredning av brannen slik at brannen forbrukte stor del av oksygenet i garasjen. Varmeavgivelseshastigheten var etter 12 minutter over 50MW. Etter 20-25 minutter ble brannen kraftig begrenset på grunn av manglende oksygen, og slukket nesten av seg selv. Etter ca 25-35 minutter flammet brannen opp igjen med HRR over 70MW, før simuleringen ble avbrutt etter 40 minutter. Forfatterne har ikke kommentert de høye HRR verdiene eller den raske brannspredningen. Det er heller ikke angitt innstillinger, randbetingelser eller versjon av programvaren. De refererer til bruker guide versjon 3, slik at det er mulig å anta at de har benyttet en tidlig versjon av FDS 3. I simuleringene ble det brukt sofaktorn 0,037. Dette er et meget lavt tall sammenlignet med andre artikler, men det er ikke beskrevet hvor det er hentet fra.

- The use of impulse ventilation for smoke control in underground car parks

Viegas (57) gjennomførte en sensitivitetsanalyse der forskjellige parametere ble variert for å finne anbefalinger for prosjektering av røykventilasjon med 50N jetvifter. Parametere som ble forandret var plassering av brannen, varmeavgivelseshastighet, avstand mellom vifter samt størrelsen på avtrekket. Det presenteres også en analytisk modell for å beskrive strømningsmønsteret nære taket. Forfatteren refererer til en annen artikkel han selv har skrevet for verifisering av simuleringene, denne artikkelen var ikke mulig å lese gjennom universitetsbibliotekets databaser uten var kun tilgjengelig for salg. Det var derfor ikke mulig å kontrollere spesifikke innstillinger som er brukt. Forfatteren har ikke presentert hvilken versjon av FDS som er benyttet for simuleringene og randbetingelsene er heller ikke godt beskrevet. Berengningsdomenen som er benyttet er 65x20x2,3m med cellestørrelsene 0,33x0,33x0,287. Vegger, gulv og tak angis som «impermeable», som antas å være adiabatisk, åpningene i endene av garasjen er satt til «OPEN». Varmeavgivelseshastigheten er satt til 4MW konvektiv. Det antas derfor at strålingsmodellen er avslått. Jetviftene som er oppgitt til å ha 45N skyvekraft benyttet har firkantet tverrsnitt med siden 0,287m. Hastigheten i viften er satt til 21,35m/s. Dette tilsvarer kun én celle, noe som gir en meget dårlig oppløsning. Selv om forfatteren har spesifisert et firkantet tverrsnitt for viften så vil geometrien bli tilpasset til griden når modellen simuleres. Bredden til viften vil derfor økes fra 0,287m til 0,33m, dette fører til at viften ikke lengre gir 45N i skyvekraft som angitt uten i realiteten har 52N, en økning tilsvarende 15%.

I den samme artikkelen ble det gjennomført simuleringer på en større garasje med dimensjonene 95x150x2,3m. Brannen var plassert i midten og garasjen var utstyrt med 30 jetvifter. For å spare beregningstid benyttet forfatteren et symmetriplan («MIRROR»), slik at beregningsdomenen var delt rett igjennom brannen. Som tidligere nevnt er dette



ikke anbefalt i FDS User Guide, spesielt ikke gjennom store branner slik som det er gjennomført her.

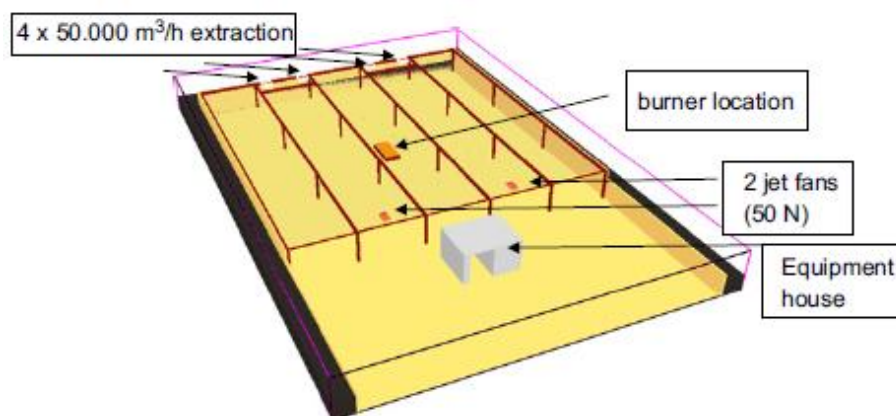
Det er mye å være kritisk til i denne rapporten, spesielt den dårlige beskrivelsen av innstillinger i programmet. Dimensjonene på jetviftene er feil i begge scenariene som presenteres slik at viftene er 15% større enn hva som er angitt.

## 4.2 Simuleringer med hele garasjer

- Smoke control in case of fire in a large car park: CFD simulation of full-scale configurations

Deckers et al (58) sammenligner fullskala forsøk med simuleringer i en 28,6 x 30m x 2,7 m stor garasje. To induksjonsvifter blir benyttet i noen av de over 350 simuleringene. Artikkelen beskriver detaljer hvordan induksjonsviftene ble simulert, det forutsettes derfor at viftene er verifisert mot målte data. Dataene som presenteres er midlet over 40 sekunder slik at naturlige fluktuasjoner blir jevnet ut. Ulikt de fleste andre artikler som er gjennomgått, hvorav ikke alle er presentert i dette avsnittet, beskriver artikkelen til Deckers et al detaljert hvilke innstillinger som er benyttet. Randbetingelsene for gulv, vegger og tak er satt til adiabatisk. Forfatterne skriver at tilbakestrømmingen av røyk nesten ikke blir påvirket av bruken av adiabatisk flater i de gitte forholdene. Cellestørrelsen er 0,2x0,2x0,15m men med 0,05m høyde på cellene nære taket. Det er uklart om dette var gjennomført med en ekstra grid nære taket eller om griden ble stukket ut slik at det var en lineær økning fra 0,05m nære taket og 0,15m ved gulvet. Parameterne som ble forandret i simuleringene var brannstørrelse, hastighet på avtrekk og induksjonsvifter. Det ble også gjennomført tester med bjelker i taket.

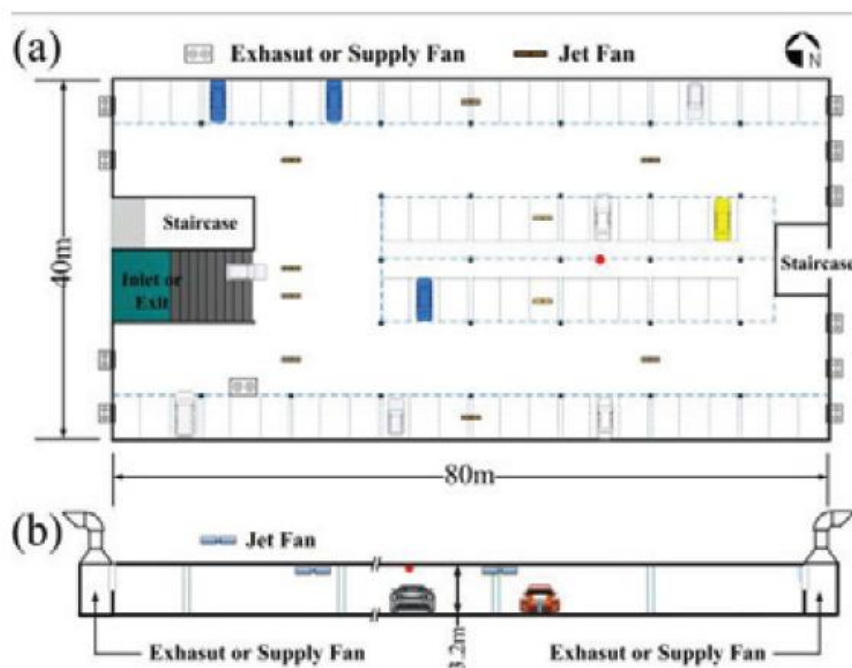
Artikkelen konkluderer med flere punkter. Blant annet beskrives det at FDS ikke simulerer strømmingene fra tilluften korrekt på grunn av at det ikke genereres nok turbulens. Likevel mener forfatterne at strømningsmønsteret i garasjen overensstemmer godt med simuleringene. Hvis det er bjelker tilstede kreves det en økning i lufthastighet med langsgående bjelker, men en minking hvis bjelkene er på tvers av ventilasjonsretningen. Hvis det dannes sirkulasjonssoner så vil ikke økt kapasitet på avtrekket forbedre situasjonen.



Figur 4-1 Garasjen som ble brukt for både simuleringene og fullskala testene av Deckers et al (58)

➤ Numerical Study on Impulse Ventilation for Smoke Control in an Underground Car Park

Lu et al. (46) benyttet FDS 5.3.0 og simulerte 10 scenarier i en 80 x 40 x 3,2m stor garasje, se Figur 4-2. Cellestørrelsen kubisk med lengden 0,2 m. Brannen var satt til 4MW med arealet 5x3m. Ulikt mange andre var brannen plassert 1,5m opp slik at avstanden til taket var noe mindre, i gjengjeld er takhøyden høyere en det som er benyttet i de fleste andre artiklene. Tilluft og avtrekk var gitt av 4 respektive 6 vifter med dimensjonene 2x1m, plassert 2,7m over gulvet. I tillegg var innkjøringen til garasjen åpen i samme vegg som tilluften. De forskjellige scenariene er parametervariasjoner der plassering av brannen, antallet jetvifter, hastigheten til jetviftene og avtrekkshastigheten varieres. Artikkelen konkluderer blant annet med at ventilasjonshastighetene kan føre til at flammene blir bøyd mot bilen nedstrøms og røyk akkumuleres nedstrøms slik at faren for brannspredning øker.



Figur 4-2 Modell av garasjen i simuleringene til Lu et al. (46). a) Horisontalsnitt, b) Vertikalsnitt. Figuren er hentet fra (46)

## 5 Diskusjon

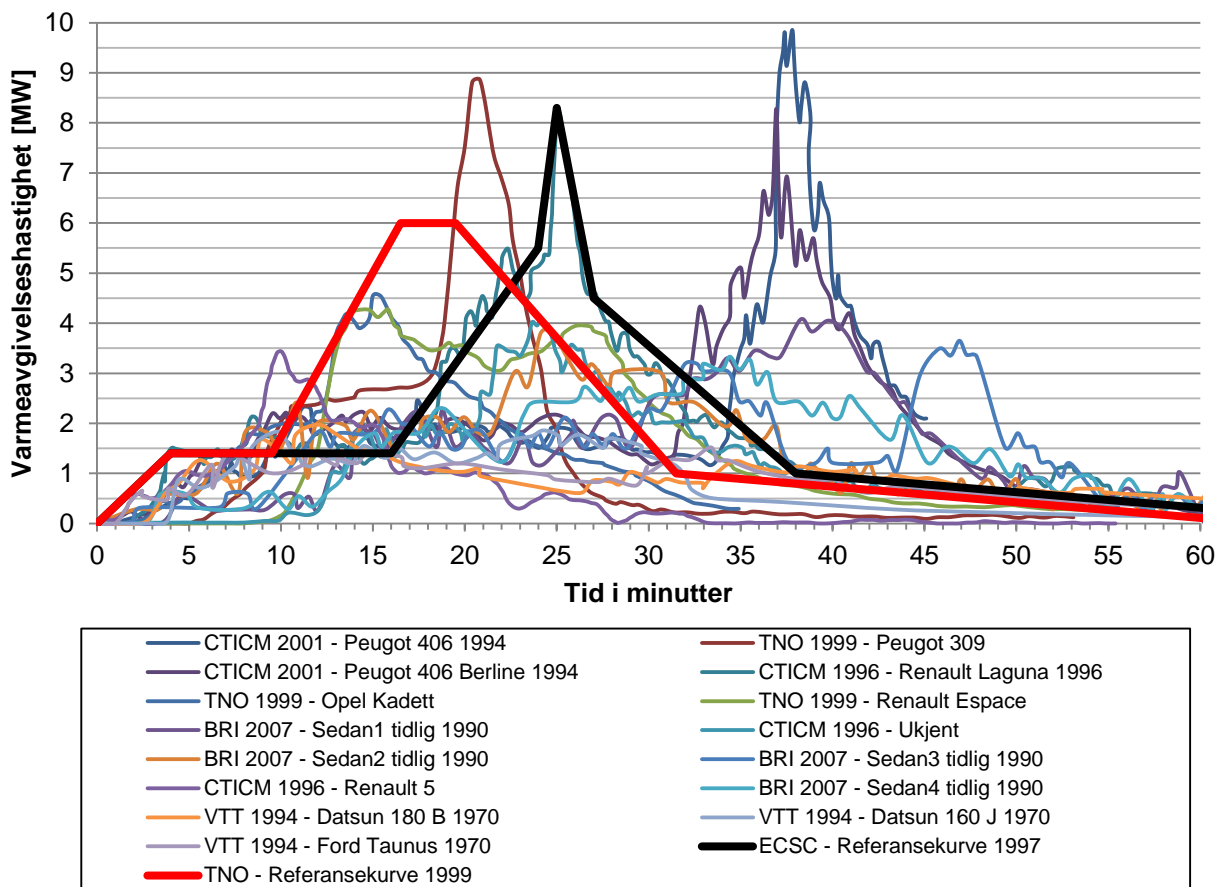
### 5.1 Designbrann

#### Tidsavhengige kurver for HRR

For dimensjonering av ventilasjonssystemet er det avhengig av den maksimale varmeavgivelseshastigheten. Hvordan brannen utvikler seg frem til det har kun noe å si for temperaturberegninger og vurdering av rømning.

Den vanskeligste faktoren å vurdere vil være tiden det tar for brannen å spre seg til inntilliggende biler. Resultatene fra forsøkene er langt ifra entydige og viser til kompleksiteten i brannforløpene. Det gjelder å velge en verdi som er konservativ uten at det fører til en urealistisk stor brann.

Standardene i Nederland (10) og Belgia (9) benytter seg av referansekurven fra TNO (27) (se avsnitt 2.5.2). Denne gir en konservativ topp tidlig i brannen og gir en maksimal varmeavgivelseshastighet på 6 MW. Selv om noen forsøk har målt verdier opp til 9 MW i korte perioder så har referansekurven fra TNO en topp som er relativt lang. Den er også basert på at det er en kategori 3 bil som brenner som gir ca 6,8 GJ i brannenergi. Kurven fra TNO er presentert sammen med referansekurven fra ECSC (24) og samtlige forsøk fra databasen til SwRI (26) i Figur 5-1.



Figur 5-1 Referansekurver fra TNO og ECSC for sammenligning med tidligere tester ved MVRI

Det største problemet ved estimering av brannspredning vil være at bilene ved siden av bilen der brannen starter vil være forvarmet i det brannen sprer seg (24). Dette vil føre til et raskere brannforløp i de bilene og i verste fall føre til at alle bilene når sin høyeste varmeavgivelseshastighet i det samme tidsrommet. På grunn av at hver enkelt bil har en kort topp i varmeavgivelsestemperatur på kun 3 minutter, vil tiden til brannspredning få store konsekvenser. Hvis det velges enn tid der bil 2 og 3 når sin topp på det samme tidspunktet vil brannen bli meget stor. Hvis det er en forsinkelse mellom spredning til 2 og 3 vil ikke den totale varmeavgivelseshastigheten bli like høy.

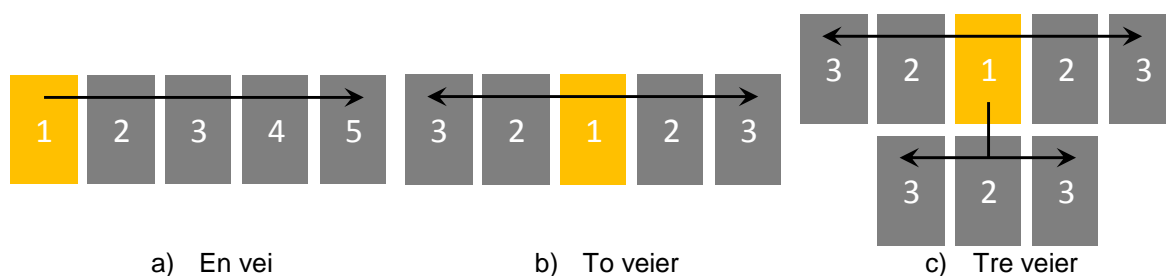
## Antall biler i brann

Fullskala forsøk og erfaringer (31) viser at hvis sprinkler utløses i garasjen vil ikke brannen spre seg til inntilliggende biler. Brannen vil ikke la seg begrenses nevneverdig siden taket og panseret på bilen blokkerer vannet for å treffe selve brannen. Forsøk har også vist at hvis brannen starter inne i kupen når dører og vinduer er lukket, så vil brannen slukke seg selv på grunn av oksygenmangel (24) (25) (30) (31).

Når garasjen ikke er sprinklet må det forutsettes at brannen sprer seg videre. Statistikken på brannspredning i kapittel 2.3 er basert på tall fra Frankrike, USA og New Zealand. Det har ikke vært mulig å finne frem lignende statistikk for de nordiske landene. Problemstillingen med antall biler involvert i en brann i parkeringsgarasje må derfor vurderes mot denne tilgjengelige statistikken. Denne viser at i ca. 97% av alle tilfeller er brannen begrenset til maksimum tre biler. Noe som ikke fremkommer i statistikken er om dette skyldes at brannene er blitt slukket av brannvesenet og derfor er blitt begrenset.

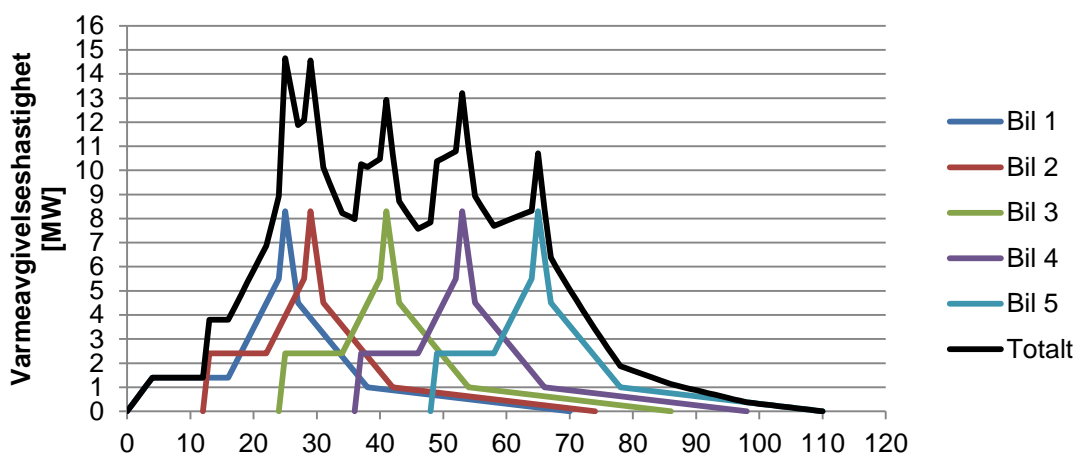
Et system som er dimensjonert for røykventilasjon vil tilføre brannen oksygen noe som tillater brannen å vokse seg stor. Når en brann har spredd seg til tre biler vil varmeavgivelseshastigheten være meget høy, opp mot 8-10MW. Temperaturene under taket nær bilene vil da være så høye at brannen lett kan spre seg videre. Hvis brannen ikke blir slukket i tide og biler er parkert ved siden av bilene i brann, er faren at brannen kan spre seg i hele garasjen.

Forsøk av BRE (31) har vist at brannen kan spre seg over «tomme» parkeringsplasser på grunn av at ventilasjonen transporterer de varme branngassene i en retning. Temperaturen over bilen som ble antent var over 1100 grader. Resultatene fra branntest 1, viste en maksimal varmeavgivelseshastighet på 16MW med tre biler involvert i brannen på en gang. Den høye varmeavgivelseshastigheten er kommentert i rapporten ”*Fundamental design approaches for improvement of the fire safety in car parks*” (14) med at det skyldes det lille lokalet testene ble gjennomført i. Store, virkelige branner i Storbritannia, Belgia og Nederland har vist at brannen kan spre seg til samtlige biler i garasjen noe som gir varmeavgivelseshastigheter over 20MW.



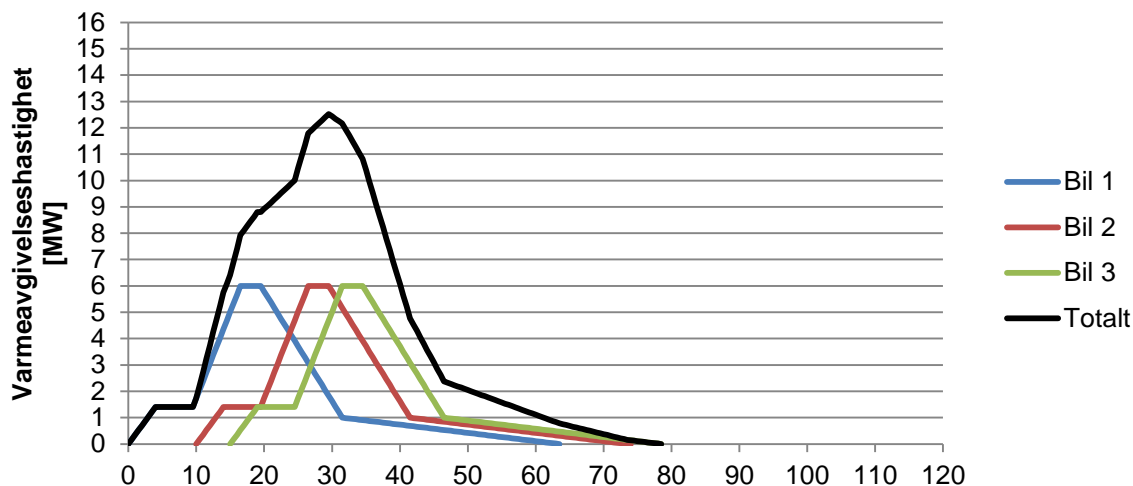
**Figur 5-2 Mulige scenarier for brannspredning**

Når det kommer til vurdering av størrelsen på en brann, er mulig å forestille seg flere mulige scenarioer for brannspredning, tre av dem er presentert i Figur 5-2. En brannspredning i en retning (Figur 5-2 a) er foreslått i ECSC (24) med 12 minutter mellom hver bil, se Figur 5-3. Dette vil ikke være et konservativt valg, det bør i stedet ses nærmere på alternativ b og c i Figur 5-2. Alternativ b er beskrevet i den nederlandske standarden (10) med en forsinkelse på 10 min til bil 2 og 15 min til bil 3. De har forutsatt at brannen slukkes etter 22 minutter. For Figur 5-2 c) så er det reelt at brannen relativt raskt kunne spre seg mellom to biler som stod parkert mot hverandre (31). Det vil derfor være det verst tenkelige scenarioet. Når det tas i betraktning at det er meget sjeldent det faktisk brenner i parkeringsgarasjer og at brannen i tillegg sprer seg til bilene ved siden av, vil en brann der fire biler når sin høyeste varmeavgivelseshastighet samtidig anses som meget små.

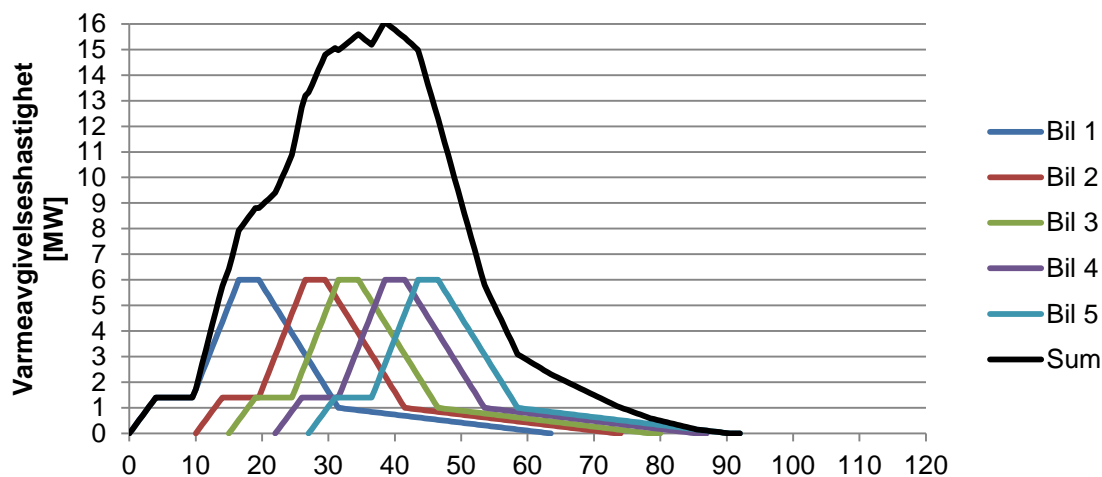


**Figur 5-3 Brannspredning med 12 minutters mellom i en retning med referansekurven fra ECSC (24). Jmf. Figur 5-2a.**

Vi ser videre på scenarioet i Figur 5-2 b, og benytter designkurven fra TNO. Hvis det tas utgangspunkt i den nederlandske standarden NEN 6098:2012 (10) der brannspredning til høyre og venstre skjer etter 10 og 15 minutter kan vi tegne Figur 5-4. I stedet for at brannvesenet begrenser brannen til 9,4MW vil den teoretisk, uten slukking, vokse til 12,5MW. På grunn av den høye varmeavgivelseshastigheten er det stor risiko for at brannen vil fortsette å spre seg. Hvis det forutsettes fortsatt brannspredning etter totalt 22 og 27 minutter (12 minutter fra hhv bil 2 og bil 3) kan vi tegne Figur 5-5. Brannen når på sitt maksimum på 16MW. Er det flere biler i nærheten vil brannen kunne fortsette å spre seg hvis ikke brannvesenet slukker brannen.



**Figur 5-4 Brannspredning med referansekurve fra TNO 1999.**  
 Tid til brannspredning: 10 og 15 minutter. Dette vil være scenariet i NEN6098:2012 (10) hvis ikke brannvesenet slukker etter 22 min.



**Figur 5-5 Brannspredning med referansekurve fra TNO 1999.**  
 Tid til brannspredning: 10, 15, 22, 27 minutter

Det er ikke angitt i utkastet til CEN standarden når brannspredning til bil 3 og videre inntreffer, men på grunn av det oppgitte brannarealet er det mulig å se for seg tre biler i brann. Kurven er mer konservativ sammenlignet med TNO kurvene siden den har en raskere brannvekst, lang varighet og har et langt platå på 10MW. Som tidligere beskrevet er det ikke bestemt om dette er det endelige forslaget eller om det bør benyttes en kurve med spisse topper slik som Figur 5-3.

Siden det er få store ulykker og at det i de aller fleste tilfeller er maksimum tre biler involvert (selv om det kan skyldes brannvesenets innsats), vil det være hensiktsmessig å dimensjonere for tre biler i brann hvis garasjen ikke er utstyrt med sprinkler.

### Statiske verdier for HRR

Flere tester og rapporter viser at eldre biler har en varmeavgivelseshastighet på mellom 2,5 og 4 MW (25), (59). Dette er relativt lavt sammenlignet med brannforsøk av biler fra slutten av 90-tallet og fremover. Flere artikler skriver at nyere biler inneholder mer

plastmaterialer. Dette fører til høyere varmeavgivelseshastighet og total brannenergi (26) (33) (25).

Ved å sammenligne brannstørrelser fra de enkelte brannforsøkene og forsøkene med flere biler i (23) med de oppgitte statistiske verdiene på varmeavgivelseshastigheter i avsnitt 2.5.1 kan tallene vurderes opp mot hverandre. Det har ikke vært mulig å få tak i statistikk for å vurdere hvilke biler som er vanligst i Norge. Derfor er det gjort en kvalifisert vurdering at de fleste biler er av kategori 3, se avsnitt 2.1. For en garasje uten sprinkler vil en statistisk verdi på 10MW med tre biler i brann være konservativ i de fleste tilfeller og i tråd med utkastet til den nye CEN standarden prTS/EN 12101-11 (12). Dette vises også i de tidsavhengige referansekurvene og forsøkene med flere biler.

For sprinklete garasjer vil 4MW være et godt valg som stemmer overens med standarder i Belgia (15), Storbritannia (11) og utkastet til CEN standarden (12). 2,5MW som angis i Byggforskladet 520.380 (38) må anses som alt for lavt siden sprinkelen ikke vil kunne begrense en brann, kun forhindre at den sprer seg. Konsekvensen med å velge en for lav varmeavgivelseshastighet vil være at ventilasjonssystemet ikke klarer å håndtere mengdene med røyk som dannes i brannen, noe som får til følge at røyken sprer seg i hele garasjen og forholdene for rednings og slukkemannskaper blir forverret.

I den belgiske standarden og utkastet til prTS/EN12101-11:2012 stilles det krav til helningen på gulvet og en minste avstand til en renne eller sluk for å få benytte 4MW som designbrann. Dette skal sikre at hvis det blir en lekkasje av drivstoff så skal denne ikke spre seg over et stort område og antenne mange biler. Dette er ikke et vanskelig krav å oppfylle og er også gunstig i forhold til renhold.

## **Røykproduksjon**

Røykproduksjon er avhengig av massetapet. Massetapet i er igjen avhengig av varmeavgivelseshastigheten og forbrenningsenergien. Ved å beregne massetapet og estimere andel sot kan mengdene oppgis. Forbrenningsenergien har variert mye mellom testene. Det har blitt konkludert i rapporten av SwRI (26) at det ser ut til at nyere forsøk har benyttet seg av høyere verdier. Det vil være mer konservativt med tanke på røykproduksjon å velge en lavere verdi sammenlignet med en høyere. De fleste målingene som er vist i avsnitt 2.2 har vist verdier mellom 20 og 26 MJ/kg. Den belgiske standarden NBN 21-208-2:2006 og prTS/EN12101-11:2012 har brukt 24 MJ/kg som må anses som et godt estimat med tanke på at de fleste biler i dag er nyere sammenlignet med testene som har blitt diskutert.

Fra en gitt kurve for varmeavgivelseshastighet og et gjennomsnittlig tall på forbrenningsenergien kan massetapet beregnes. Hvis sotfaktoren har blitt estimert er det mulig å foreta simuleringer for å finne siktlengder. Den belgiske standarden NBN 21-208-2:2006 og Merci & Tilley (60) har brukt den samme verdien som ble benyttet ved simuleringene i rapporten til ECSC (24), nemlig sotfaktor 0,22.

Sotfaktoren har veldig mye å si for siktforholdene. En høy sotfaktor, dvs. at det dannes mye sot, vil føre til dårlige siktforhold sammenlignet med en lavere sotfaktor. Dårligere siktforhold påvirker både rømning og slukking. På grunn av at akseptkriteriene for simuleringer oftest blir basert på kritisk verdi for siktlengde vil det være viktig at man ikke velger for lav sotfaktor. Når det kommer til røykventilasjon for røykkontroll i garasjer med hensyn til tilrettelegging for slukke- og redningsmannskap, er det lengden på tilbakestrømning av røykgasser som vil ha noe å si for dimensjoneringen av

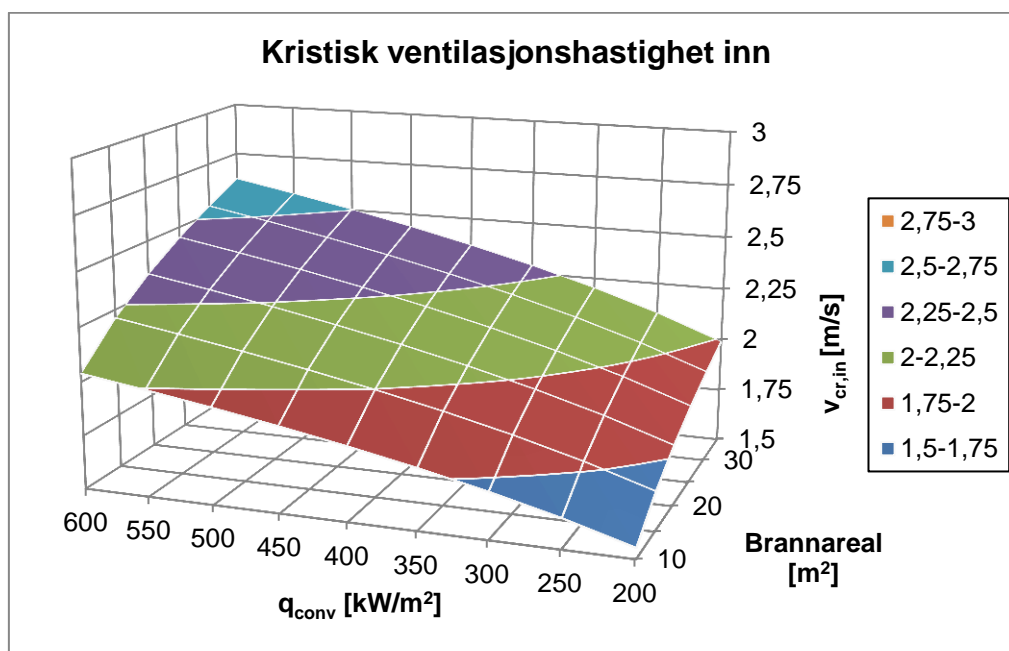


ventilasjonsanlegget. Hvis røyken begynner å spre seg i hele garasjen vil det uansett bli meget dårlig sikt i løpet av kort tid.

## 5.2 Ventilasjonshastighet

Ved å plote ligning (3.1) kan det på en grafisk måte illustreres hvordan den kritiske ventilasjonshastigheten varierer for forskjellige brannstørrelser, se Figur 5-6. Den kritiske ventilasjonshastigheten for tre designbranner er gitt i Tabell 5-1. Når det er snakk om så store branner som 10MW vil det kreves et meget stort ventilasjonssystem. Det vil derfor være hensiktsmessig å tillate en viss backlayering slik at kapasiteten til tilluft og avtrekk kan reduseres.

Det er ceiling jeten fra en brann som skyver røyken mot ventilasjonsretningen. For å stoppe den kreves det en minst like stor hastighet for å skyve røyken i riktig retningen. Ved å benytte jetvifter er det mulig å få en høyere hastighet nær taket der den trengs, slik at ceiling jet kan bremses tidligere, alternativt gjøre det mulig å redusere kapasiteten ytterligere til tilluft og avtrekk. Plassering og størrelse av jetviftene må tilpasses hvert prosjekt, prEN/TS12101-11:2012 angir noen generelle anbefalinger til plasser. Produsentene har også anbefalinger til effektiv kastlengde og bredde mellom viftene.



Figur 5-6 Kritisk (uniform) ventilasjonshastighet inn for å unngå tilbakestrømming av røyk. Figuren er en grafisk presentasjon av ligning (3.1)

Tabell 5-1 Kritisk ventilasjonshastighet oppgitt for tre designbranner med statiske verdier. Beregninger i hht ligning (3.1).

HRR	Brannareal	Kritisk ventilasjonshastighet
4 MW	10 m <sup>2</sup>	1,65 m/s
8 MW	25 m <sup>2</sup>	1,88 m/s
10 MW	37,5 m <sup>2</sup>	1,95 m/s



### 5.3 Simuleringer

Ingen av de presenterte artiklene har hatt branner av størrelsen 10 MW. Siden dette er designbrannen som bør benyttes når garasjen ikke er sprinklet bør det testes ut hvilke hastigheter og luftmengder det egentlig kreves. Artiklene som har impuls eller induksjonsvifter har ikke kommentert om hvordan dette påvirker tilbakestrømmingen av brannrøyk og kravet til ventilasjonshastighet. Det er heller ikke beskrevet om de simulerte viftene er verifisert mot målte data, artikkelen av Dexter et al (58) er et unntak. Det er stor kvalitetsforskjell på artiklene, noen er veldig detaljert i beskrivelsen av innstillinger og forutsetninger mens andre ikke er så detaljert. Zhang et al (56) virker ukritisk til resultatene fra simuleringene. At brannen vokser til 50MW i løpet av 12 minutter er usannsynlig. Spesielt siden flere forsøk har vist at dette er omtrent tiden det tar for brannen til å spre seg til bil nummer to. Slike ukritiske artikler burde ikke publiseres.

## 6 Uklarheter fra litteraturstudiet

Litteraturstudiet har blant annet avklart temaet designbranner. Det gjenstår fortsatt noen uklarheter.

- Ved simulering er det viktig å validere og verifisere modellen, dette gjelder særlig jetviftene. Det er ikke gjort/presentert i noen av artiklene.
- Effekten av biler i garasjen på backlayering har ikke blitt avklart. Jangi et al (42) beskrev i simuleringen med en bil ved siden brannen, at dette skapte kompliserte strømminger rundt bilen slik at backlayering økte.
- Branner av størrelsen 10MW er ikke beskrevet i noen av artiklene. Siden dette er designbrannen som bør brukes i en usprinklet garasje vil det være interessant å undersøke røykspredning og backlayering.
- Mange artikler beskriver at strålingsmodellen har vært deaktivert samt at det har vært benyttet adiabatisk flater. Valg av randbetingelse vil derfor undersøkes videre.

Disse uklarhetene vil det prøves å gi svar på i Del C – Simulering.



# Del B – Om CFD

Denne delen av oppgaven tar for seg grunnleggende fluiddynamikk og presenterer de matematiske modellene som benyttes av simuleringsverktøy. Delen er for den spesielt interesserte og ble skrevet for å skape en dypere forståelse av fluidsimulering og for å bedre kunne tolke og diskutere resultater. Turbulens er forklart i et eget avsnitt og underbygger videre diskusjon for simuleringene. Til slutt presenteres CFD-programmet FDS kort. Det er ikke gitt en fullstendig gjennomgang, men innstillinger som blir brukt senere blir kort redegjort for.

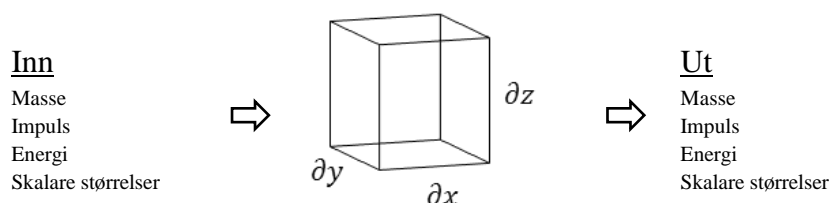
## 7 Numeriske metoder og grunnleggende fluid dynamikk

Navier-Stokes ligninger, eller bevegelsesligningene som de også kalles, er sett av differensialligninger som beskriver strømning av fluider. Sammen med ligninger for bevarelse av masse og energi utgjør de de fundamentale ligningene som skal løses ved simulering av strømning. Ligningene er utledet av de grunnleggende lovene fra fysikken og blir i følgende avsnitt presentert og kommentert nærmere. Ligningene blir først presentert på differensialform.

Navier-Stokes er et sett av andre ordens, ikke lineære, differensialligninger. Selv om ligningene ble utviklet på 1800-tallet finnes det fortsatt ikke en generell analytisk løsning av problemet. I praksis må ligningene løses numerisk. For å løse ligningene i en simulering, benyttes én av de følgende diskretiseringsmetodene for numerisk løsning: differansemetoden, elementmetoden, kontrollvolummetoden eller spektralmetoden. Elementmetoden og spektralmetoden vil ikke bli nærmere presentert. Ved bruk av differansemetoden løses ligningene på differensialform, mens de for elementmetoden og kontrollvolummetoden løses på integralform. Ved simulering av røyk- og brannspredning er volummetoden den mest hensiktsmessige (61), bevarelsesligningene vil derfor bli presentert på integralform helt til slutt.

Det finnes to forskjellige referansesystem som brukes ved simulering av strømning, Eulerisk og Lagrangsk. Et Eulerisk referansesystem er et fast punkt eller et fast volum i rommet og fluidet beveger seg i forhold til dette (62). Et Lagrangsk referansesystem følger en partikkel eller et volum (62). Dette benyttes for eksempel ved simulering eller beregning av partikkelbaner. I de fleste tilfeller benyttes et Eulerisk referansesystem, det er også dette som vil presenteres videre i oppgaven.

## 7.1 Bevarelsesligningene på differentialform



Figur 7-1 Illustrasjon av et kontrollvolum og de fire bevarelsesligningene

For å beskrive fluide strømminger trenger man fem bevarelsesligninger; bevarelse av masse, energi og tre ligninger for impuls. I tillegg, hvis man er interessert i for eksempel røyk og kjemiske reaksjoner (forbrenning), trengs ligninger som sørger for bevarelse av disse skalare størrelsene. Denne er en variant av ligningen for bevarelse av masse, men i stedet for en generell størrelse av massen inneholder denne informasjonen for hvert enkelt stoff. Disse seks ligningene blir presentert og kommentert på differensialform i dette avsnittet.

For å beskrive bevarelsesligningene kan det tas utgangspunkt i Reynolds transportteorem. Teoremet er beskrevet på sin mest generelle form med kontrollvolum-metoden i ligning (7.1). Formelen viser at forandring av egenskap/enhet  $B$  over tid er lik forandring av egenskap/enhet  $b$  i kontrollvolumet (cv) pluss netto fluks av egenskap/enheten  $\beta$  gjennom flatene (cs) på kontrollvolumet. (63)

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \beta \rho dV + \int_{cs} \beta \rho U dA \quad (7.1)$$

I følgende deler som omhandler bevarelsesligningene, er det tatt utgangspunkt i flere forskjellige kilder for å skape en forståelse for utledning og forenkling av bevarelsesligningene. Det er benyttet forskjellig notasjon i tillegg til forskjellige forenklinger i forskjellige kilder. Det er forsøkt å være konsekvent med tanke på notasjon.

### 7.1.1 Bevarelse av masse

Bevarelse av masse gjennom kontrollvolumet kan matematisk beskrives med kontinuitetsligningen, se ligning (7.2). Forandring av masse er lik netto transport av masse på grunn av konveksjon gjennom kontrollvolumet (64). Masse er skrevet som densitet i formlene, dette skyldes at formelen skal integreres over kontrollvolumet som resulterer i en masse.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (7.2)$$

Ligningen kan forenkles gjennom å skrive den med tensornotasjon, se formel (7.3). Videre i presentasjonen av bevarelsesligningene vil denne måten å skrive ligningene på bli presentert i tillegg.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j) = 0 \quad (7.3)$$

### 7.1.2 Bevarelse av impuls

Definisjonen på impuls er masse multiplisert med hastighet. Newtons andre lov sier at akselerasjonen til et legeme er proporsjonal med resultantkraften ( $F_{res}$ ) som virker på legemet, og omvendt proporsjonalt med massen ( $m$ ) til legemet, se formel (7.4). Akselerasjon er den tidsderiverte av hastighet. Loven sier altså at den tidsderiverte av impulsen er lik resultanten av krefter som virker på legemet.

$$\frac{\partial}{\partial t}(mU) = ma = F_{res} \quad (7.4)$$

Resultanten av krefter er en kombinasjon av normalkrefter og skjærkrefter som virker på kontrollvolumet. Disse kreftene er gravitasjon, trykk og viskøse krefter. Hvis vi tar utgangspunkt i ligning (7.4) kan bevarelse av impuls skrives på følgende måte i x-, y- og z-retning, se ligning (7.5),(7.6) og (7.7).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uu) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho wu) \\ = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \end{aligned} \quad (7.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho wv) \\ = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \end{aligned} \quad (7.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uw) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vw) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho ww) \\ = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \end{aligned} \quad (7.7)$$

Hvis vi sammenligner venstre side av ligningene med ligningen for bevarelse av masse, ligning (7.2), ser vi at den er identisk, men at hvert ledd er multiplisert med en hastighetsvektor (se også ligning (7.4)). På høyre side er kreftene som virker på kontrollvolumet. De forskjellige leddene på høyre side av ligningen, med start fra venstre er: trykk, viskøse skjærkrefter i tre retninger samt ytre krefter (slik som gravitasjon). De tre ligningene kan skrives på en forenklet måte hvis vi benytter oss av tensornotasjon, se ligning (7.8) (65).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i \quad (7.8)$$

De viskøse skjærspenningene ( $\tau_{ij}$  og  $\tau_{ii}$ ) på høyre side av ligningen må regnes ut ved hjelp av ligningene (7.9) og (7.10). Der  $\mu$  er den dynamiske viskositeten og  $\lambda$  er viskositeten som kobler spenninger med deformasjon av volumet. Dette andre

viskositetsleddet vet man lite om, Stokes hypotese som tilnærmer  $\lambda = -(2/3)\mu$  er ofte brukt og har vist seg å gi gode resultat (61).

$$\tau_{xy} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad \tau_{xz} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad \tau_{yz} = \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (7.9)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}$$

$$\tau_{xx} = \lambda D + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad \tau_{yy} = \lambda D + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad \tau_{zz} = \lambda D + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (7.10)$$

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

### 7.1.3 Bevarelse av energi

Bevarelse av energi er stort sett det samme som termodynamikkens første lov, energi kan ikke skapes eller forsvinne, bare transformeres til andre former. I et system er det flere mekanismer for energitransport. De tre største mekanismene er stråling, ledning og konveksjon. I tillegg til disse finnes det flere mindre ledd som kan tas med i beregningene.

Ved høye hastigheter kan fluidet deformeres av de viskøse skjærkreftene (61). Dette er en prosess som tar energi fra strømmingen og transformerer det til varme. Hvis systemet har lave hastigheter vil dette leddet være veldig lite i forhold til energikilder, slik som varmeavgivelse fra brannen. Det er derfor vanlig at dette energitapsleddet sløyfes (64). Det vil likevel presenteres, fordi dette energitapsleddet ( $\varphi$ ) er viktig for forståelsen av Smagorinskys sub-turbulensmodell som vil bli presentert senere. Leddet er presentert i ligning (7.14) og (7.15).

Det finnes flere måter å skrive bevarelsligningen for energi på, avhengig av hvilken variabel det er velgt å ta utgangspunkt i. En hensiktsmessig variabel er entalpi,  $h$ . I ligning (7.11) vises energiligningen, der  $\lambda$  er varmekonduktivet,  $c_p$  er spesifikk varmekapasitet ved konstant trykk og  $\dot{q}_i^R$  er varmestråling. (64)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u h) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v h) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w h) \\ &= \frac{\partial p}{\partial t} + \varphi + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial x} - \dot{q}_x^R \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial y} - \dot{q}_y^R \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial z} - \dot{q}_z^R \right) \end{aligned} \quad (7.11)$$

Total entalpi kan beregnes som vist i ligning (7.12), der  $c_p$  er spesifikk varmekapasitet ved konstant trykk,  $T$  er temperatur i kelvin,  $Y_\alpha$  er molfraksjon av stoff  $\alpha$  og  $H_r$  er reaksjonsentalpi. (64)

$$h = c_p T + \sum Y_\alpha H_\alpha \quad (7.12)$$

Energiligningen med tensor notasjon er vist i ligning (7.13). De forskjellige leddene i ligningen beskriver følgende med start fra venstre: forandring av lagret energi i volumet og netto energitransport på grunn av konveksjon. På høyre side av ligningen med start fra venstre er det utført arbeid på grunn av trykk og netto energitransport på grunn av ledning og stråling.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h) = \frac{\partial p}{\partial t} + \varphi + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial x_j} - \dot{q}_j^R \right) \quad (7.13)$$

Dissipasjonsleddet ( $\varphi$ ) som er nevnt tidligere beskriver hvordan kinetisk energi blir til termisk energi (66) på grunn av viskositeten. Leddet er vist i ligning (7.14).

$$\begin{aligned} \varphi = & \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yy})}{\partial y} \\ & + \frac{\partial(u\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zz})}{\partial z} \end{aligned} \quad (7.14)$$

Som beskrevet i ligningene for bevarelse av moment kan skjærspenningene forenkles og skrives ut med viskositet og hastighetsvektorer, se ligning (7.9) og (7.10). Ved å benytte denne skrivemåten kan dissipasjonsleddet ( $\varphi$ ) skrives på følgende måte når det dynamiske viskositetsleddet er flyttet ut av parentesen (66).

$$\begin{aligned} \varphi = \mu \left[ 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right. \\ \left. + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (7.15)$$

#### 7.1.4 Bevarelse av skalare størrelser/kjemiske stoffer

For simulering av strømning og varmetransport er det nok med bevarelseligningene som er presentert til nå. Hvis vi er interessert i brannsimulering må vi ta med en supplerende bevarelseligning for skalare størrelser, eller mer spesifikt kjemiske stoffer. Økning av stoff  $\alpha$  i kontrollvolumet skal være lik netto transport inn og netto produksjon av stoffet i kontrollvolumet. Bevarelseligningen for kjemiske stoffer er presentert som ligning (7.16). (64) (61)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_\alpha) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Y_\alpha) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v Y_\alpha) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w Y_\alpha) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho D \frac{\partial Y_\alpha}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho D \frac{\partial Y_\alpha}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho D \frac{\partial Y_\alpha}{\partial z} \right) + S_\alpha \end{aligned} \quad (7.16)$$

Med tensor notasjon er den samme ligningen presentert i ligning (7.17). Med start fra venstre side er de forskjellige leddene følgende: netto forandring av mengde av stoff  $\alpha$ , netto transport på stoff  $\alpha$  på grunn av konveksjon, netto forandring av stoff  $\alpha$  på grunn av molekylær diffusjon og til slutt et produksjonsledd. Produksjonsleddet beskriver netto

forandring av stoff  $\alpha$  som skyldes eksempelvis produksjon eller forbruk av stoffet med kjemiske reaksjoner.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_\alpha) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j Y_\alpha) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho D \frac{\partial Y_\alpha}{\partial x_j} \right) + S_\alpha \quad (7.17)$$

### 7.1.5 Tilstandsligninger

Ved å se på de opprinnelige fem bevarelseligningene, masse, energi og de tre for impuls, så har vi totalt 16 ukjente variabler. For å kunne lukke ligningssystemet kreves det noen antakelser, disse er kort presentert i følgende liste. (65)

- Ideell gass, trykket er direkte proporsjonalt med densitet og temperatur.

$$P = \rho RT \quad (7.18)$$

- Newtonsk fluid, skjærspenningen er lineært proporsjonal med hastighetsgradienten

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad i \neq j \quad (7.19)$$

- I det andre viskositetsleddet,  $\lambda$ , i skjærspenningsligningene, som er en del av impulslikningene, benyttes Stokes hypotese. Sammenlign med likningene i (7.10).

$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu \Rightarrow \tau_{ii} = -\frac{2}{3}\mu D + 2\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (7.20)$$

- Fouriers lov (varmeledningsloven) gjelder. Der  $k$  er varmekonduktiviteten og  $\nabla T$  er temperaturgradienten. Varmekonduktiviteten er isotrop (lik i alle retninger).

$$\vec{q} = -k\nabla T \quad (7.21)$$

- Indre energi ( $e$ ) er en funksjon av trykk ( $p$ ) og temperatur ( $T$ ).

$$e = e(p, T) \quad (7.22)$$

- For luft er forholdstallet,  $\gamma$ , mellom spesifikk varmekapasitet ved konstant trykk ( $c_p$ ) og konstant volum ( $c_v$ ) konstant.

$$e = \frac{1}{1 - \gamma} \frac{p}{\rho} \quad (7.23)$$

Det er fortsatt mange ukjente variabler i bevarelseligningene. For å kunne løse settet med ligninger kreves det initial- og randbetingelser. Valget av disse betingelsene vil ha stor innvirkning på det endelige resultatet (61).

### 7.1.6 Generell form – Transportlikningen

Hvis vi sammenligner de fire bevarelseligningene som er presentert så er de relativt like. Ved å innføre en generell variabel,  $\phi$ , kan alle likningene skrives på følgende måte, se ligning (7.24). Ligningen kalles for den generelle transportlikningen. Ligningen viser de forskjellige transportprosessene i fluid strømming. (61)



$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\phi) \\ &= \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\rho\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\rho\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial z}\right) + S_\phi \end{aligned} \quad (7.24)$$

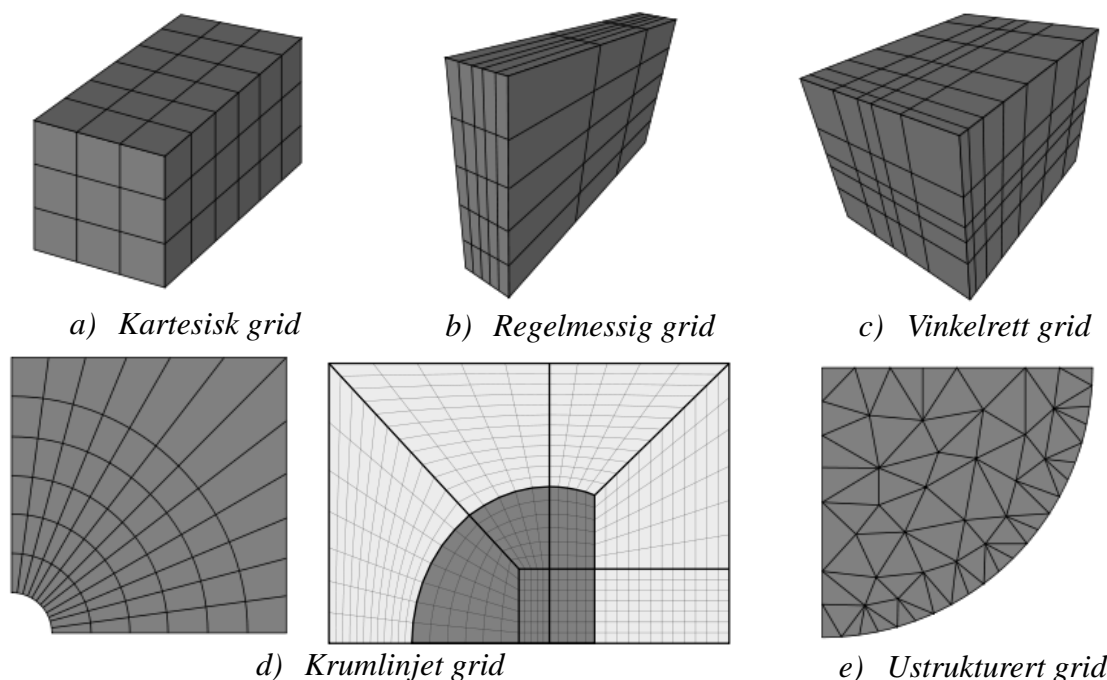
De forskjellige leddene i ligningen er med start fra venstre: tids variasjon, konveksjon, gradient diffusjon og til slutt et kildeledd. Kildeleddet representerer de delene av bevarelsesligningene som ikke er representert med de andre leddene. (65)

## 7.2 Diskretisering for feltmodellering

Den fysiske modellen må deles opp i et endelig antall punkter eller kontrollvolum for å gjøre det mulig å løse problemet numerisk. Denne inndelingen kalles diskretisering. Det finnes fire diskretiseringsmetoder som benyttes i CFD-simuleringer; differansemetoden, kontrollvolummetoden, elementmetoden og spektralmetoden. Differansemetoden og kontrollvolummetoden blir nærmere beskrevet i henholdsvis avsnitt 7.2.3 og 7.2.4.

Ved diskretiseringen av beregningsdomenet får vi et beregningsgrid. I stedet for ordet beregningsgrid, benyttes også uttrykkene grid eller mesh. Kontrollvolumene kalles celler og vil bli nærmere beskrevet senere i oppgaven. Størrelsene på disse kontrollvolumene refereres som gridstørrelse. Forskjellige typer grid blir presentert i neste avsnitt.

### 7.2.1 Grid



**Figur 7-2** Forskjellige typer grid. Figurene er hentet fra (67)

Det skiller mellom fem vanlige gridtyper, de er presentert i Figur 7-2. De forskjellige typene grid kan deles inn i to kategorier, strukturert og ustrukturert grid (61). I Figur 7-2 er grid *a* til *d* de strukturerte gridene og grid *e* er den ustrukturerte.

Kartesisk, regelmessig og vinkelrett grid er enkle å implementere og er beregningsmessig meget effektive, men de har begrenset anvendelse på grunn av at geometrien må tilpasses

til griden. Krumlinjet grid kan benyttes på mer komplekse geometrier, men det er en tidskrevende prosess å generere gridet. Ustrukturert grid kan benyttes til alle typer komplekse geometrier og genereringen av griden er rask. De kommersielle CFD-programmene støtter oftest flere av disse typene. (65)

Yeoh og Yuen (61) definerer strukturerte grid som at de har celler med regelmessig geometri og fire knutepunkter i to dimensjoner, eller heksaederformede celler (eks. kube) med åtte knutepunkter i tre dimensjoner. Definisjonen på ustrukturert grid er celler i form av en triangel med tre knutepunkt i to dimensjoner, eller tetraederformede celler (eks. pyramide) med fem knutepunkt i tre dimensjoner.

### **7.2.2 Numeriske metoder**

For numerisk løsning av partielle differensialligninger må det benyttes numeriske metoder. Det skilles mellom to hovedtyper, implisitt- og eksplisitte metoder. Eksplisitte metoder forutser verdiene i neste tidsskritt ut fra informasjonen i gjeldende tid. Implisitte metoder forutser neste tidsskritt ved å benytte informasjonen både fra neste tidsskritt og det nåværende tidsskittet.

Eksempel på eksplisitte metoder er Forward Euler, sentral-differanse og Crank-Nicolson. Av disse så er Forward Euler av første orden mens sentraldifferanse og Crank-Nicolson er av andre orden. Høyere ordens metoder er mer krevende beregningsmessig men gir et mer nøyaktig resultat. Et eksempel på en første ordens implisitt metode er Backward Euler. (68)

Ved å bruke en eksplisitt metode trenger man ikke og løse et ligningssystem som er tilfelle med implisitte metoder. De eksplisitte metodene er betinget stabil, slik at det kreves små tidsskritt for et godt resultat. Med de implisitte metodene er det mulig å ta lengre tidsskritt uten numerisk instabilitet.

### **7.2.3 Differansemetoden**

Metoden krever et regelmessig grid og egner seg derfor best for de strukturerte gridene (61). Differansemetoden ble utviklet av Euler for å løse partielle differensialligninger. De partiellderiverte elementene fra bevarelsesligningene estimeres med differansemetoden. Differansen kan estimeres med forskjellige numeriske metoder, både implisitte og eksplisitte.

### **7.2.4 Kontrollvolummetoden**

Kontrollvolummetoden kan håndtere vilkårlige geometrier og benytte så vel strukturert som ustrukturert grid (61). Metoden er godt egnet for strømningsproblem og er ifølge Crowe et al. (62) den mest brukte for denne type problemer. Med metoden integreres så bevarelsesligningene direkte over et kontrollvolum noe som gjør det mulig å løse differensialligningene. Integrering av den generelle formen av transportligningen (ligning (7.24) over et volum,  $V$ , er gitt i ligning (7.25).

$$\begin{aligned}
\int_V \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_V \left\{ \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} \right\} dV \\
= \int_V \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial z} \right] \right\} dV \\
+ \int_V S_\phi dV
\end{aligned} \tag{7.25}$$

Ved å benytte Gauss' divergensteorem kan antallet volumintegral reduseres og vi får ligning (7.25). (65) (61)

$$\begin{aligned}
\int_V \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_A \{ (\rho u)\phi \cdot dA^x + (\rho v)\phi \cdot dA^y + (\rho z)\phi \cdot dA^z \} \\
= \int_A \left\{ \left[ \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x} \right] dA^x + \left[ \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y} \right] dA^y + \left[ \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial z} \right] dA^z \right\} \\
+ \int_V S_\phi dV
\end{aligned} \tag{7.26}$$

De fire leddene på med start fra venstre beskriver transient forandring i volumet, konveksjon gjennom flatene på volumet, diffusjon gjennom flatene og volumet, og skapelse/forbruk i volumet. (69)

## 8 Turbulens

Ved tilstrekkelig lave Reynoldstall kan viskøse strømninger beregnes med enkle bevegelsesligninger, denne type strømning kalles laminær. Her dominerer de viskøse kreftene. Ved høyere Reynoldstall tar treghetskreftene over og den laminære strømningen blir ustabil. Raske variasjoner i hastighet og trykk fører til en ustabil strømning som virvler i alle tre dimensjoner (70). Strømningen beskrives nå som turbulent. Det finnes ikke noen eksakt grense for når en laminær strømning går over til turbulent strømning, dette varierer for type fluid, omgivelser, osv.

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{\text{treghetskrefter}}{\text{viskøse krefter}} \quad (8.1)$$

Turbulens er et meget komplekst tema som kan beskrives med Navier Stokes ligninger. Praktisk sett så er det ofte en utfordring å løse disse turbulente strømningene for et stort system, for eksempel røyk- og varmespredning i et brannrom, på grunn av beregningskapasiteten som kreves. I stedet for å prøve å løse ligningene analytisk forenkles ofte virkeligheten med matematiske modeller med forskjellige grader av nøyaktighet. Det kommer derfor til å bli presentert de vanligste måtene å beregne turbulens på ved feltmodellering med CFD.

### 8.1 Generelt

Det finnes flere forskjellige definisjoner på fenomenet turbulens som har blitt mer presist etterhvert som forståelsen har økt. Rubini (65) gjengir følgende definisjon fra «*An introduction to turbulence and its measurements*», Bradshaw (1974).

*«Turbulence is a three dimensional time-dependent motion in which vortex stretching causes velocity fluctuations to spread to all wavelengths between a minimum determined by viscous forces and a maximum determined by the boundary conditions of the flow. It is the usual state of fluid except at low Reynolds numbers.»*

Definisjonen er kort men forklarer mye av det som ligger i begrepet turbulens. Videre vil noen av de viktigste karakteristika av turbulens bli kort forklart.

- Instabil og ikke-lineær

Turbulens dannes på grunn av instabiliteter i lineære strømninger. Overgangen mellom lineær- og turbulent strømning kan ikke beregnes eksakt og inntreffer ved forskjellige Reynoldstall selv ved like randbetingelser. Grunnen til at dette ikke kan forutses eksakt, skyldes at Navier-Stokes ligninger er et sett av ikke-lineære ligninger. For en viskøs fluid kan ustabilitetene som skaper de turbulente strømningene, knyttes til samspillet mellom de ikke-lineære treghetsleddene og de viskøse leddene. Samspillet er meget komplekst siden strømningen roterer i tre dimensjoner og er tidsavhengig. (70)

- Dissipativ

En av Kolmogorovs sentrale teorier er hypotesen om at det ved turbulens med høye Reynoldstall dannes virvler med et stort spektrum av størrelser (70). De aller

største virvlene overfører energien til de noe mindre virvlene, som i sin tur overfører til enda mindre virvler. Dette fortsetter helt til de viskøse kreftene får den kinetiske energien til å transformeres til termisk energi. Hvis det ikke fortsetter å tilføres energi til systemet vil det bremses opp og den kinetiske energien vil gå over fullstendig til termisk energi.

- Tredimensjonale rotasjoner med fluktuasjoner

Overføringen av energi fra de større til de mindre virvlene skyldes et fenomen som kalles «vortex stretching». Når en virvel i stor grad er på linje med hovedretningen på strømmingen vil den bli strukket, dette tilfører kinetisk energi til turbulensen. Denne overføringen av energi er størst i de store virvlene, derfor er de mest energirike og påvirker strømmingen mest. Virvlene overlapper hverandre og det eksisterer mindre virvler inne i større virvler. Disse blir strukket av de større virvlene som overfører energi til mindre og mindre virvler. Dette fortsetter helt ned til virvelstørrelsene der den kinetiske energien avledes til termisk energi (Kolmogorov micro scale). (70)

Virvler har relativt lang levetid og kan transporteres opp til 30 ganger så langt som sin egen størrelse. Dette fører til at turbulensen i et punkt er avhengig av hva som har skjedd lengre opp i strømmingen og kan ikke bare beskrives lokalt. (70)

- Diffusiv

På grunn av de raske fluktusjonene i turbulens skjer det rask blanding av varme, masse og impuls. Dette er kanskje den viktigste egenskapen til turbulens som blir utnyttet innen mange fagfelt. For eksempel i motorer er det gunstig med mye turbulens som kan blande brensel og luft for mer effektiv forbrenning. (65)

- Kontinuum

Turbulens følger naturlovene som beskriver fluidmekanikk. Selv de aller minste virvlene er mye større sammenlignet med molekyler og vil derfor følge naturlovene.

## 8.2 Karakteristiske størrelser

Med utgangspunkt i Kolmogorovs hypotese om at det vil dannes et stort spekter av virvler med forskjellige størrelser ved høye Reynoldstall, kan det gjøres en spektralanalyse av en turbulent strømming. Fra denne spektralanalysen kan det tegnes en graf over frekvensspektrumet og innholdet av turbulent kinetisk energi  $E(\kappa)$  (70), se Figur 8-1. Der x-aksen er bølgetall,  $\kappa$ , som er omvendt proporsjonalt med bølgelengden, og y-aksen er innholdet av turbulent kinetisk energi for tilsvarende bølgetall. Bølgelengden representerer størrelsen på virvlene, slik at store virvler med store bølgelengder (små bølgetall) har mye energi og små virvler med korte bølgelengder har lite energi.

De mindre virvlene får tilført turbulent kinetisk energi ( $k$ ) fra de større virvler, som i sin tur gir energi til enda mindre virvler. Dette fortsetter helt ned til de minste virvlene, der energien til slutt overgår fra kinetisk energi til termisk energi på grunn av de viskøse kreftene (70). Størrelsen på de aller minste virvlene som eksisterer, kalles for

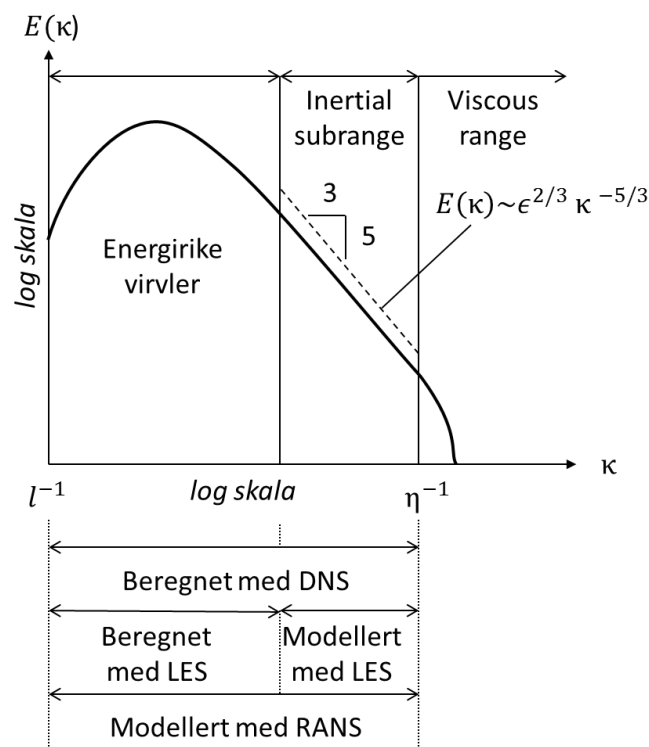
Kolmogorovs microscale,  $\eta$ . Kolmogorov microscale, kan beregnes ut fra definisjonen på Reynoldstall ( $Re$ ), se ligning (8.2), når Reynoldstallet er lik 1 (65).

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \xrightarrow{Re=1} L = \eta = \frac{\mu}{\rho v} \quad (8.2)$$

Størrelsen på de minste virvlene er avhengig av viskositeten. En væske med høy viskositet, for eksempel olje, vil ikke ha like små virvler som en væske med relativt lav viskositet, for eksempel luft. Dette gjør at turbulens i en væske med høy viskositet bremses raskere sammenlignet med en væske med lav viskositet.

De aller minste virvlene, der dissipasjonen skjer, ligger i området som benevnes «dissipation range» eller «viscous range». Størrelsen på de aller største virvlene betegnes med bokstaven  $l$ , og er begrenset av randbetingelsene, for eksempel veggene i et rør eller veggene i et rom. Disse store virvlene ligger i det som kalles «integral scale». Mellom disse to områdene ligger det som kalles «inertial range». Kolmogorow presenterte en teori om at energitransporten i «inertial range» domineres av treghetskraftene, slik at innholdet av turbulent kinetisk energi,  $E(\kappa)$  kun er avhengig av dissipasjonshastigheten  $\epsilon$  og bølgenummeret  $\kappa$ . Kolmogorov presenterte på bakgrunn av dette det som kalles «Kolmogorovs -5/3 lov», se ligning (8.3). Der  $C_K$  er Kolmogorovs konstant. (70)

$$E(\kappa) = C_K \epsilon^{2/3} \kappa^{-5/3} \quad (8.3)$$



**Figur 8-1 Energispektrum for turbulent strømning.**

Figuren er lagd ut fra informasjon og delvis lignende figurer fra Wilcox (70) og Rubini (65)

## 8.3 Turbulenssimulering

Turbulens er tredimensjonal og tidsavhengig. For å beskrive dette fullstendig kreves det store mengder data. Det vil derfor som oftest være nødvendig å forenkle virkeligheten med modeller. Det skiller generelt mellom tre forskjellige metoder for å simulere og beregne røyk og varmespredning fra en brann. Metodene har forskjellig grad av nøyaktighet noe som også vises i hvor tidskrevende simuleringene er. De enkelte metodene som er aktuelle i forbindelse med brannsimulering er DNS, LES og RANS. Direct Numerical Simulation (DNS) beregner en eksakt løsning av Navier Stokes og bevarelseligningene for alle størrelser på virvlene, uten behov for en sub-turbulensmodell. Denne fremgangsmåten er meget tung beregningsmessig og egner seg ikke for større strømningsproblem. Large Eddy Simulation (LES) i sin tur beregner også en direkte løsning for de tilpassede bevarelseligningene, men kun for de større, energirike virvlene. De mindre virvlene modelleres med en sub-grid-modell. Denne fremgangsmåten krever mye mindre beregningskapasitet. Modellen som har vært brukt lengst er RANS, Reynolds Averaged Navier Stokes equations. Ved RANS forenkles strømmingen til en gjennomsnittlig verdi og en fluktuerende verdi. I de neste avsnittene vil DNS, LES og RANS bli beskrevet. Siden LES er det som kommer til å benyttes senere i simuleringene med FDS vil denne metoden bli beskrevet mer inngående enn de andre.

Det finnes noen nye metoder som kan være aktuelle å benytte i fremtiden, men de er ikke benyttet i programmene som har vært aktuelle i denne oppgaven. En av disse metodene er DES, Detached Eddy Simulation, der LES benyttes for de større virvlene og RANS benyttes nær grenseflater (70). «Finite Pointset Method» er en annen, relativt ny metode som blant annet er implementert i CFD-programvaren Meshless (71). Beregningsdomenet diskretiseres ikke i et grid for å løses med elementmetoden eller kontrollvolummetoden. Isteden benyttes det kun punkter som beregningene gjøres på.

### 8.3.1 DNS – Direct Numerical Simulation

Ved å bruke et meget fint grid er det mulig å benytte seg av DNS – Direct Numerical Simulation. Denne metoden er den mest nøyaktige fordi den løser bevaringsligningene uten bruk av forenklinger. På grunn av at metoden ikke benytter forenklinger er det heller ikke behov for en turbulensmodell for å forutsi de små turbulensvirvlene. For å få et godt resultat kreves det at størrelsen på griden er mindre enn de minste turbulensvirvlene. Størrelsen på de minste turbulensvirvlene er det samme som Kolmogorovs microscale,  $\eta$ , denne angir virvelstørrelsen på de aller minste virvlene der den kinetiske energien blir bremsset av de viskøse kreftene og overgår til termisk energi, se Figur 8-1.

Kolmogorov micro scale er presentert i ligning (8.1). For å illustrere gridstørrelsen som trengs for en DNS simulering kan vi benytte verdier for luft. Typiske verdier for romtemperert luft vil være, densitet,  $\rho = 1 \text{ kg/m}^3$  og dynamisk viskositet,  $\mu = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ms}$ . En lufthastighet ( $U$ ) på 10 m/s krever derfor en gridstørrelse i størrelsesorden  $10^{-6}$  m for å muliggjøre simulering med DNS. Med en så liten gridstørrelse er simulering av brann i bygninger upraktisk og krever ekstrem datakraft. Det er derfor utviklet forenklete beregningsmodeller, to av disse er RANS og LES. Disse blir nærmere beskrevet i de to følgende avsnittene.

### 8.3.2 LES – Large Eddy Simulation

Ved å bruke Large Eddy Simulation, LES, beregnes de større turbulensvirvlene mens de mindre virvlene modelleres, se Figur 8-1. Wilcox (70) forklarer grunnen til dette på følgende måte. De større og mer energirike virvlene påvirkes direkte av randbetingelsene og bidrar mest til Reynolds-skjærspenningene. De må derfor beregnes. De mindre virvlene er svakere og bidrar mindre til Reynolds-skjærspenningene og er derfor ikke like kritiske som de store virvlene og kan derfor modelleres. Det er kun de store virvlene som viser retningen på strømmingen, mens de mindre virvlene er mer kaotiske, har mindre energi og påvirker ikke retningen på strømmingen. Modellering av de mindre virvlene viser kun hvordan de mindre virvlene påvirker de større virvlene i form av bremsing av systemet, de har ikke noe å si for retning. Det finnes flere definisjoner på LES. Popes kriterie for oppløsningen på simuleringen sier at minst 80% av den kinetiske energien skal beregnes direkte, resterende 20% modelleres (72) (55) (73).

Ved å simulere på denne måten er det mulig å gjøre store besparelser i med hensyn til beregningstid. En sammenligning mellom en DNS og LES simulering som gjengis av Wilcox (70) var beregningstiden for LES bare 2% av den for DNS og krevde kun 3% av antallet gridpunkter. Resultatet fra de to simuleringene var likevel like bra, i forhold til de fysiske målte resultatene.

#### Beregningsmetodikk

For videre å forklare forskjellen mellom DNS og LES, må prosessen med å skille det som skal beregnes fra det som skal modelleres forklares. Prosessen eller fremgangsmåten kalles filtrering (70) og kan være veldig kompleks. Størrelsen på filteret angis med  $\Delta$  og trenger ikke å være det samme som gridstørrelsen,  $h$ . Resultatet av filteret skal være en oppdeling som vises i ligning (8.4), der  $\phi_i$  er variabelen i det turbulente vektorfeltet,  $\phi'_i$  er subgrid-scale delen og  $\bar{\phi}_i$  er delen som løses direkte.

$$\phi_i = \bar{\phi}_i + \phi'_i \quad (8.4)$$

Det finnes mange forskjellige varianter av matematiske filter, det enkleste av disse er «volume-average box filter» som også kalles «grid filter» eller bare «box filter». Det første er benyttet av Deardorff (74) og er vist i ligning (8.5). Eksemplet med «box filter» viser hvordan hastigheten som tilsvarer de store virvlene,  $\bar{u}_i$  blir funnet ved en form for midling av det turbulente hastighetsfeltet i en boks.  $\xi, \eta$  og  $\zeta$  er variabler som representerer  $x, y$  og  $z$ .  $\Delta x \Delta y$  og  $\Delta z$  er filterstørrelsen (74). Ifølge Deardorff (74) er virvlene som er mindre enn griden nesten helt filtrert ut når dette filteret blir brukt.

$$\begin{aligned} \bar{u}_i(x, y, z, t) \\ = \frac{1}{\Delta x \Delta y \Delta z} \int_{x-\frac{1}{2}\Delta x}^{x+\frac{1}{2}\Delta x} \int_{y-\frac{1}{2}\Delta y}^{y+\frac{1}{2}\Delta y} \int_{z-\frac{1}{2}\Delta z}^{z+\frac{1}{2}\Delta z} u_i(\xi, \eta, \zeta, t) d\xi d\eta d\zeta \end{aligned} \quad (8.5)$$

I utgangspunktet er filtreringsprosessen i LES meget tung. McDermott (75) viser til eldre forsøk av Ghosalder, der resultatet viste at det ved andre ordens eksplisitt interpolering krevdes et forholdstall mellom filter- og gridstørrelse på  $\Delta/h \geq 8$  for at de numeriske feilene skulle være mindre enn 10%. Ifølge McDermott har det vist seg at det er mulig å benytte implisitt filtrering ( $\Delta = h$ ) hvis strømmingen statistisk sett er stasjonær eller svakt statistisk transient og to kriterier er oppfylt. De to kriteriene er at de numeriske metodene



skal bevare kinetisk energi og konvergerer når gridstørrelsen  $h$  går mot null. Den typen strømning som det er mulig å benytte implisitt filtrering på er utbredt i mange praktiske bruksområder, blant annet simulering av røyk- og varmespredning for brann. (75) Fremgangsmåten med implisitt filtrering er også den mest brukte innenfor LES simulering (76).

I den videre forklaringen tas det utgangspunkt i Navier-Stokes ligninger for inkompressible strømninger på tensor-notasjon som er beskrevet i ligning (7.8). Ved å dividere høyre og venstre side med densiteten( $\rho$ ) kan det viskøse kraftleddet skrives med kinematisk viskositet ( $\nu = \mu/\rho$ ). Dette er vist i ligning (8.6).

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{f_i}{\rho} \quad (8.6)$$

Ved å erstatte  $u_i$  med  $\bar{u}_i + u'_i$  i kontinuitetsligningen og Navier-Stokes ligninger blir resultatet som i ligning (8.7) og (8.8). Streken over viser at variabelen eller hastighetsvektoren den inneholder er filtrert. Den videre forklaringen er hentet fra «*Turbulence Modeling for CFD*», Wilcox 2006 (70).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (8.7)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{f_i}{\rho} \quad (8.8)$$

Det konvektive transportleddet i ligningen skrives på følgende måte (70):

$$\begin{aligned} \overline{u_i u_j} &= \bar{u}_i \bar{u}_j + L_{ij} + C_{ij} + R_{ij} \\ L_{ij} &= \overline{\bar{u}_i \bar{u}_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j & C_{ij} &= \overline{\bar{u}_i u'_j} - \bar{u}'_i \bar{u}_j & R_{ij} &= \overline{u'_i u'_j} \end{aligned} \quad (8.9)$$

Leddene  $L_{ij}$ ,  $C_{ij}$  og  $R_{ij}$  heter henholdsvis Leonard stress, cross-term stress og SGS Reynolds stress. En viktig forskjell mellom vanlig midling og filtrering som Wilcox (70) påpeker er at den andre filtreringen vil gi et annet resultat sammenlignet med den første simuleringen, det vil si  $\bar{\bar{u}}_i \neq \bar{u}_i$ .

Ved å sette ligning (8.9) inn i (8.8) kan Navier Stokes ligninger skrives som vist i ligning (8.10). Leonard spenningene løses indirekte siden det er vist at disse er i størrelsesorden like stor som trunkeringsfeilen (70). Merk at ligningen nå har et ekstra ledd  $\tau_{ij}$ . Leddet er de viskøse skjærspenningene i subgrid-scale som vil bremse de større virvlene i beregningen. Leddet består av både cross-term stresses og SGS Reynolds stresses. Beregningen av trykk gjøres også med disse spenningene.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \tau_{ij} \right) + \frac{f_i}{\rho} \quad (8.10)$$

Der  $\tau_{ij}$ ,  $P$  og  $Q_{ij}$  er gitt av følgende uttrykk

$$\begin{cases} \tau_{ij} = -\left(Q_{ij} - \frac{1}{3}Q_{kk}\delta_{ij}\right) \\ P = \bar{p} + \frac{1}{3}\rho Q_{kk}\delta_{ij} \\ Q_{ij} = R_{ij} + C_{ij} \end{cases} \quad (8.11)$$

For å løse dette ligningssettet må det benyttes modeller for å forutsi hvordan de mindre SGS-virvlene påvirker de store. Disse modellene betegnes som subgrid modeller og vil bli presentert i neste avsnitt.

### Sub-gridmodeller

Forklaringen til nå har vært generell og er lik eller lignende i de fleste LES program. I den videre forklaringen av subgrid-turbulensmodellene vil det tas utgangspunkt i modellene som blir benyttet av CFD programvaren Fire Dynamics Simulator 5.

Den matematiske modellen forklares på følgende måte i FDS Technical Reference Guide, voll 1 (66). Som det tidligere har blitt forklart er det kun de store virvlene som beregnes direkte ved LES-simulering. Turbulensvirvlene som er mindre enn gridet og de dissipative prosessene (viskositet, termisk konduktivitet, diffusivitet) i subgrid-scale modelleres. I denne modelleringen så er det ikke mulig å benytte de samme generelle parameterne som ble benyttet for de store, energirike virvlene. I stedet må parameterne i de dissipative prosessene erstattes med ligninger som beskriver hvordan de påvirker de tilnærmede bevarelsesligningene (66).

#### Smagorinskys SGS modell

Joseph Smagorinsky (77) var den første som la frem en modell for å simulere SGS-spenningene som tidligere beskrevet. Modellen antar at SGS-spenningene følger en «gradient-diffusion process» og forutsetter at energiproduksjon og -dissipasjon er i balanse (78). For å forklare hvordan modellen drar energi fra de store virvlene tar vi utgangspunktet i dissipasjonsleddet som ble gitt i ligning (7.15). Ligning (7.15) på tensornotasjon er gitt i ligning (8.12) (66).

$$\begin{aligned} \varphi &= \mu \left( 2S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3}(\Delta \cdot u_i)^2 \right) \\ S_{ij} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \end{aligned} \quad (8.12)$$

Ved å sammenligne ligning (8.12) med Smagorinskys ligning for å estimere viskositeten  $\mu_T$  (se ligning (8.13)) ser vi likhetene mellom utregningene. Merk at streken over variablene betyr at de er filtrerte verdier.  $C_s$  (Smagorinsky-tallet) er en konstant som beskriver diffusiviteten i den turbulente strømmingen.

$$\mu_T = \rho(C_s\Delta)^2 \left( 2\bar{S}_{ij} \cdot \bar{S}_{ij} - \frac{2}{3}(\Delta \cdot \bar{u}_i)^2 \right)^{1/2} \quad (8.13)$$

Siden Smagorinsky estimerete at subgrid-scale-spenningene følger en «gradient diffusion process» kan skjærspenningene skrives på følgende måte, se ligning (8.14).

$$\tau_{ij} = 2 \frac{\mu_T}{\rho} \bar{S}_{ij} = 2\nu_T \bar{S}_{ij} \quad (8.14)$$

For å benytte Smagorinskys modell må konstanten  $C_s$  estimeres. Ifølge Wilcox (70) varierer tallet for forskjellige type strømninger og det varierer også lokalt. For å få korrekt resultat er det derfor nødvendig å kalibrere beregningene mot målte data for hver type strømning. Wilcox (70) refererer til Rogallo og Moin (1984) som angir at  $C_s$  ofte er intervallet 0,10 til 0,24. Germano (78) skriver at konstant verdi på Smagorinsky tallet har vist tilfredsstillende resultat for simulering i stor skala der grensesjiktet ikke har høy oppløsning.

I FDS Technical Reference Guide vol 1 (66) beskrives det at de beste resultatene har vist seg å være når  $C_s$  er satt så lavt som mulig for å unngå for stor demping med artifiisiell viskositet. Likevel angir guiden at  $C_s = 0,2$  er funnet å stemme bra overens med virkeligheten for brannsimulering med FDS. Dette er også standardverdien i programmet (66).

For å finne parameterne for termisk konduktivitet og diffusivitet benyttes følgende utregninger i FDS5. (66)

$$k_{les} = \frac{\mu_T c_p}{Pr} \quad (8.15)$$

$$(\rho D)_{LES} = \frac{\mu_T}{Sc} \quad (8.16)$$

Det er tatt utgangspunkt i Prandtl-nummeret ( $Pr$ ) og Schmidt-nummeret ( $Sc$ ). De er vist i henholdsvis ligning (8.17) og (8.18). Basert på forsøk er  $Pr$  og  $Sc$  satt til den konstante verdien 0,5 i FDS5 (66).

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{\text{viskøs diffusjonshastighet}}{\text{termisk diffusjonshastighet}} \quad (8.17)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} = \frac{\mu}{\rho D} = \frac{\text{viskøs diffusjonshastighet}}{\text{molekylær diffusjonshastighet}} \quad (8.18)$$

#### *Dynamisk Smagorinsky SGS-modell*

Selv om bruken av en konstant verdi på Smagorinsky-tallet er mest utbredt så finnes det ulemper. Germano et al. (78) skriver at simuleringer med konstant Smagorinskyverdi ikke kan representere turbulens i roterende- eller skjærstrømninger, nære vegger eller der det er store gradienter. Germano et al. utviklet i stedet det som kalles for Dynamic Smagorinsky subgrid-scale model. I den dynamiske modellen beregnes Smagorinskykonstanten dynamisk for og bedre tilpasses til de lokale strømningene. Modellen baseres på forholdet mellom de beregnede turbulente skjærspenningene og SGS- skjærspenningene. Forholdet blir funne ved å benytte seg av to filtre, et filter på størrelsen av gridcellen og et test-filter som er mye større enn gridcellen. (78)

En annen fordel med den dynamiske modellen sammenlignet med den konstante, er at LES-simuleringen konvergerer med DNS når  $\Delta = \eta$ . For modellen med konstant  $C_s$  vil det alltid være noe turbulent viskositet igjen, feilen kan ikke bli mindre enn 4% ( $C_s^2 =$

$0,2^2 = 0,04$ ), se ligning (8.13) (75). Den dynamiske modellen konvergerer mot null siden  $C_s$  er avhengig av SGS-skjærspenningene fra gridfilteret som går mot null når de minste virvlene er lik Kolmogorov microscale  $\eta$ .

$$\mu_{LES} \rightarrow 0 \text{ når } \Delta \rightarrow \eta \quad (8.19)$$

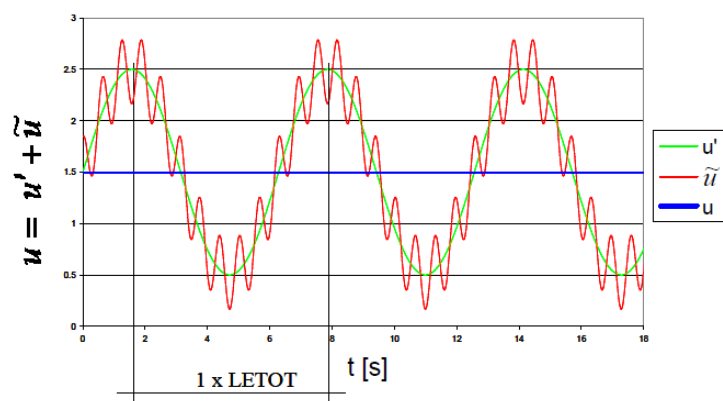
### Tidssteg

LES-simulering er midlet i rommet og er derfor avhengig av et fint grid. Det er vanlig å benytte eksplisitt integrasjon. Eksplisitt integrasjon er mye mer beregningseffektivt sammenlignet med implisitt integrasjon, men kan gi numerisk instabilitet ved for store tidsskritt. LES-simulering er derfor ikke bare avhengig av et relativt fint grid men også små tidsskritt i forhold til RANS-simulering. Størrelsen på tidsskrittet ( $\Delta t_c$ ) er bestemt av Courant-Friedrich-Lewy kriteriet ( $C$ ), hastigheten ( $U$ ), og avstanden mellom gridpunktene ( $\Delta x$ ), se ligning (8.20). Ofte forkortes kriteriet med CFL, eller bare C for Courant-nummer. Størrelsen på Courant nummeret varierer for hvilken ligning som skal løses, men typisk størrelse er 1.

$$\Delta t_c = C \frac{\Delta x}{U} \quad (8.20)$$

### Naturlige fluktuasjoner

For å kunne sammenligne resultater fra en LES simulering med en stasjonær løsning må den transiente løsningen midles over en viss tid. På grunn av naturlige fluktuasjoner i LES modelleringen må det sikres at de midlede resultatene ikke er påvirkete av disse. Dette kan gjøres ved og midle over et stort nok tidsintervall i den dynamiske løsningen. Dette intervallet kan finnes ved å sjekke LETOT, Large-Eddy-Turn-Over-Time, hvilket viser hvor raskt de store, energirike turbulensvirvlene beveger seg i rommet, se Figur 8-2. Et passende antall turbulens-fluktuasjoner og midle over er mellom 5 til 25. Den blå linjen er det midlede resultatet vi vil finne, grønne linjen viser bevegelsen av de store, energi rike turbulensvirvlene og den røde linjen viser de små lokale fluktuasjonene som skyldes mindre turbulensvirvler. (79)



**Figur 8-2 Large-Eddy-Turn-Over-Time.**  
 Figuren er hentet fra «CFD Best Practice» (79)

### 8.3.3 RANS – Reynolds Averaged Navier Stokes equations

RANS-simuleringer var den første metoden som ble tatt i bruk for å simulere fluiddynamikk ved hjelp av dataprogrammer. Metoden benytter seg av en midling av verdiene i hver celle i et gitt tidsintervall som et estimat for løsning av bevaringsligningene. På grunn av denne midlingen vil ikke simuleringene vise turbulensvirvlene, men det gjør det mulig å benytte seg av et større grid og mulighet for større tidsskritt som kan gi kortere simuleringstid. (66)

Muligheten for lengre tidsskritt skyldes at RANS-modellen benytter seg av implisitte numeriske metoder. Implisitte metoder er tung beregningsmessig på grunn av at alle nodene må løses som et sett, hvert punkt er avhengig av de andre, men metoden er numerisk stabil og tillater større tidsskritt. For LES vil tidsskrittene være avhengig av hastigheten og gridstørrelsen. Dette resulterer i meget små tidsskritt i størrelsesorden tiendels til hundredels sekund. Med RANS kan tidsskrittene være opptil flere sekunder og likevel gi gode resultatet.

Som Figur 8-1 viser, modelleres alle størrelser av virvler. RANS har fått sitt navn fra måten Navier Stokes ligninger forenkles.

Den vanligste turbulensmodellen som benyttes ved RANS simulering er «standard  $k-\varepsilon$ ». Modellen løser to transportligninger på partiell differensialform. Den ene for turbulent kinetisk energi ( $k$ ) og den andre dissipasjon av turbulent kinetisk energi ( $\varepsilon$ ) (80). Ifølge Karlsson og Quintiere (80) har modellen en svakhet som fører til at den blant annet ikke beregner innblanding av luft i røyksøylen på en korrekt måte. Det er derfor utviklet flere forbedrede varianter, for eksempel  $k-\omega$ . Det er viktig å velge riktig turbulensmodell i forhold til strømningsproblemet som skal løses.

## 9 CFD-programmet Fire Dynamics Simulator

FDS er et akronym for Fire Dynamics Simulator og er verdens mest brukte dataprogram for simulering av brann- og røykgassspredning (65). Mange generelle CFD-program krever at du selv velger turbulensmodeller og gjør innstillinger for simulering av den typen strømninger som er tenkt å simuleres. FDS på sin side, er spesielt laget for simulering av brann slik at mange vanskelige valg av for eksempel turbulens- og strålingsmodeller allerede er tatt. Kombinasjonen av modeller er også validert og verifisert sammen. Disse egenskapene til programmet, i tillegg til at det er gratis, har gjort det meget populært i bransjen.

Programmet er laget av NIST, National Institute of Standards and Technology (81). Det er ikke en open-source programvare i den forstand at hvem som helt kan redigere kildekoden, men koden er tilgjengelig for den som ønsker det. Det er et stort åpent forum der mange frivillige bidrar med brukerstøtte, validering, verifisering samt forslag til forbedringer.

Programmet løser en form for Navier-Stokes ligninger som er tilpasset for simulering av røyk- og varmetransport fra branner. Diskretisering skjer med en form av volummetoden som tidligere er beskrevet. FDS er en LES-programvare som benytter den konstante Smagorinsky subgrid turbulensmodellen. LES simulering krever mye datakraft, FDS har noen begrensninger og gjør noen forutsetninger slik at det er mulig å forenkle og gjøre beregningene raskere sammenlignet med for eksempel programmer som benytter ustrukturert grid. Hvis det velges å benytte et meget fint grid er det mulig å kjøre programmet med DNS, Direct Numerical Simulation, se avsnitt 8.3.1.

Det vil i følgende avsnitt bli presentert egenskaper ved programmet og noen innstillinger som blir benyttet senere i Del C – Simulering. Dette er ikke tenkt som en komplett gjennomgang av funksjoner med programmet, men som en introduksjon til viktige parametere og innstillinger for de som ikke er kjent med programmet fra før. Det vil også refereres til dette avsnittet videre i oppgaven.

### 9.1 Grid

FDS bruker et rettlinjett grid. Dette effektiviserer beregningsmodellen men krever at all geometri, som må være kvadratisk, også må forholde seg til gridpunktene. Hvis vegger og objekter ikke er plassert riktig i input-filen vil de automatisk bli flyttet og tilpasset beregningsgridet. Det er mulig å benytte sylindervektor koordinater, men det har liten praktisk anvendelse utenfor valideringssimulering. For å spare prosessortid kan en grid speiles med et symmetriplan. Det vil si at programmet lager et speilbilde av det som skjer på den ene siden og på den måten trenger kun halvparten av modellen simuleres. Dette kan påvirke resultatene negativt ifølge FDS User Guide (55). Symmetri er vanlig å benytte seg av i RANS-simulering, men på grunn av de naturlige fluktuasjonene i LES vil ikke de to sidene være like. Guiden påpeker spesielt at symmetriplan ikke skal plasseres gjennom en brann, noe som totalt endrer karakteristikken til flammesøylen.

Resultatene fra en simulering er sterkt avhengig av hvor fint gridet er. Et finere grid fører til at mer av den opptredende turbulensen blir løst direkte på gridpunktene og at mindre må modelleres av sub-turbulensmodellen. For å bestemme om gridet som benyttes er fint nok, skal det sikres at resultatene er griduavhengige. Dette gjøres ved å starte med et relativt grovt grid, og deretter forfine gridet helt til resultatene er noenlunde konstant.

Som det beskrives i «CFD Best Practice» (79) så vil det være en forskjell mellom den grid-uavhengige løsningen og en løsning som er akseptabel. Et typisk eksempel vil være en mindre temperaturforskjell mellom to oppløsninger på gridet. I realiteten er det andre usikkerheter slik som størrelsen på brannen, som gir mye mer usikkerhet. Det skal også legges merke til at den griduavhengige løsningen kommer an på hva som er hensikten for simuleringen. Er du for eksempel interessert i tykkelsen på røyklaget, så kan det vise seg at det er nok med et relativt grovt grid, men hvis du er interessert i temperaturer over flammene trenger du sannsynligvis et mye finere grid.

Når cellestørrelsen forminskes økes beregningstiden. Ved en halvering av cellestørrelsen så økes antallet celler 8 ganger. I tillegg til den økte beregningstiden som skyldes antallet celler må også tidsskrittet halveres for å oppfylle CFL-kriteriet. Dette resulterer i totalt 16 ganger lengre beregningstid når cellestørrelsen halveres.

For å estimere den nødvendige cellestørrelsen for en brann som styres termisk oppdrift, kan det tas utgangspunkt i den dimensjonsløse brann diameteren,  $D^*$ , se ligning (9.1). Den dimensjonsløse brann diameteren trenger ikke å være det samme som den faktiske brann diameteren (55). For å sammenligne forskjellige simuleringer benyttes forholdet mellom cellestørrelsen ( $\partial x$ ) og den dimensjonsløse brann diameteren. Dette forholdet viser hvor mange celler som spenner over diameteren til brannen. Jo flere gridceller som spenner den dimensjonsløse brann diameteren, jo bedre er den beregningsmessige oppløsningen.

CFD Best Practice (79) anbefaler at det benyttes minimum  $\partial x/D^* = 10$ , men det fremgår fra blant annet Gissi (82) at det ved tidligere grid studier er benyttet forholdstall mellom 4 og 16 med gode resultat, men det påpekes at dette gjelder kun det spesifikke forsøket. Likevel benyttes verdiene 4 for grovt grid, 8 for medium og 16 for fin, som tommelfingerregler på oppløsningen (65) (82). Disse er ofte gode utgangspunkt, men det må alltid gjennomføres sensitivitetsanalyser på gridstørrelsen.

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} T_{\infty} c_p \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (9.1)$$

En viktig grunn til at FDS kan løse LES-simuleringen så raskt og effektivt som den gjør er blant annet på grunn av metoden programmet beregner trykk på. FDS benytter seg av FFT (Fast Fourier Transforming) som kan løse trykk ligningene i et steg, uten itereringer, på en meget nøyaktig måte. For at programmet skal få dette til må antall gridceller i Y- og Z-retning kunne faktoriseres med tallene 2,3 og 5 (79).

Nærmest flater er det viktig at oppløsningen på gridet er god, gjerne bare noen få centimeter eller mindre. For LES-simulering vil dette være upraktisk, siden hastigheten på simuleringen er avhengig av CFL-kriteriet. FDS benytter seg derfor av en veggmodell for å modellere effekten av «Law of the Wall», dvs. hastigheten i en strømning er null nærmest veggen.

## 9.2 Subgrid turbulensmodell

Standardinnstillingen på FDS benytter seg av konstant Smagorinsky subgrid turbulensmodell med faktor  $C_s$  lik 0,2. Det finnes mulighet i FDS 5.5.3 å benytte en dynamisk Smagorinsky turbulensmodell slik som det er beskrevet i avsnitt 0. I den

kommende versjonen, FDS6, er det fortsatt uklart hvilken turbulensmodell som vil være standard, men det eksperimenteres med konstant og dynamisk Smagorinsky pluss Vreman og Deardorf.

### 9.3 Randbetingelser

Randbetingelsene har veldig mye å si for resultatet av simuleringer, det er derfor viktig at valget av randbetingelse er nøye beskrevet. Hvis ikke det oppgis en randbetingelse for en overflate vil FDS automatisk benytte «INERT». Med «INERT» randbetingelse så vil ikke materialet varmes opp, men vil beholde temperaturen den hadde når simuleringen startet (standard 20°C), den vil likevel tillate energitransport gjennom materialet. Det anbefales derfor generelt og alltid spesifisere de virkelige randbetingelsene (82). Motsatsen til «INERT» er adiabatisk randbetingelse. Når adiabatisk randbetingelse benyttes vil netto energitransport til flaten være null. Programmet itererer seg frem til en temperatur på overflaten slik at netto energitransport, dvs summen av avgitt og mottatt energi i form av stråling og konveksjon, er null.

«INERT» og «ADIABATIC» er ekstrempunktene når det dreier seg om energitransport. Når det er uklart hva for slags material som en overflate vil ha, vil simuleringer med de to randbetingelsene definere to ekstreme verdier, med det riktige resultatet en plass i mellom.

Randbetingelsen «OPEN» angir en åpning i ytterkanten av beregningsdomenet. Den spesifiserer at forholdene utenfor flaten er de samme som ved starten av simuleringen (82).

### 9.4 Andre innstillinger

➤ `FREE_SLIP=.TRUE.`

Deaktiverer veggmodellen slik at hastigheten nærmest flaten ikke vil bli redusert.

➤ `FDS6=.TRUE.`

Ved å spesifisere `FDS6=.TRUE.`, forandres flere parametere på en gang. De forskjellige parametere er gitt nedenfor. Flere av innstillingene som var tenkt å først bli tilgjengelige i FDS6 har allerede blitt implementert i FDS5.5.3. Dette gjelder blant annet «baroclinic vorticity» (`BAROCLINIC=.TRUE.`) og Werner Wengle veggmodell.

```
CFL_VELOCITY_NORM=1
FLUX_LIMITER=2
DYNMAG=.TRUE.
BAROCLINIC=.TRUE.
WERNER_WENGLER_WALL_MODEL=.TRUE.
```

➤ `CFL_VELOCITY_NORM=1`

Angir at Courant nummeret i CFL kriteret spesifiseres til 1.



## DEL C – Simulering

Denne tredje delen av oppgaven tar for seg simuleringer med CFD-programvaren Fire Dynamic Simulator 5 svn 7031. Versjonen er publisert i november 2010 og er den seneste offisielle utgaven av programmet. Det arbeides fortsatt med versjon 6. Programvaren er tilgjengelig men må kompileres av brukeren selv.

Fra litteraturstudien i Del A, ble det funnet ut hvilke parametere som bør benyttes for designbranner og hvilke konsekvenser forskjellige valg av geometrier og parametere får for backlayering av brannrøyk. Del B gjennomgikk noe grunnleggende fluiddynamikk og forklarte noen av de viktigste matematiske modellene bak CFD programmer. Mye av det som ble beskrevet i Del B vil bli benyttet i denne delen, med hensyn til valg av parametere og for å analysere og diskutere resultatene av simuleringene.

Simuleringene som er gjennomført er delt inn i tre avsnitt. Først er simulering av jetvifter validert og verifisert. Dette er en meget viktig del for å sjekke at programmet kan beregne denne type strømninger korrekt. Deretter gjennomføres simuleringer med en forenklet garasje for å kontrollere tilbakestrømming av røyk ved forskjellige innstillinger og for å kunne vurdere dagens krav i VTEK. Avslutningsvis gjennomføres simuleringer med et fiktivt garasjeanlegg med forskjellige oppsett av jetvifter, med og uten biler, med og uten bjelker, ulike kapasitet på avtrekk samt to forskjellige plasseringer av brannkilde.

## 10 Validering og verifisering av simuleringsmodell

I manualen til FDS5 oppgis det at programmet løser en form av Navier Stokes ligninger som er tilpasset strømninger skapt av termiske drivkrefter. På grunn av at det ikke angis spesifikt at programmet kan benyttes for simulering av de høye hastighetene som genereres av jetvifter (55) og at det ikke finnes lignende modelleringer i FDS Validation Guide (83), må dette undersøkes særskilt.

Med programmet følger det med et forenklet eksempel som viser hvordan en jetvifte kan simuleres. I dette eksempelet gir viften kun 5 m/s, som er en fjerdedel av det som er vanlig for jetvifter på full hastighet (19) (20). Oppgaven tar derfor først for seg validering av programvaren for vifter med fritt strømningsbilde og vifter med strømningsbilde som er begrenset av et tak.

Programmet kan ikke simulere en roterende vifte, derfor løses problemet gjennom en forenkling ved å benytte en flate med trykkforskjeller (55). Trykkforskjellen blir drivkraften som tilsvarer en vifte og gir luften en gitt hastighet. Ulempen med denne fremgangsmåten er at luften ikke vil få den turbulensen som en virkelig vifte vil skape. Kommersiell program, som for eksempel Ansys CFX/Fluent (84) har muligheten til å bestemme turbulensen fra flaten som tilsvarer en vifte, men dette er ikke mulig i FDS5. Luften som strømmer ut av viften vil derfor være lineær til å begynne med. Det vil dannes turbulens etter en kort tid men det gir ikke et eksakt/virkelig strømningsbilde.

Enda en begrensning for FDS5, som er blitt omtalt tidligere, er kravet om at geometrien må tilpasses den rettlinjede griden. De virkelige, sirkulære viftene vil derfor være kantete, alternativt firkantet.

For å få riktig innblanding av luft og riktig turbulens i nærheten av viften vil det kreves et fint grid i åpningen på viften og i en viss lengde foran viften. En anbefaling fra Rubini (65) er å bruke 20, men minimum 10, gridceller på tvers av viften på grunn av de høye hastighetene. I dette tilfellet vil det si 20mm, eller minimum 40mm bredde på gridcellene. Dette vil kreve meget stor beregningskapasitet på datamaskinen hvis en ønsker å se på en hel garasje over en lengre tid. Det må derfor undersøkes om det er mulig å variere parametere slik som Smagorinsky-konstanten for å generere mer turbulens selv ved større gridceller og likevel få et riktig resultat.

For å kunne konkludere med at modellen er representativ for virkelige vifter må simuleringene kontrolleres opp mot empiriske ligninger og målte verdier. I simuleringssammenheng skilles det derfor mellom to måter å utføre en slik kontroll, validering og verifisering.

Validering av et simuleringsverktøy skjer ved å sammenligne forenklede deler av en modell med empiriske ligninger. Dette kontrollerer at beregningsprogrammet benytter de riktige ligningene og gir riktig resultat (65). Verifisering vil være å kontrollere om modellen er egnet til denne typen av forbrennings-/strømningsanalyser. Verifiseringen gjennomføres ved at simuleringene sammenlignes med målte verdier fra kontrollerte forsøk der randbetingelsene og omgivelsene er kjente.

Oppgaven vil først ta for seg validering av jetviftesimulering ved å sammenligne forenklede simuleringer fra FDS5 med empiriske ligninger og diagram fra «Ventilation of Buildings» (85). To scenarier vil undersøkes, først en fritt strømmende, rektangulær jet, som ikke møter motstand fra vegger og tak. Deretter en jet nær takflaten som vil bli

påvirket av Coanda-effekten, som er et typisk scenario i en garasje. Coanda-effekten blir nærmere forklart i neste kapittel. For strømning nær en parallell hindring vil programvaren benytte seg av en veggmodell for å modellere hastigheten nær hindringen. Som «Law of the Wall» sier, vil hastigheten nærmest veggen være null og stiger i en ikke-lineær kurve ut fra veggen. Avstandene dette skjer på er kun et par centimeter, men det påvirker strømningsbildet og må derfor tas med i modellen. På grunn av de store forskjellene nærmest hindringen kreves det et fint grid nærmest veggen for å gi riktig resultat.

## 10.1 Validering av jetsimulering

Luften fra jetviften blir skyvet ut i form av en jetstråle som etter en viss avstand møter nok motstand til at den brytes opp. Når og hvordan dette skjer er avhengig av randbetingelsene, skyvekraften, størrelsen på viften og hvordan utkastet på jetviften er utformet.

Når jetstrålen fra viften skal undersøkes gjøres det i hovedsak forskjell på to forskjellige strømningstilfeller, en jet som strømmer fritt og en jet som er nær en vegg eller tak. En jetstrøm som er nær en parallell hindring vil bli påvirket av flaten og får en lengre kastelengde sammenlignet med en fritt strømmende jet. Den parallelle hindringen forhindrer innblanding av luft, som skaper en trykkforskjell over jetstrømmen. Trykkforskjellen får jeten til å bøye seg mot taket, som ytterligere reduserer innblanding av omgivende luft. Jetstrømmen vil bøye av til den til slutt strømmer langs med den parallelle hindringen. Fenomenet kalles for Coanda-effekten.

For en isoterm jetstråle vil den kritiske avstanden for at Coanda-effekten skal påvirke strålen være  $D_c = 6\sqrt{A_0}$  ifølge Awbi (85). Hvis avstanden er mindre må den beregnede hastigheten for en fritt strømmende jet multipliseres med en korreksjonsfaktor  $F$  (85). Størrelsen på korreksjonsfaktoren kan avleses i diagram som er gjengitt i vedlegg 2.

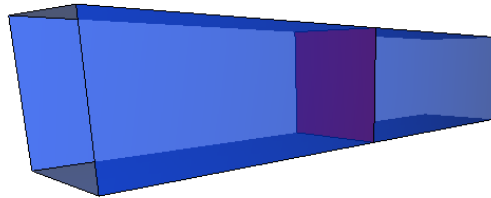
Dette vil i praksis for garasjeanlegg med monterte jetvifter i taket si at Coanda effekten alltid vil påvirke hastighetsprofilen. For å forenkle valideringsmodellen av jetviftene er det valgt å benytte firkantet tverrsnitt på jetviftene, se Figur 10-1. De virkelige viftene vil være sirkulære men dette vil kun ha noe å si en kort avstand foran viften. På grunn av at vi er interessert i det store bildet der viftene gir en skyvekraft til luften i en garasje, er de små detaljene nærmest viften av liten interesse så vidt det ikke påvirker det store strømningsbildet.

$$\frac{U_m}{U_0} = \frac{K_v F}{x/\sqrt{A_0}} \quad (10.1)$$

Ligning (10.1) viser hastigheten på jetstrømmen i viftens senterakse som en funksjon av avstanden  $x$  fra viften, åpningsareal  $A_0$ , korreksjonsfaktor  $F$  (se vedlegg 2)

starthastighet  $U_0$  og en empirisk konstant  $K_v$  som er lik 7,2 (85). Formelen er gyldig for tredimensjonale jetstrømmer med firkantet profil på utkastet, som er det samme som den forenklete modellen av jetviften (85). Simuleringene avviker derfor ikke i geometri fra ligningene og grafene i «Ventilation of Buildings» (85). Grunnlaget som de empiriske verdiene er beregnet ut fra er presentert i vedlegg 2.

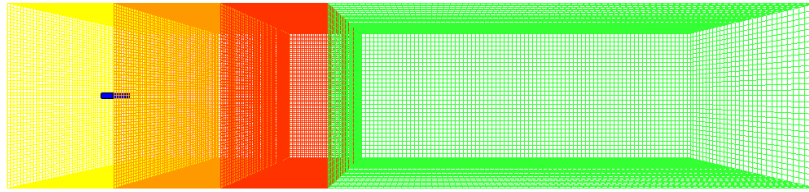
. Størrelsen på den forenklete jetviften er 2 meter lang og 40 centimeter i diameter. Dette tilsvarer størrelsen til de største jetviftene fra produsentene Fläktwoods (20) og SystemAir (19). På grunn av at modellen som skal benyttes i simuleringene har et større tverrsnitt på jetviften, sammenlignet med de virkelige viftene velges det å redusere hastigheten slik at luftmengden gjennom viften holdes konstant. For valideringen er det valgt å beholde hastigheten på 20 meter per sekund. Dette gir en økt skyvekraft men uten betydning i denne delen av simuleringene.



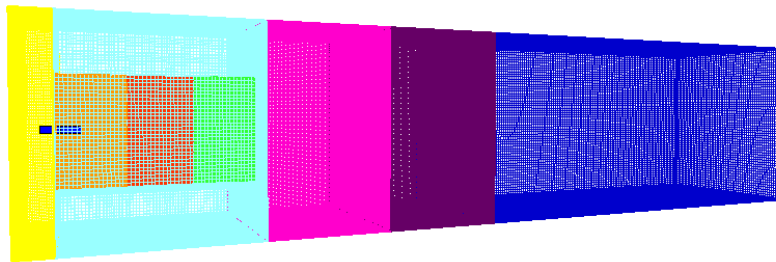
**Figur 10-1 Forenklet modell av jetviften**

Valideringen vil gjøres på to modeller, en fritt strømmende jet og en jet som strømmer langs med et tak. Hver modell vil bli presentert hver for seg der forutsetningene og parametere for simuleringene forklares nærmere. Resultatene blir presentert grafisk og numerisk for deretter å bli diskutert. Valideringen vil vise hvilke innstillinger i programvaren som er nødvendige for å få riktige resultat.

### 10.1.1 Fritt strømningsbilde fra jetvifte



Figur 10-2 Beregningsdomene for simulering #01-07 og #10. Totalt 4 mesh

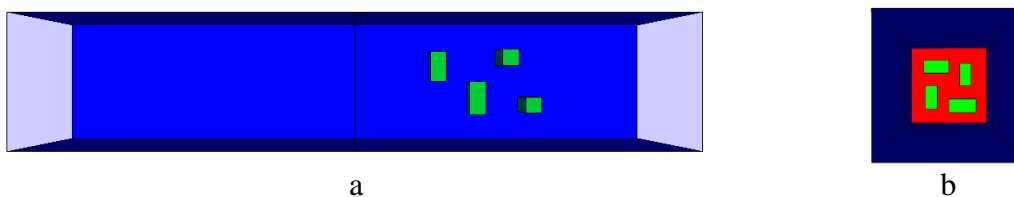


Figur 10-3 Beregningsdomene for simulering #08 og #09. Totalt 11 mesh

#### 10.1.1.1 Oppsett

Beregningsdomenene som er benyttet er vist i Figur 10-2 og Figur 10-3. Jetviften er plassert midt i et 12 x 12 m tverrsnitt. Avstanden bak viften er 1m og avstanden foran er 50m. Total lengde av beregningsdomenet er 53 meter. For simulering #01-07 ble det benyttet 4 grid. Tre like store mesh med finere grid frem til 18 meter. Deretter et dobbelt så grovt grid frem til 50 meter. Simulering #08-09 har 50mm grid i orange, rød og grønn mesh, 100mm for gul, rosa og mørkerød, og 200mm for de fire cyan (rundt 50mm gridene) og den lilla.

Det er gjennomført en parametervariasjon der Smagorinskykonstanten ( $C_s$ ) er justert fra sin standardverdi på 0,2. Den dynamiske Smagorinsky turbulensmodellen ble også testet. Simuleringene med fritt strømmende jet er sammenstilt i Tabell 10-1. Det ble benyttet tre forskjellige oppsett med gridstørrelser. Valget av gridstørrelse som er benyttet, er gitt i Tabell 10-1. Fullstendig beskrivelse av de forskjellige gridene er gitt Vedlegg 3 - Gridstørrelser. Hastigheten på viften er satt til 20 m/s, en verdi som er typisk for denne størrelsen på vifter (19) (20). Randbetingelsene på alle seks kanter er satt til «OPEN» i FDS. Dette er nærmere beskrevet i 0. I simulering #09 ble det satt inn 4 rektangulære bokser (100 x 50 x 50mm) for å skape turbulens inne i viften. Snitt av den aktuelle viften er vist i Figur 10-4. Simulering #09 var vellykket slik at simulering #10 gjennomførtes med 10cm grid og 4 bokser plassert i hjørnene i kanalen.



Figur 10-4 Snitt av viften som er brukt i #09. a) sett fra siden b) sett foran i fra

Tabell 10-1 Sammenstilling av valideringsforsøk

Sim. #	Turbulensmodell	20 cm grid	10 cm grid	5 cm grid	Kommentar
01	$C_s = 0,20$	x			
02	$C_s = 0,18$	x			
03	$C_s = 0,15$	x			
04	dynamisk	x			
05	dynamisk	x			FDS6=.TRUE.
06	$C_s = 0,20$		x		
07	dynamisk		x		
08	$C_s = 0,2$			x	
09	$C_s = 0,2$			x	4 stk bokser for å skape turbulens i jetstrømmen
10	$C_s = 0,2$		x		

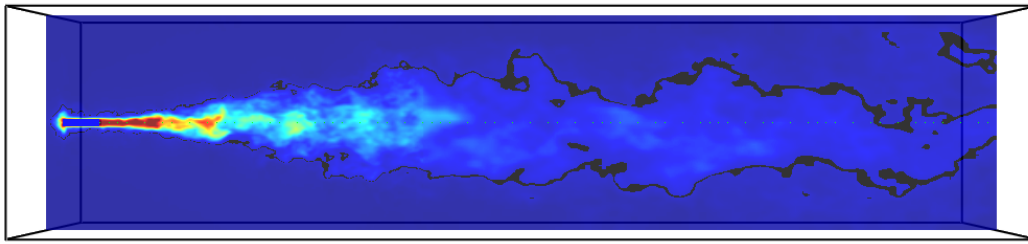
Inputfilen til FDS for simulering #04 og #09 er gitt i henholdsvis Vedlegg 8 og Vedlegg 9

### 10.1.1.2 Resultat

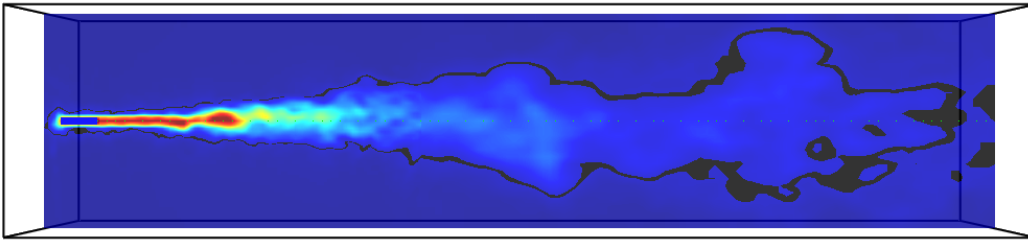
Resultatet er presentert med grafiske bilder fra de viktigste simuleringene samt en graf med alle resultatene. Bildene er tatt etter 60 sekunder og viser hastighetsprofilen i det øyeblikket i et tverrsnitt som går rett gjennom senterlinjen på viften. Skalaen til høyre for bildene viser hastigheten og går mellom 0 og 15m/s. For å fremheve de lavere hastighetene er iso-linjen på 1 m/s vist med sort farge. Grafen viser hvordan senterhastigheten på den fritt strømmende jeten synker med avstanden fra viften. Resultatene i grafen er gjennomsnitt for de 10 siste sekundene, slik at store fluktuasjoner unngås.

I FDS er det mulig å registrere flere forskjellige komponenter av hastigheten. Det kan velges mellom total hastighet eller hastighetskomponentene i U,V,W i henholdsvis x-,y- og z-retning. De empiriske hastighetene viser kun hastighet i viftens lengdeakse. Det er derfor valgt å kun vise hastighetskomponenten U (x-retning) i grafen for å gi riktig sammenligninggrunnlag. De grafiske snittene viser totalhastighet, det vil si summen av de tre hastighetskomponentene. Målerverdiene i grafene er målt med 50 cm mellomrom.

### Hastighet - Dynamisk Smagorinsky turbulensmodell



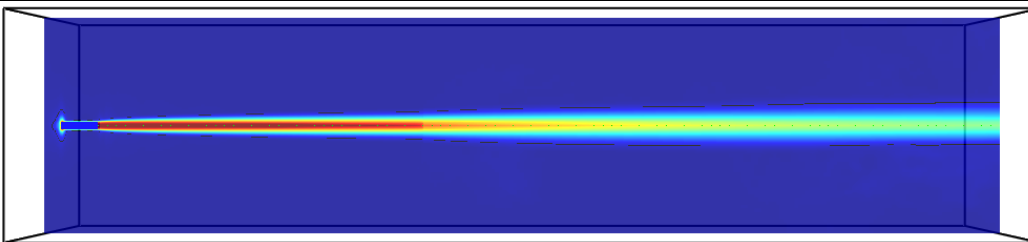
Figur 10-5 Simulering #07. Grid 10cm



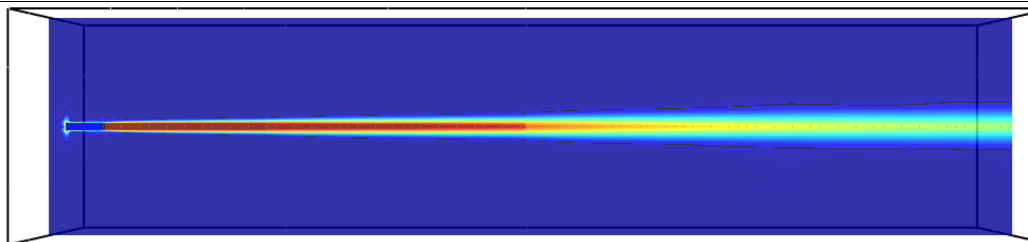
Figur 10-6 Simulering #04. Grid 20cm



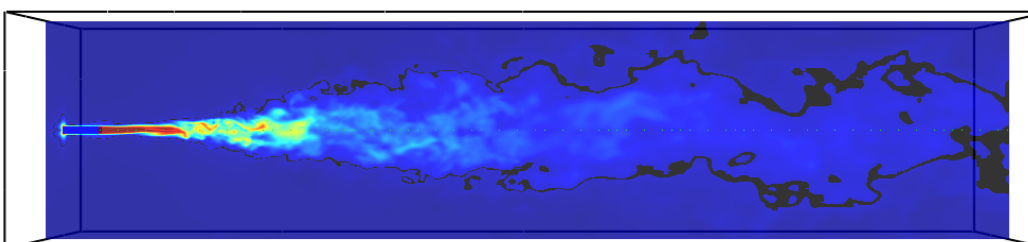
### Hastighet - Standard turbulens modell (Smagorinsky)



Figur 10-7 Simulering #05. Grid 10cm,  $C_s=0,2$ .  
Bildet er representativt også for simulering #1-3.

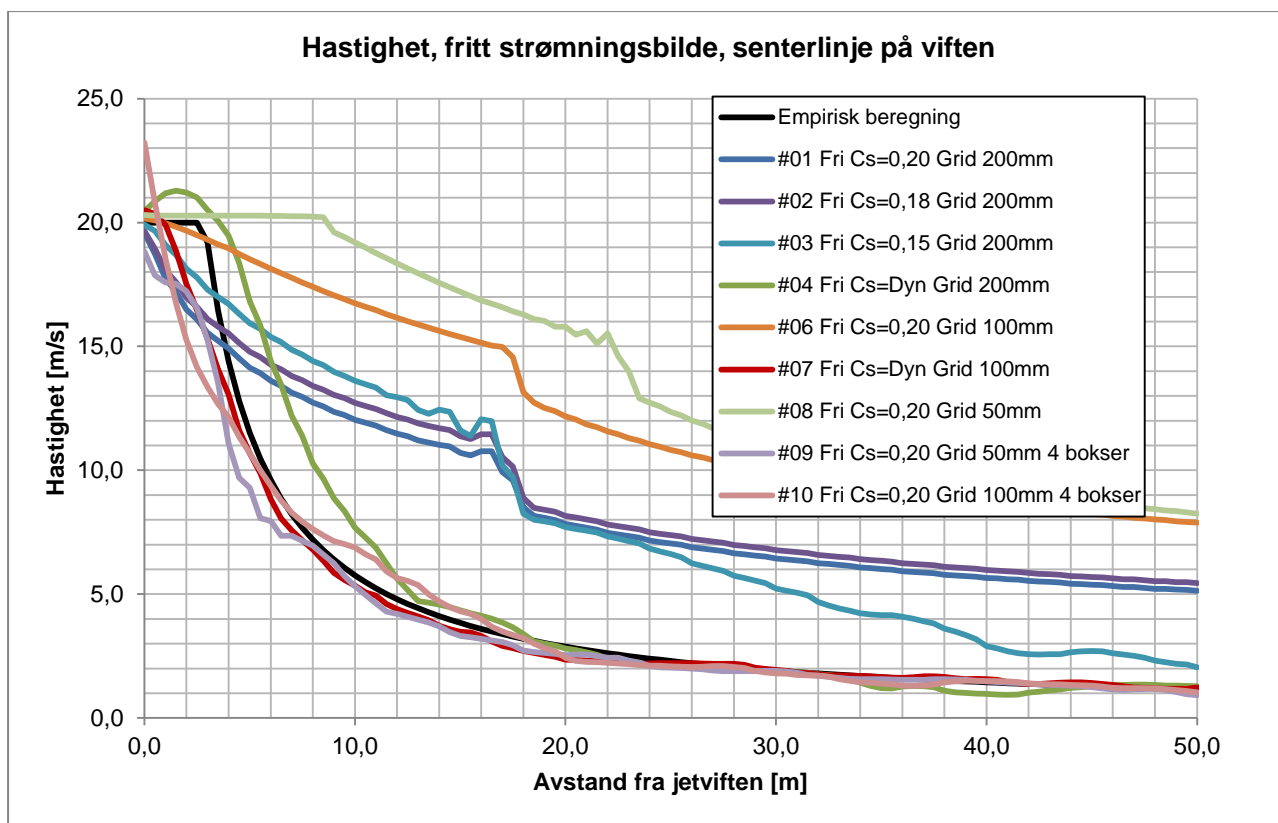


Figur 10-8 Simulering #08 Grid 5cm,  $C_s=0,2$



Figur 10-9 Simulering #09 Grid 5cm,  $C_s=0,2$   
Fire små bokser ( $50^3$  mm) er plassert inne i viften for å generere turbulens





Figur 10-10 Hastighet som funksjon av avstanden fra jetviften, valideringsforsøk #01-10

### 10.1.1.3 Diskusjon

Den svarte kurven i Figur 10-10 viser empirisk utregning av hastigheten i en gitt avstand fra åpningen på jetviften. De første par meterne er kurven flat, denne delen av grafen, før hastigheten begynner å synke, er det som kalles «jet core». I kjernen på jeten vil jeten ikke bli brutt opp og bremsset.

Simuleringene med konstant verdi på Smagorinsky konstanten ( $C_s$ ) (simulering #01-03, 06, 08) overensstemte dårlig med de empiriske ligningene. Selv med 5 centimeters gridstørrelse ble ikke jetstrømmen brutt opp. Det ble valgt, å ikke gjennomføre simuleringer med enda finere grid og konstant Smagorinsky turbulensmodell. Enda finere grid var heller ikke praktisk mulig på datamaskinen som var tilgjengelig. En halvering av gridcellene ville økt antallet celler fra 5,4 millioner, til 43,2 millioner celler. Grovt sett vill 1 million celler kreve 1Gb RAM-minne. Det ville derfor kreves et kluster av datamaskiner for å kjøre modellen.

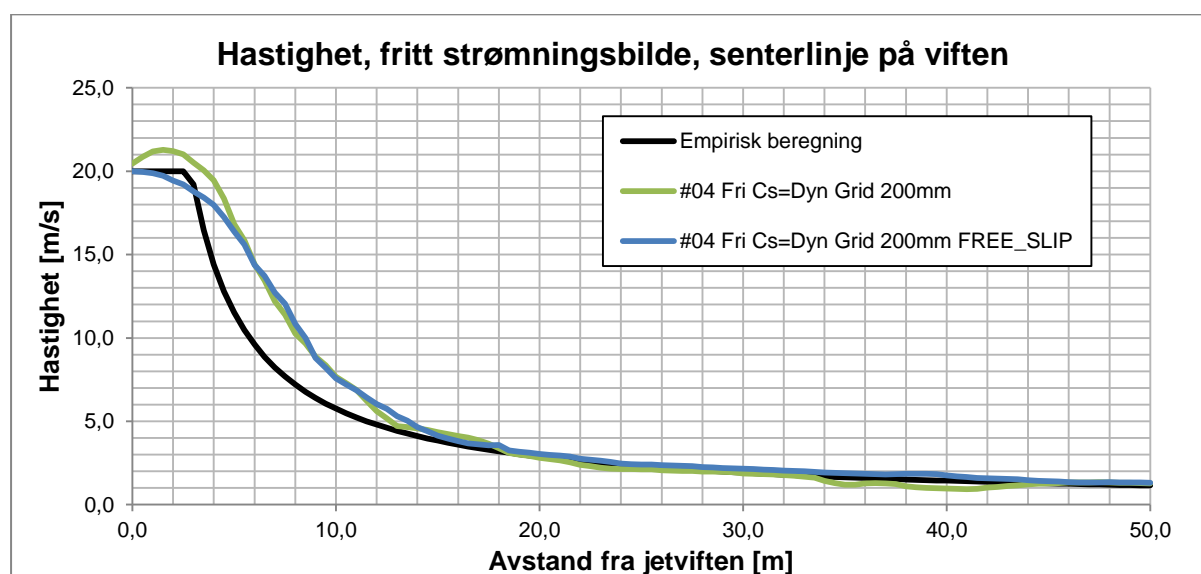
De dårlige resultatene var forventet på grunn av at denne turbulensmodellen ikke kan representere strømninger med store gradienter (jmf avsnitt 0 – Turbulensmodeller). I en virkelig vifte vil selve viften generere turbulens og ikke som i disse simuleringene, laminær strømning. Det ble derfor i #09 satt inn 4 bokser med dimensjonene 50x50x100mm i viften for å generere turbulens. Dette ga gode resultater og stemte godt med den empiriske ligningen. Cellestørrelsen ble derfor økt til 10cm og fire bokser med dimensjonene 100x100x100mm. Resultatet her var nesten like gode som #09 selv om cellestørrelsen var doblet. Resultatet var dermed griduavhengig.



For simuleringene med konstant Smagorinsky turbulensmodell, uten ekstra bokser, er det blitt registrert hopp i grafene der gridstørrelsen har blitt doblet. Forklaringen til dette kan skyldes måten hastigheten er registrert på. Målepunktene er plassert midt på skillet mellom fire gridceller. FDS interpolerer derfor verdien på hastigheten mellom disse fire cellene. Når gridstørrelsen blir doblet vil hastigheten i hver gridcelle representere et større volum, som strekker seg ut fra den raskere senteraksen. Dette får til følge at middelhastigheten i den cellen blir lavere, noe som gir et hopp i grafene.

Simulering #04 og #07 som ble gjennomført med den dynamiske Smagorinsky turbulensmodellen viste gode resultat og overensstemte godt med den empiriske beregningen. Resultatene viser at modellen krever ca 30% mer prosessortid sammenlignet med en konstant verdi på  $C_s$  men resultatene tilsier at dette veies opp mot at det er mulig å benytte et mye grovere grid. #07 har det samme resultatet som #09 selv med doblet gridstørrelse.

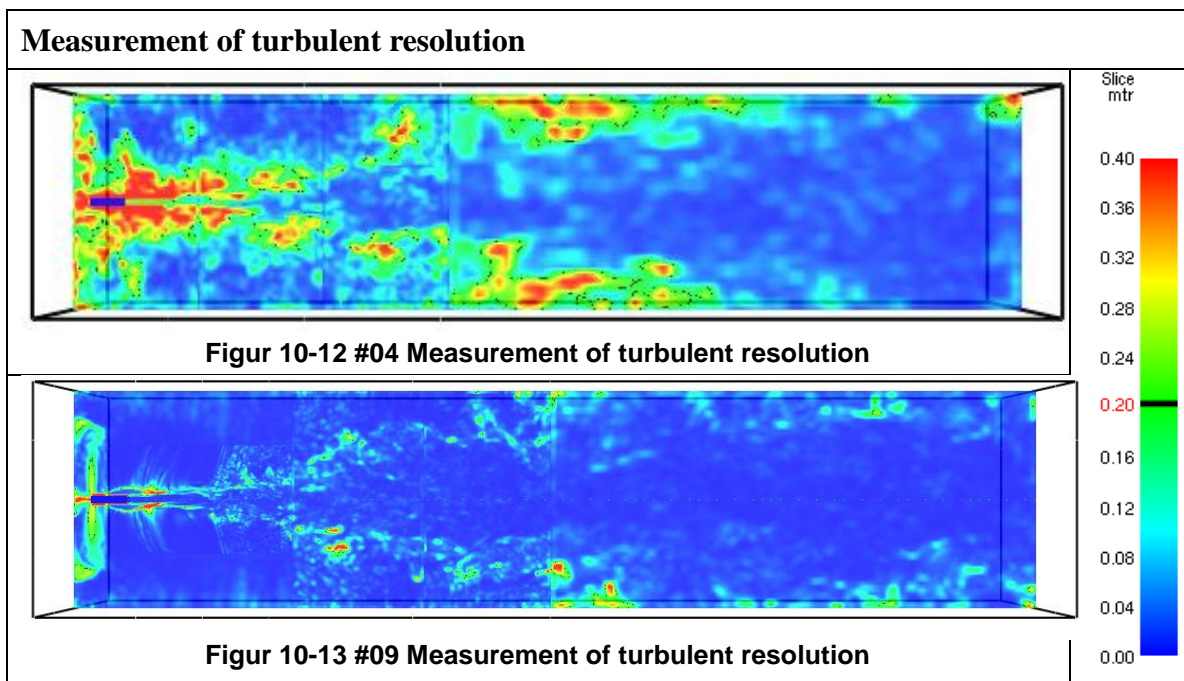
Simulering #04 og #10 viser en litt spesiell oppførsel rett ut fra åpningen på jetviften, hastigheten blir høyere enn det som genereres av viften. For #10 sin del skyldes dette boksene i viften. Disse er forholdsvis store slik at luften akselereres når den går gjennom det mindre tverrsnittet. Dette vises tydelig i resultatet, der hastigheten ut av viften er 3m/s høyere enn hva viften genererer. Avviket i #04 er ikke like enkelt å forklare. Dette kan skyldes veggmodellen i FDS. Veggmodellen fører til at hastigheten langs med veggene er lavere sammenlignet med midt i «røret». For at kontinuitetsligningen skal gjelde må hastigheten i midten få en raskere hastighet enn middelhastigheten som viften genererer. På grunn av at den grove griden (20cm) representerer tverrsnittet med kun fire gridceller vil det ikke være mulig å akselerere gridcellene i midten (alle cellene er i kontakt med veggene). En mulig feilkilde kan derfor være at det oppstår en feil i gridcellen utenfor jetviften der det er mulig å akselerere jetstrømmen. Fenomenet oppstår ikke med den finere griden. En kontrollsimulering med randbetingelsen «free slip» for veggene i jetviften er vist i Figur 10-11. Resultatet med `FREE_SLIP=.TRUE.` fikk ikke en høyere hastighet de første meterne, resultatet etter 5m var identisk med den første simuleringen. Avviket skyldes derfor med stor sannsynlighet veggmodellen. Simuleringen med og uten `FREE_SLIP=.TRUE.` gir i stort sett det samme resultatet, modellen trenger derfor ikke å simuleres på nytt.



Figur 10-11 Sammenligning av #04 med og uten `FREE_SLIP=.TRUE.`

Som tidligere beskrevet, vil en halvering av gridstørrelsen føre til at diskretiseringsfeilen blir mindre med en faktor på 4 mens beregningstiden øker med en faktor på 16 (82). Den konstante Smagorinsky turbulensmodellen ga gode resultater i simulering #10 med 100mm grid men simuleringstiden var nesten 24 timer for de 60 sekundene i modellen. En simulering med et stort garasje over et langt brannforløp ville tatt lang tid å simulere, noe som er upraktisk når det for eksempel skal gjøres en parametervariasjon men mange simuleringer.

De to simuleringene med dynamisk Smagorinsky turbulensmodell avviker noe fra hverandre i nærheten av jetviften,, likevel konvergerer resultatene etter 12 meter. Den grafiske presentasjonen viser en noe større spredning nærmest jetviften for 10 cm grid sammenlignet med 20 cm grid. Dette vises også på grafene, der den finere griden synker raskere i hastighet sammenlignet med den grovere. Målet med simuleringene er ikke å gi et eksakt korrekt og detaljert bilde av jetstrømmen, men en modell som er representativ i det store strømningsbildet. De to gridene genererer stort sett det samme strømningsbildet og gir en tilfredsstillende nøyaktighet til formålet. Det mindre avviket nærmest jetviften vil ikke gi store utslag på en fullstendig garasje. Det kan konkluderes med at det er nådd en tilstrekkelig grid-uavhengig løsning med 20 centimeters grid.



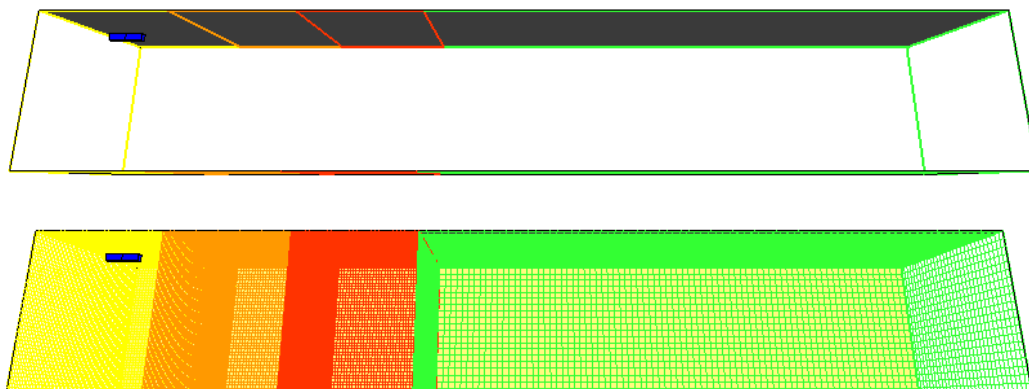
Ved å kontrollere MTR, Measurement of turbulent resolution, er det mulig å si noe om kvaliteten på simuleringen i henhold til Popes kriterium (se avsnitt 0). For at det skal være god kvalitet skal andelen av den kinetiske energien som modelleres av turbulensmodellen ikke overstige 20%. Denne grensen er markert med sort strek i Figur 10-12 og Figur 10-13. Som resultatene viser er det god kvalitet på simulering #09, den blir derfor brukt som en referanse mot de grove gridene. Oppsettet i simulering #04 med 20cm grid, som blir benyttet videre i validering og verifisering, har relativt dårlig oppløsning med flere områder med MTR over 30-40%. Likevel er det god overensstemmelse med hastighet og

spredning mellom #04 og #09. Det vil derfor tas utgangspunkt i at resultatene er riktige, men at det vil være grunnlag for å gjennomføre kontrollsimuleringer senere i oppgaven med 10 centimeters grid.

#### **10.1.1.4 Konklusjon**

Denne første serien av forsøk har vist at programmet Fire Dynamic Simulator 5 kan benyttes for simulering av jetvifter med noen forenklinger i geometri. Den dynamiske turbulensmodellen ga gode resultater for relativt grove grid sammenlignet med empiriske beregninger. Den konstante Smagorinsky turbulensmodellen ga dårlige resultater for grove grid. Med 100 mm celledørrelse og ekstra generering av turbulens ved hjelp av bokser i viften, overensstemte resultatet godt med de empiriske ligningene, hastigheten var noe høyere i enden av vifter. Neste serie av forsøk vil ta for seg validering av simulering av jetvifter nær en parallell hindring.

### 10.1.2 Jet nær takflaten



Figur 10-14 Beregningsdomene for simulering #11 og 12. De første 18 meterne er gridstørrelsen konstant (10 resp 20 cm). Deretter er gridstørrelsen doblet.

#### 10.1.2.1 Oppsett

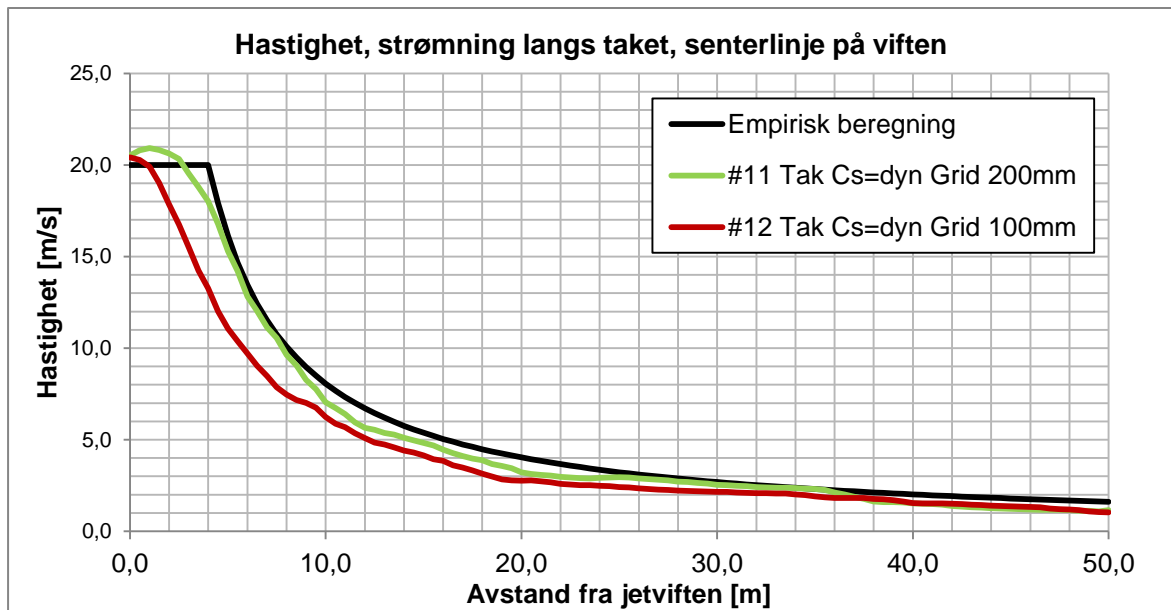
Som det ble vist i forrige delkapittel ga den dynamiske Smagorinsky-modellen best resultat for 10 og 20 centimeters gridstørrelse. Videre simuleringer vil derfor kun benytte seg av denne dynamiske turbulensmodellen. Oppsettet med inndeling av grid ligner på scenariet med fristrømmende jet. Viften er i dette tilfellet plassert 20cm under taket. Avstanden var tilfeldig valgt. Tverrsnittet på beregningsdomenet er 6 meter bredt og 8 meter høyt. Lengden er fortsatt 50 meter foran viften og 1 meter bak, totalt 53 meter langt (lengden på viften er 2 meter). Beregningsdomene, geometri og inndeling av grid er vist i Figur 10-14, modellen har kun tak, alle de andre flatene er modellert som åpne («OPEN»). Sammenstilling av forsøkene er presentert i Tabell 10-2. De forskjellige gridstørrelsene som er benyttet er nærmere beskrevet i Vedlegg 3 - Gridstørrelser. Gridstørrelsen er konstant frem til 18 meter foran åpningen på.. Deretter er gridstørrelsen doblet (den grønne griden på Figur 10-14). Totalt er to simuleringer gjennomført og sammenlignet i denne delen av valideringen. Resultatene blir presentert på samme måte som i forrige kapittel og deretter diskutert i et eget avsnitt.

Randbetingelsene som er benyttet er åpne kanter, spesifisert som «OPEN», og tak er satt som «INERT». Dette fører til at FDS benytter seg av sin standard veggmodell, Werner-Wengle, som kan ha noe å si for resultatet. Noe som vil påvirke resultatene enda mer sammenlignet med en fritt strømmende jeten, er Coanda-effekten (se avsnitt 10.1). Coanda-effekten vil føre til raskere hastigheter langs taket men også en raskere spredning horisontalt sammenlignet med den fritt strømmende jetstrålen. Valget av randbetingelsen «INERT» har ikke noe å si for resultatet i disse simuleringene, siden det er en spesifisering av termiske egenskaper. Inputfilen for simulering #12 er gitt i vedlegg 10.

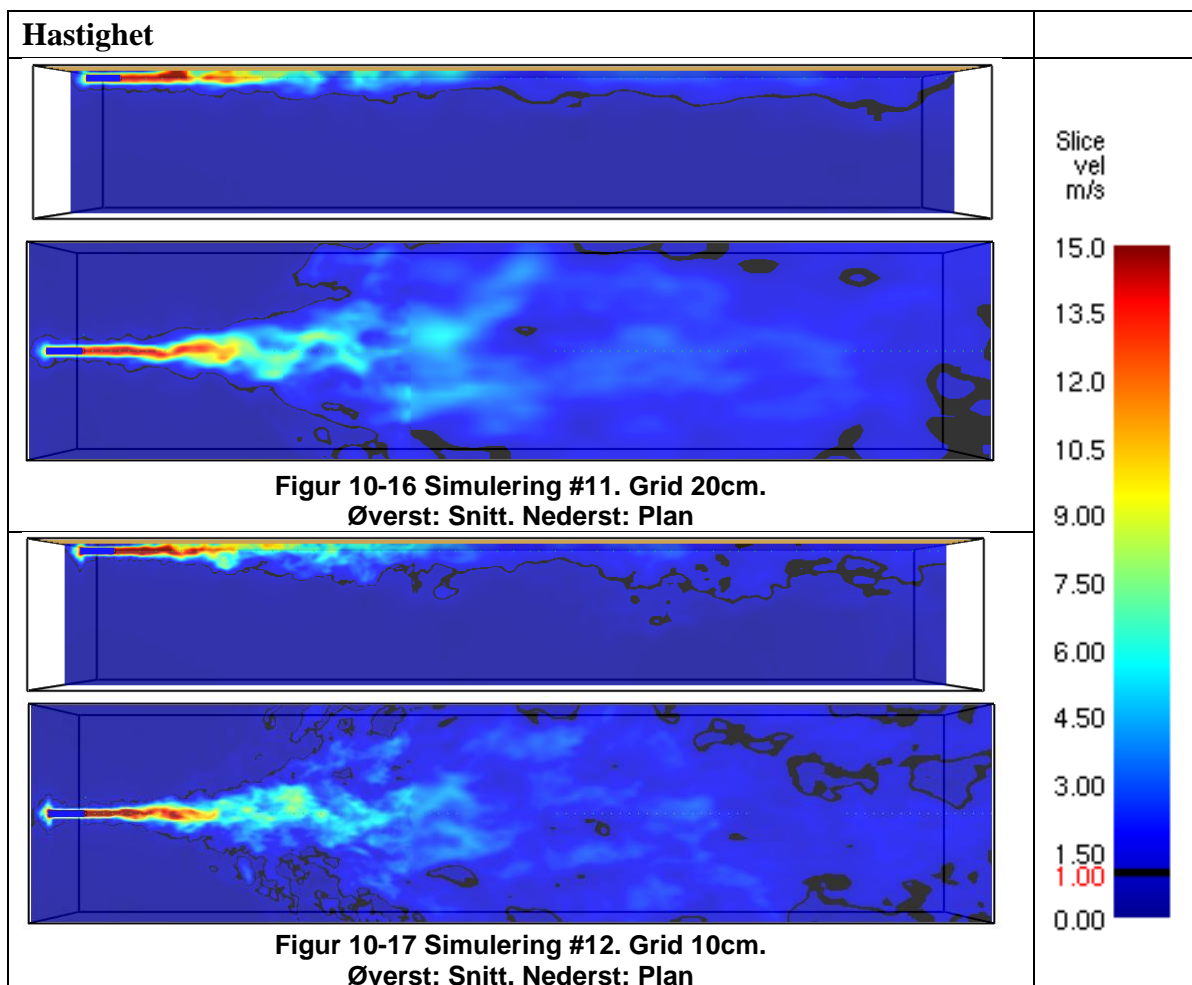
Tabell 10-2 Sammenstilling av simuleringer med jetvifte nært taket

Simulering #	Turbulensmodell	20 cm grid	10 cm grid
11	dynamisk	x	
12	dynamisk		x

### 10.1.3 Resultat



Figur 10-15 Hastighet som funksjon av avstanden fra jetviften, valideringsforsøk #11-12



Simulering #11 og 12 er presentert med grafiske snitt som viser hastighetsprofilen og grafer som viser de registrerte måleverdiene fra simuleringene. Hastighetsnittene er tatt fra to vinkler som går gjennom jetviftens senterakse i y- og z- retning. Snittene viser hastighetsprofilen etter 60 sekunder og er et øyeblikksbilde, dvs at de ikke er midlet over et gitt tidsintervall. Ved å presentere snittene uten midling ser vi forskjellen på hvor nøyaktig de to forskjellige gridstørrelsene klarer å representere turbulensen. Måleverdiene i grafene er midlet over ti sekunder for å glatte ut kurvene. På samme måte som i forrige serie av forsøk er det kun x-komponenten av hastigheten som presenteres i grafene mens det er den totale hastigheten som vises i snittene. De empiriske verdiene er beregnet med ligning (10.1), der korreksjonenskonstanten  $F$ , er satt til 1,4, et tall som er funnet ved å benytte grafen som er gjengitt i vedlegg 2 med  $D/\sqrt{A_0} = 0,4$ .

### **10.1.3.1 Diskusjon**

Simuleringene med 10 respektive 20 centimeters gridstørrelse ga samsvarende resultater. 10 centimeters gridet gir en noe bedre oppløsning av turbulensen sammenlignet med 20 cm grid. Den generelle spredningen og hastighetsfordelingen er likevel lik for de to forsøkene. Den vertikale spredningen er også lik for begge gridene. Ved å sammenligne snittene sett fra siden, fremgår forskjellen med Coanda-effekten tydelig. Simulering #11 og #12 har mye mindre vertikal spredning sammenlignet med fritt strømmende jet. I stedet sprer jeten seg langs med taket sideveis.

Forskjellen i vertikal spredning viser seg i form av økte hastigheter i senterlinjen på viften, se Figur 10-15. «Core jet» uteblir ved disse forsøkene, noe som også er observert ved de tidligere simuleringene. Det kan kanskje skyldes at gridoppløsningen ikke er fin nok nært viften der de største hastighetsgradientene er.

### **10.1.3.2 Konklusjon**

Griden på 10 cm og den på 20 cm avviker noe de første 12 meterne men konvergerer deretter. Som nevnt tidligere har den lille forskjellen i nærheten av viften lite å si hvis det store strømningsbildet er likt. Det er oppnådd en tilstrekkelig grid-uavhengig løsning for formålet med simuleringen. Simuleringene stemmer overens med de empiriske ligningene fra «Ventilation of Buildings» (85). Det konkluderes dermed, som i forrige avsnitt, at Fire Dynamic Simulator 5 kan benyttes for simulering av jetvifter også nær taket med den forenklede geometrien og med relativt stor grid hvis den dynamiske Smagorinskymodellen benyttes.

Valideringen av jetviften har gitt gode resultater. Det gjenstår likevel å sammenligne med data fra virkelige vifter i en garasje. Dette vil neste avsnitt ta for seg gjennom verifisering av en jetvifte.

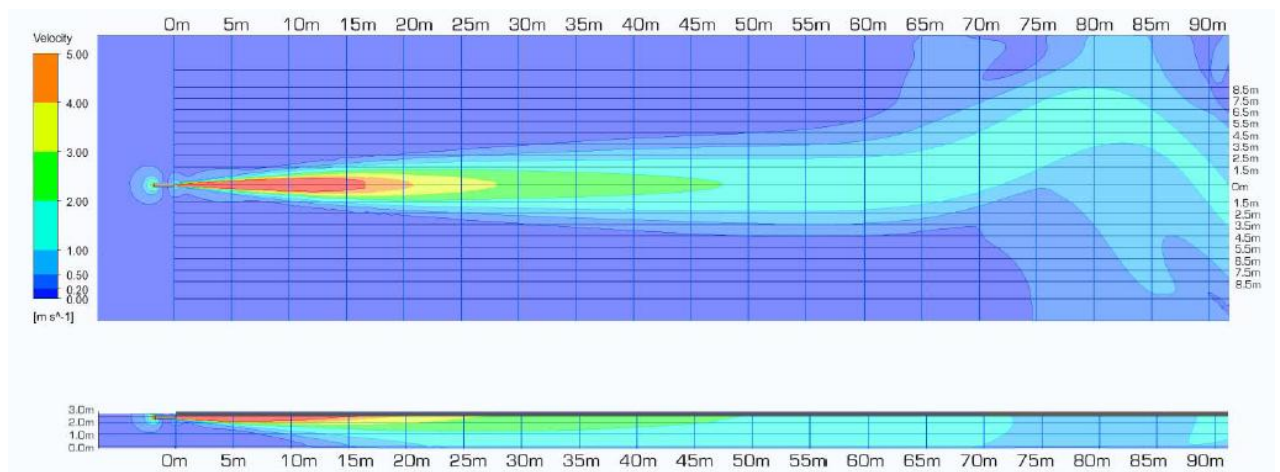
## 10.2 Verifisering av simuleringer av jetvifter

På grunn av at takhøyden i garasjen kun er tre meter, vil jetstrålen påvirkes av Coanda-effekten fra både tak og gulv. Det er derfor mulig at det vil være høyere hastigheter i simuleringen sammenlignet med de empiriske modellene.

For å løse dette er simuleringene sammenlignet med underlag fra vifteprodusenten Fläktwoods, se Figur 10-18 og vedlegg 5.

Underlaget består av utdrag fra CFD simuleringer med programvaren CFX, som de benytter ved dimensjonering av garasjeventilasjon. Det har ikke vært mulig å oppbringe målte data på viftene fra produsentene, det vil derfor forutsettes at CFX simuleringene er validert av produsenten. Underlaget vil derfor bli benyttet for validering av FDS simuleringene i denne oppgaven.

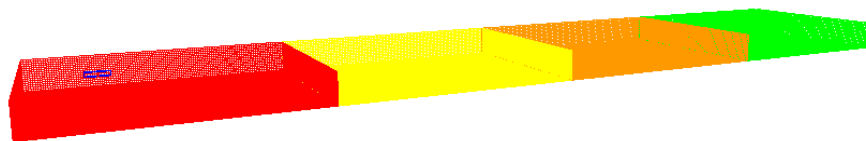
Produsenten hadde følgende oppsett i sin modell. RANS simulering med CFX, ustrukturert grid med 50mm cellestørrelse rundt viften og gradvis større cellestørrelse lengre unna. Jetviften var representert med en to meter lang sylinder med en diameter på 400 mm. Viften er representert av en flate med en trykkforskjell som gir luften en normal hastighetskomponent. Det er oppgitt at de har benyttet korreksjonsfaktorer for å kompensere for overestimerte hastigheter nære viften som skyldes måten viften er modellert på. Dette kan være å spesifisere en gitt turbulens ut fra viften. Veggene var åpne «zero pressure boundary», som tilsvarer «OPEN» i FDS. Simuleringene ble kjørt til «steady state». På grunn av de naturlige fluktuasjonene i en LES simulering, vil ikke resultatet av simuleringen bli et bestemt svar. I stedet vil en LES simulering måtte midles over tilstrekkelig tid for å få et resultat som er tilnærmet steady state.



**Figur 10-18 Simulering av 400mm jetvifte på full hastighet i CFX. Simuleringen er laget av Fläktwoods. For bedre kvalitet, se Vedlegg 5**



## 10.2.1 Oppsett



Figur 10-19 Beregningsdomene for simulering #09-19. Fire like store grid.

De første simuleringene er kjørt med 20 cm grid og et firkantet viftetverrsnitt på 400 x 400 mm. Dette gir en noe større tverrsnittsareal sammenlignet med et rundt tverrsnitt med diameter 400mm. De første simuleringene ble derfor gjennomført med en noe lavere hastighet (15,19 m/s) sammenlignet med produsentens simuleringer (19,36 m/s). Valget av hastighet førte til at fluksen gjennom de to viftene var lik. Forskjellen i hastighet har egentlig ikke noe å si egentlig i første fase, siden det er spredningen av viften som er av størst interesse. Spredningen er lik for både hav og hel hastighet, se Vedlegg 6.

Forsøksserien var ikke planlagt i sin helhet fra starten av, men det var en iterasjonsprosess for å prøve å etterligne produsentens simuleringer ved å forandre på parametere og geometri i FDS. Beregningsdomene som ble benyttet var det samme som i Fläktwoods sine simuleringer, se Figur 10-18. Dimensjonene var 3 meter takhøyde, 20 meter bredde, 90 meter lang foran viften og 7 meter bak viften, totalt 99 meter lang. Jetviften var i første simulering, #V01, plassert mot taket, men ble etter hvert flyttet nedover på grunn av manglende horisontal spredning av jeten. Det ble benyttet forskjellige oppsett av selve jetviften, de er spesifisert i Tabell 10-3 og illustrert i Figur 10-20. Grunnen til at den horisontale viften ble forsøkt benyttet var for å danne en horisontal hastighetskomponent på jeten for å etterligne en «louvered vent», se Figur 1-2.

Tabell 10-3 Sammenstilling av simuleringer med jetvifte nære taket. 20cm grid

Sim.#	Grid [cm]	Jetviftens avstand fra taket	Variant (Figur 10-20)	Tangentiell hastighet	Ekstra horisontal vifte	$U_o$ [m/s]
V01	20	0 cm	a	-		15,19
V02	20	20 cm	b	4,9m/s		15,19
V03	20	20 cm	c	4,9m/s		15,19
V04	20	20 cm	d	-	1,0 m/s negativ z	15,19
V05	20	40 cm	c	4,9m/s		15,19
V06	20	40 cm	d	-	1,0 m/s negativ z	15,19
V07	20	40 cm	d	-	0,5 m/s negativ z	15,19
V08	20	40 cm	d	-	0,8 m/s negativ z	15,19

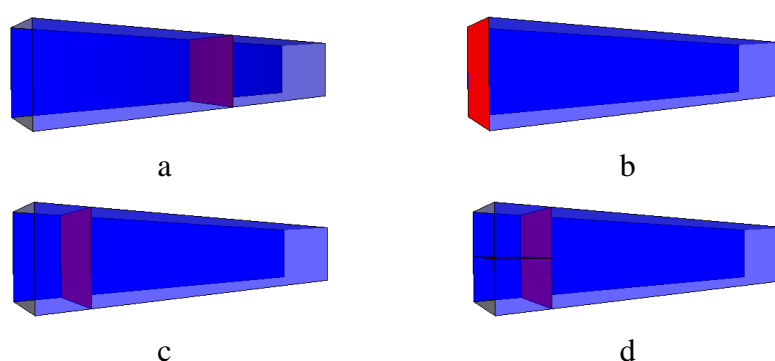
Simuleringene #V09-V11 er gjort med en noe mindre grid, 18cm. Ved å benytte 18cm grid ble arealet tilnærmet lik den virkelige viften. Det var derfor mulig å sette den virkelige hastigheten til viften, noe som førte til at viften i modellen ga den samme impulsen som den virkelige viften og simuleringene fra produsenten. Simulering #V10 er en verifisering for å se at resultatet var griduavhengig, gridstørrelsen var derfor halvert. Simulering #V11 er og en verifisering for å se om randbetingelsene hadde påvirket



resultatet i #V09. Denne simuleringen ble kjørt 540 sekunder og midlet over 100 sekunder ved tiden 440 s. Dette sikret en verdi som er tilnærmet lik en steady state løsning fra en RANS simulering. FDS input-fil for #V09 er gitt i vedlegg 11.

**Tabell 10-4 Sammenstilling av simuleringer med jetvifte nære taket. 9 og 18cm grid**

Sim. #	Grid [cm]	Jetviftens avstand fra taket	Variant (Figur 10-20)	Tangentiell hastighet	Kommentar	$U_o$ [m/s]
V09	18	36 cm	a	-		19,34
V10	9	36 cm	a	-		19,34
V11	18	36 cm	a	-	Dobbel bredde på beregningsdomenen.	19,34

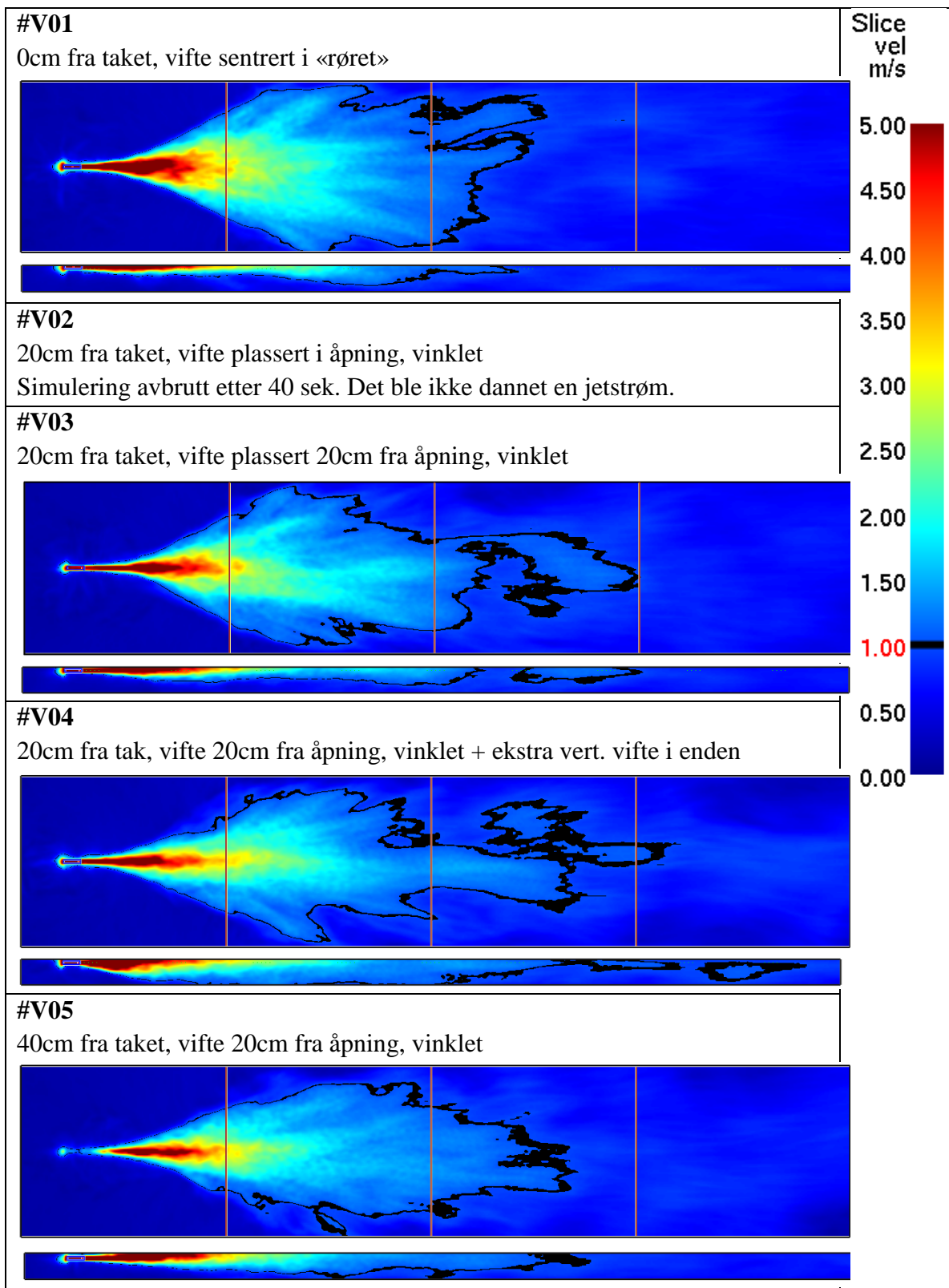


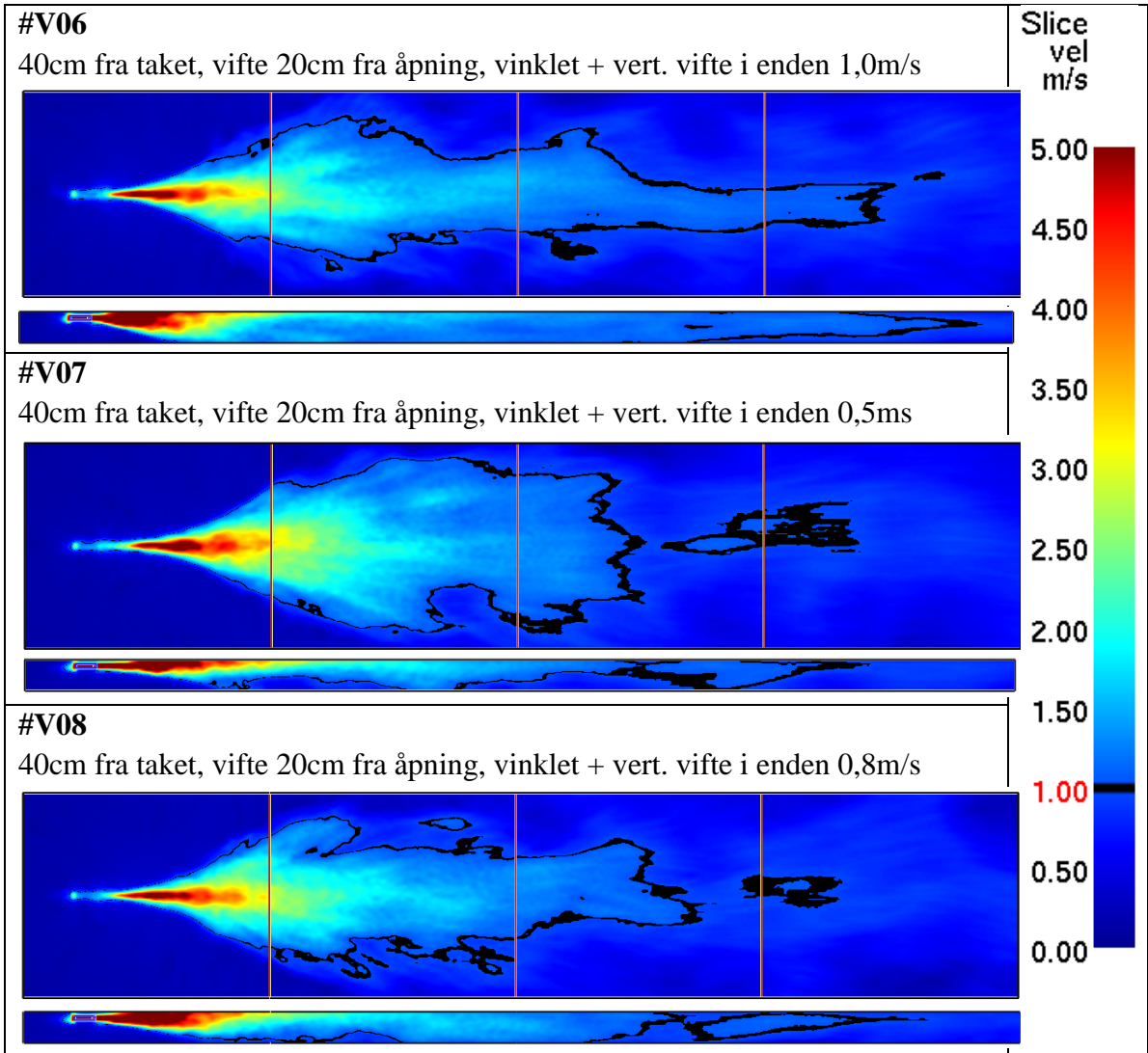
**Figur 10-20** Varianter av jetviften som ble undersøkt. Den røde skiven er flaten som representerer viften a) viften plassert i midten, b) viften plassert ved åpningen, c) viften plassert 20 cm inn fra åpningen, d) viften plassert 20 cm inn fra åpning. I tillegg er det en vertikal viften som gir en horisontal hastighetskomponent.

### 10.2.2 Resultat

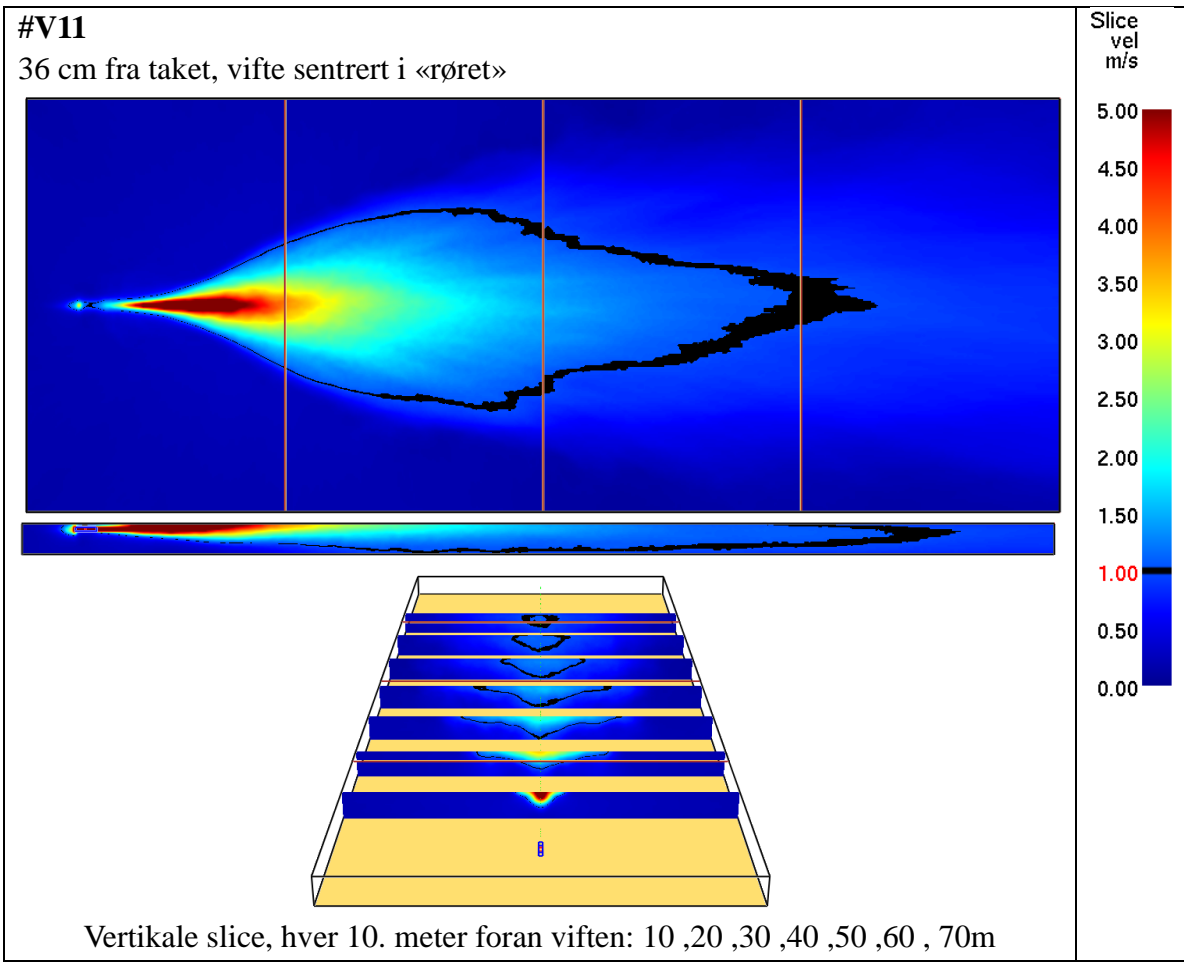
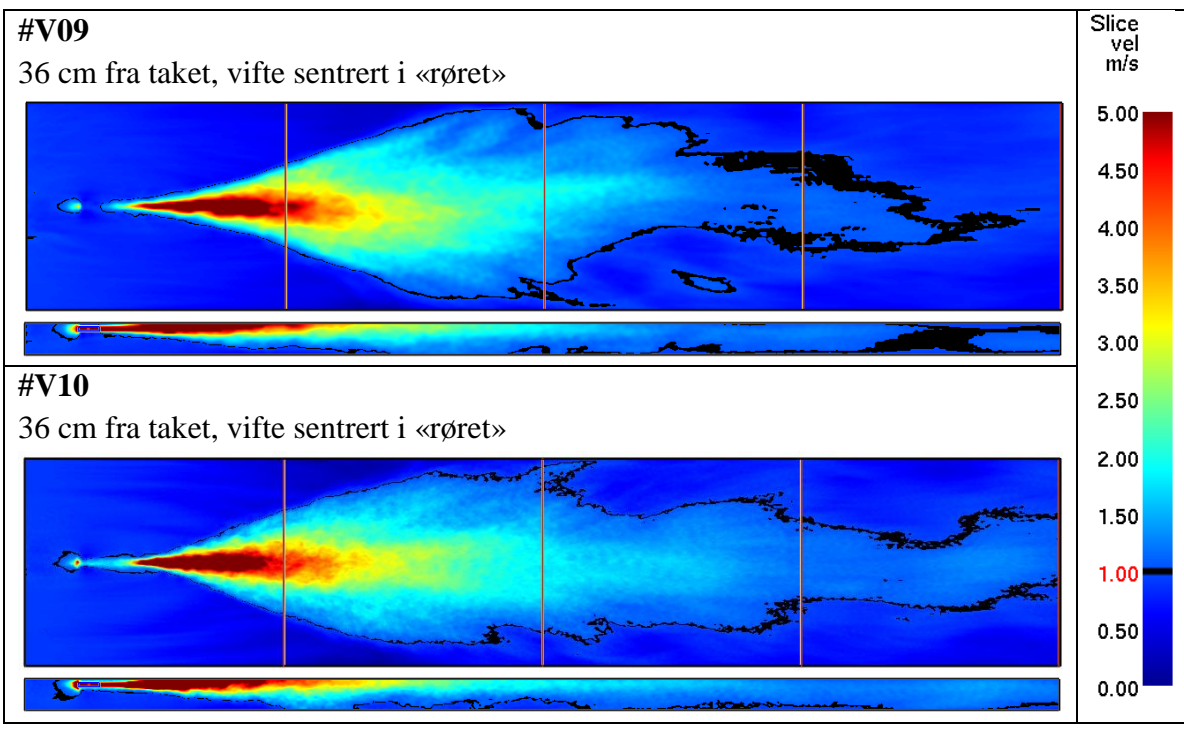
Resultatet av simuleringene illustreres med to hastighetsprofiler fra hver simulering. Hastighetsprofilene er tatt fra de samme posisjonene som underlaget fra produsenten (se Vedlegg 6). Posisjonene er rett ovenfra, 20 centimeter fra taket og snitt gjennom viften sett fra siden. Skalaen er den samme for alle simuleringene og er vist til høyre for profilene. For å lette tolking av dataene er det lagt en isolinje på 1 m/s på alle hastighetsprofilene.

Alle data er midlet over 20 sekunder for å få et bedre grunnlag til å sammenligne med RANS simuleringene som produsenten har gjort. Hver simulering ble stoppet etter 180 sekunder.





Bevart skyvekraft, 55N 19,4m/s 360mm diameter



### 10.2.3 Diskusjon

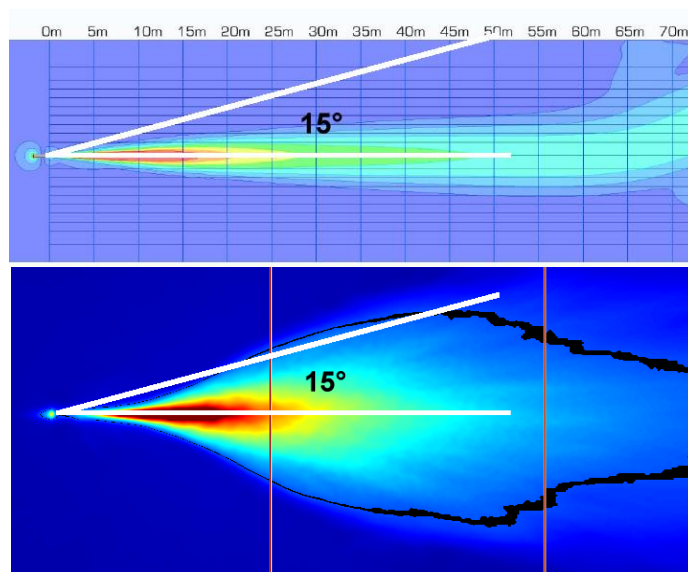
For å etterligne produsentens simuleringer var det nødvendig å tilpasse geometrien til griden. Hvorvidt det firkantete viftetverrsnittet påvirker jetstrømmen sammenlignet med et rundt viftetverrsnittet er ikke analysert. Den forutsettes derimot som liten i forhold til det store strømningsbildet.

De første simuleringene viste at hvis viften var plassert helt opp under taket så ville ikke jetstrømmen spre seg vertikalt. Dette kan skyldes den grove griden. På grunn av at tidsskrittet i simuleringen er avhengig av at CFL kriteriet er mindre enn 1, er det ønskelig å benytte et relativt grovt grid. Som tidligere beskrevet vil en halvering av gridstørrelsen medføre 16 ganger lengre beregningstid. Det ble derfor valgt å flytte viften ned fra taket for å få flere gridceller mellom de to. Sammenligning av simuleringene med hastighetsprofilene fra Fläktwoods viste at vifteplassering 36 cm under taket var mye bedre enn vifteplassering rett under taket.

I simulering #V04,06-08 ble det forsøkt å simulere effekten av en vinklet rist i enden av jetviften, slik som illustrert i Figur 1-2. Det var antatt at viften i CFX modellen var utstyrt med en slik rist. Ved kontakt med produsenten ble det derimot avklart å være feilaktige antagelser, og forsøk på å gjenskape risten i senere simuleringer ble derfor avbrutt.

For #V09-11 ble tverrsnittet på viften justert til 360 x 360mm, noe som førte til at arealet på viften ble tilnærmet lik det sirkulære tverrsnittet med 400mm diameter som de virkelige viftene har. Ved å sette hastigheten til 19,34 m/s ble det oppnådd den samme skyvekraften som den virkelige viften har.

Ifølge prEN/TS 12101-11:2012 (12) og boken «Ventilation in Buildings» (85) vil jeten fra en jetvifte spre seg med en vinkel på 15°. Dette er tegnet inn i Figur 10-21. Skalaene er ikke lik for de to figurene. Ifølge denne illustrasjon viser det seg at resultatene fra denne verifiseringen er mer riktig sammenlignet produsentens simuleringer. Det hadde derfor vært interessant å sammenligne data fra verifiseringsforsøk, alternativt foretatt egne kontrollmålinger i en riktig garasje for å kontrollere nøyaktigheten.



**Figur 10-21 15 graders spredning sammenlignet med resultatene. Fläktwoods simulering øverst, resultat fra simulering#19 nederst.**

### 10.2.4 Konklusjon

Det er noe uklart om underlaget fra Fläktwoods er «fasitsvaret» til disse beregningene. Som det ble nevnt i diskusjonen kan det stilles tvil om CFX simuleringene får den rette spredningen ut fra viften, siden den sprer seg veldig lite og ikke i nærheten av de 15° som beskrives i (49) og (85). Likevel ser den vertikale spredningen ut til å gjenspeile den fysiske virkeligheten bedre sammenlignet med den første simuleringen, #V01, siden den vertikale spredningen uteble helt i dette forsøket.

FDS klarer altså ikke å simulere spredningen korrekt når viften er plassert helt ved taket og med 20cm grid. Det vil antageligvis være behov for et finere grid nær takflaten på grunn av de store gradientene her. Dette har imidlertid stor innvirkning på simuleringstiden på grunn av CFL kriteriet (avsnitt 0). Ved å flytte viften ned fra taket i modellen gis en bedre vertikal spredning. Siden det ikke har vært mulig å sammenligne med målte data kan det ikke konkluderes med at dette avviket fra virkeligheten ikke vil påvirke resultatet. Dette gjelder særlig når garasjen har bjelker som viften skal sitte mellom og opp under taket.

Når en hel garasje med jetvifter skal simuleres over lengre tid, vil ikke en LES simulering være det rette valget. CFL kriteriet medfører at tidsskrittet i simuleringene blir meget kort, for 18 cm grid i #V09 var tidsskrittet 0,00745s og for 9cm grid i #V10 var tidsskrittet 0,00317s. Siden det i hovedsak er en steady state løsning vi er ute etter når et røykventilasjonsystem skal dimensjoneres, så vil en RANS simulering være mer gunstig. Det vil også være mulig å kjøre hele brannforløp med en tidsavhengig RANS simulering noe som eksempelvis vill ta over en uke på en god fire kjernes prosessor.

Det er nådd en griduavhengig løsning og den vertikale spredningen er tilfredsstillende i #V11 sammenlignet med Fläktwoods simuleringer. Jetviften er i tillegg verifisert for fritt strømmende jet og en jetstrøm langs et tak. Det velges derfor å fortsette med disse innstillingene, men med et ønske om å sammenligne med målte verdier fra en reell garasje for å undersøke om spredningen under taket er korrekt.

### 10.3 Simulering av forenklet garasje

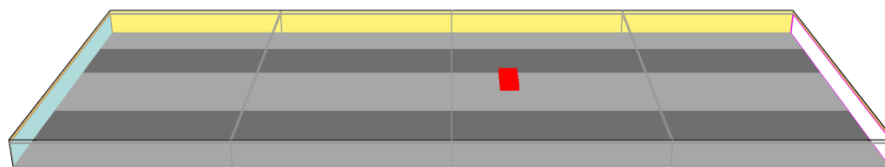
Disse simuleringene vil kontrollere de empiriske ligningene for beregning av lengde på tilbakestrømming av røyk som er presentert i avsnitt 3.2. De vil også bli brukt for å verifisere at den dynamiske turbulensmodellen gir de samme resultatene som den konstante. Simuleringene vil også underbygge en diskusjon rundt anbefalingene i VTEK om å unngå tilbakestrømming av brannrøyk, såkalt backlayering.

Simuleringene er gjennomført med en forenklet garasje der gavlveggene er fjernet, se Figur 10-22. Ved valget av geometrien er det tatt utgangspunkt i en garasje med to kjørebane og parkeringsplasser på hver side, og mellom, kjørebane. Siden en parkeringsplass er ca. 5 m lang og bredden på kjørebane er ca. 7 m, er bredden på den forenklete garasjen satt til 34 meter. Takhøyden i en garasje vil ofte være så lav som mulig for å minimere mengden masser som må graves ut under kjelleren. Det er valgt en takhøyde på 2,4 meter for disse simuleringene selv om det er vanlig med noe lavere takhøyde i parkeringskjellere. Lengden er satt til 80 meter. Totalt gulvareal er 2720m<sup>2</sup>.

På grunn av at simuleringen av sprinklere i FDS fortsatt er under utvikling er det valgt å ikke benytte denne funksjonen selv om den er tilgjengelig. Dette ville kunne påvirke lengden på tilbakestrømming av brannrøyk siden jeten vil bli nedkjølt og presset ned av vandråpene.

Versjonen av FDS, 5.5.3 r7031, som er benyttet i simuleringene er validert og verifisert med den konstante turbulensmodellen. Siden det tidligere i oppgaven er funnet ut at den dynamiske turbulensmodellen ga bedre resultater for simulering av jetvifter, er dette brukt videre. Dette viste seg derimot å skape store problemer med instabilitet i beregningene og ga feilaktige resultater når simuleringen inkluderte en stor brann. Problemet med instabilitet ble det etter hvert funnet en løsning for, men prosessen var meget tidkrevende.

#### 10.3.1 Oppsett



**Figur 10-22 Beregningsdomene: 80 x 34 x 2,4 m.  
Konstant hastighet på tilluften til venstre, høyre vegg er «OPEN».**

Det er valgt tre brannstørrelser ut fra hva som er benyttet som designbrann i standarder fra forskjellige land (se avsnitt 2.5.1), disse er presentert i Tabell 10-5. Betong er den vanligste overflaten i en parkeringsgarasje, det er derfor naturlig å velge dette som randbetingelse for vegger, gulv og tak. For å forsikre seg om at resultatene av en simulering er konservative har prEN/TS12101-11:2012 og NEN6098:2012 spesifisert at overflatene skal simuleres som adiabatisk. Det vil si at netto varmeflukt til flatene er null, noe som fører til at røyktemperaturen blir noe høyere siden den ikke kjøles av mot omgivelsene. Kevin McGrattan, som er en av utviklerne av FDS, skriver på brukerforumet at randbetingelsene «INERT» og «ADIABATIC» kun er for diagnostisering (86). Simuleringene vil likevel bli gjennomført med både randbetingelser

for betong og adiabatisk, slik at det er mulig å kontrollere hvilken innvirkning dette har på resultatet.

For å kontrollere at det ikke er noen forskjell mellom den konstante og den dynamiske Smagorinsky turbulensmodellen, vil simuleringene bli gjennomført med begge to. Det vil også bli gjennomført simuleringer med parameteren «FDS6=.TRUE.». Hva dette innebærer er beskrevet i avsnitt 9.4. Strålingsmodellen er slått av i programmet slik at det kun er konvektiv varmefluks fra brannen, noe som er funnet å gi gode resultater når randbetingelsen for flater er satt til adiabatisk (87). For FDS sin del vil dette si en besparing på 30% beregningstid. Andelen stråling er ikke forandret fra standardverdien 35%. Tilley et al (43) benyttet 34% som også er kravet i NBN S21-208-2:2006 (9). prTS/EN12101-11:2012 (49) og NEN6098:2012 (10) spesifiserer at andelen stråling skal settes til 30%. Når strålingsmodellen er deaktivert vil energien som skulle ha blitt avgitt som stråling forsvinne fra modellen. En lavere prosentandel stråling vil derfor føre til høyere andel konvektiv varmeavgivelse, noe som er mer konservativt.

Søfaktoren er ikke viktig ved disse simuleringene siden det er røykkontroll som skal undersøkes. Den er satt til 0,1 som er standardverdien for polyuretan i FDS. Alle simuleringene blir kjørt på samme gridet, se Tabell 10-6. Kontrollsimuleringer vil bli gjennomført med mindre cellestørrelse i Z-retning. Parametere og geometri som er benyttet i simuleringene er gitt i Tabell 10-6. For å unngå instabilitet i simuleringen er ventilasjon og brann satt til å øke til sin maksverdi i løpet av 15 sekunder. Dette skal ikke forveksles med den virkelige brannveksten, men er kun en praktisk løsning for å forhindre at simuleringen blir instabil når gradientene er for store.

Input-filen til #F03 Dynsmag betong, er gitt i vedlegg 12. Denne er representativ for de fleste simuleringene.

**Tabell 10-5 Brannstørrelse i simulering #F01-03**

Simulering	Branneffekt	Brannstørrelse
#F01	4 MW	10,0 m <sup>2</sup> (Tilsvarende 1 bil)
#F02	8 MW	25,0 m <sup>2</sup> (Tilsvarende 2 biler)
#F03	10 MW	32,5 m <sup>2</sup> (Tilsvarende 3 biler)

**Tabell 10-6 Sammenstilling av parametere og geometri for #F01-03**

<b>Generelt</b>	Geometri	80 x 34 x 2,4 m
	Cellestørrelse	0,18 x 0,18 x 0,18 m og 0,18 x 0,18 x 0,09 m
	Randbetingelser	Variere
	Tid	240 sekunder
<b>Brann</b>	HRR	4, 8 og 10 MW
	A <sub>f</sub>	10, 25 og 37,5 m <sup>2</sup>
	Avstand fra gulvet	0,54 m
	Brannvekst	15 sekunder (Kun for stabilitet)
	Brensel	Polyuretan
	Forbrenningsenergi	24 MJ / kg
	Søfaktor	0,1
<b>Ventilasjon - tilluft</b>	Hastighet	1 m/s over hele gavlveggen
	Temperatur	20 °C
<b>Ventilasjon avtrekk</b>	- Hastighet	Variere, skyldes overtrykk fra tilluft og brannen
	Ramp	15 sekunder (Kun for stabilitet)



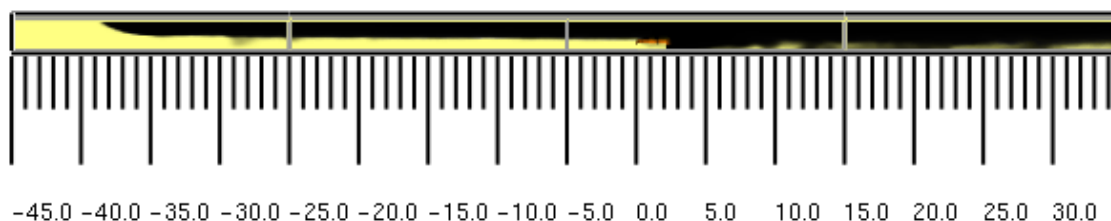
### 10.3.2 Resultat

Tabell 10-7 Resultater fra simulering #F01-03.  
Resultatene sammenlignes med empiriske beregninger fra avsnitt 3.2.

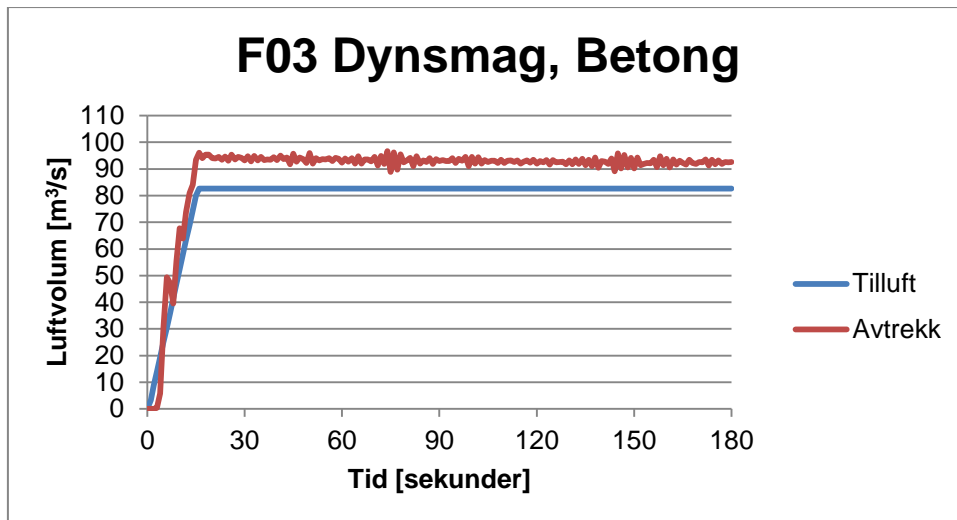
Sim.	$v_{cr,in}$ [m/s]	Empirisk beregning $d = 40(v_{cr} - v)$	Backlayering			
			Simulering			
			Konstant Smagorinsky		Dynamisk Smagorinsky	
			Betong	Adiabatisk	Betong	Adiabatisk
#F01	1,65	26,0 m	20 m <sup>380s</sup>	35 m <sup>380s</sup> Ikke steady state	22 m <sup>180s</sup> 22 m <sup>280s</sup>	22m <sup>180s</sup> 35m <sup>280s</sup> 39m <sup>380s</sup> (ikke steady state) >45 m * 380s
#F02	1,88	35,2 m	36 m <sup>380s</sup>	>45 m <sup>180s</sup>	35 m <sup>280s</sup>	>45 m <sup>180s</sup> >45 m * 180s >45 m <sup>280s</sup> TPA15 >65 m <sup>280s</sup> 20m ekstra >80 m <sup>280s</sup> 80m ekstra
#F03	1,95	38,0 m	39 m <sup>380s</sup>	>45 m <sup>180s</sup>	35 m <sup>380s</sup> 35 m * 380s	>45 m <sup>180s</sup>

\* Halvert cellestørrelsen i Z-retning

Resultatet av simuleringene er vist i Tabell 10-7. Verdiene er målt etter 380 sekunder og er ikke midlet. Ved 380 sekunder var det oppnådd en likevekt for alle simuleringene unntatt #F01 med adiabatisk randbetingelser. Simuleringene i likevekt endret seg kun i liten grad på grunn av naturlige fluktasjoner. Forskjellen mellom den konstante og den dynamiske Smagorinsky turbulensmodellen var liten. Ved å skifte randbetingelsen for vegg, gulv og tak fra betong til adiabatisk var det forventet at backlayering avstanden skulle bli noe lengre, imidlertid viste simuleringene at hele garasjen ble røykfylt for alle tre brannstørrelsene. For å kontrollere at randbetingelsen for veggen oppstrøms brannen ikke hadde påvirket resultatet, ble det gjennomført kontrollsimulering med #F02 med 80 meter ekstra lengde oppstrøms. Avstanden for tilbakestrømning av røyk var ved 280 sekunder 80 meter, men så ut til å røykfylle hele garasjen hvis den ikke hadde blitt avbrutt. Kontrollsimuleringer med finere grid (halvert gridstørrelse i Z-retning) ga tilsvarende røykfylling. Griduavhengig løsning var dermed nådd.



Figur 10-23 #F01 Dynsmag Adiabatisk. Snitt gjennom senteraksen på modellen. Tilluft på venstre side. Backlayering etter 380 sekunder. Simuleringen er ikke i steady state, røyken fortsetter bakover.



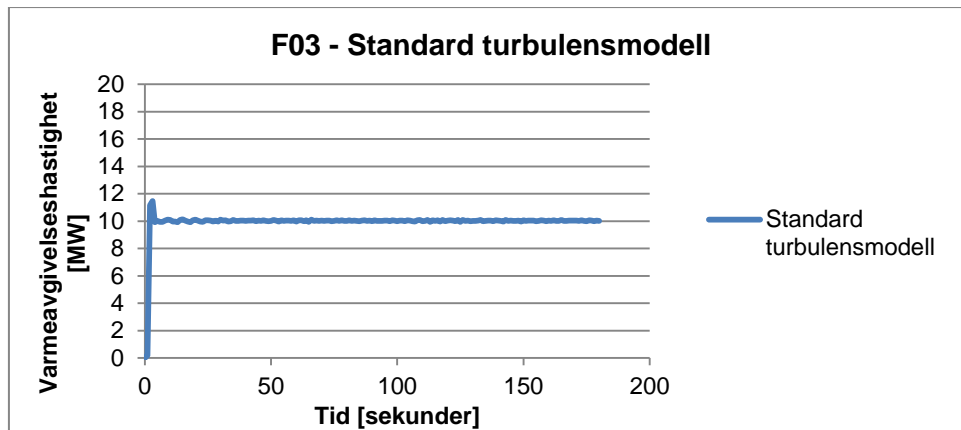
Figur 10-24 Forskjell på tilluft og avtrekk for #F03.

Tilluften i alle simuleringene var spesifisert til 1 m/s, dette tilsvarer totalt  $81,9\text{m}^3/\text{s}$ . Avtrekket er ca  $10\text{m}^3/\text{s}$  høyere, som tilsvarer en gjennomsnittlig økning på hastigheten med  $0,12\text{m}/\text{s}$ . Forskjellen mellom tilluft- og avtrekk, skyldes volumøkningen luften får når den blir varmet opp og produktene fra forbrenning. For at massebalansen skal stemme må derfor volumet ut være større enn volum inn for at det ikke skal bygges opp et overtrykk. Forskjellen på tilluft- og avtrekk er vist i Figur 10-24.

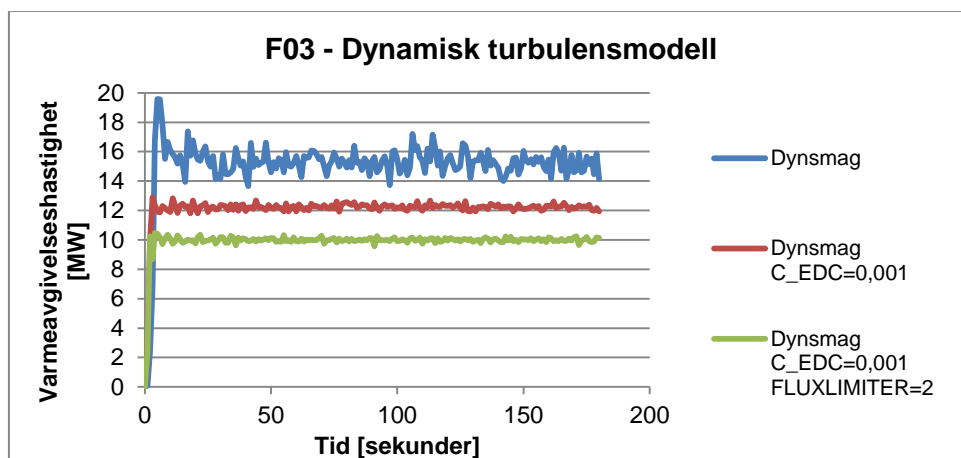
### 10.3.3 Diskusjon

Noe som ikke ble klart før enn sent i oppgaven var problemer med forbrenningsmodellen når den dynamiske turbulensmodellen ble benyttet. #F03 er brukt som eksempel for å illustrere problemet, se Figur 10-25 og Figur 10-26. 10MW var spesifisert med  $37,5\text{m}^2$  brannareal og HRRPUA lik  $266,7\text{kW}/\text{m}^2$ . Dette førte til korrekt HRR med den konstante Smagorinsky turbulensmodellen, men resulterte i alt for høy HRR (nesten 6MW for mye) og fluktuasjoner på over 2MW for den dynamiske turbulensmodellen. Reaksjonshastigheten mellom brensel og oksygen er i FDS, basert på semi-empiriske ligninger for å bestemme blandingen mellom brensel og oksygen i en gridcell i et gitt tidsskritt (55). Teorien er at den dynamiske turbulensmodellen gir mye mer turbulens, slik at tidsskrittet for å bestemme reaksjonshastigheten blir for stort (88). Dette medfører at brannen blir ustabil og får store variasjoner i HRR. Ved å justere konstanten  $C\_EDC$  fra standard verdien på 0,1 til 0,001 forkortes tidsskrittet 100 ganger slik at forbrenningen oppdateres raskere. Dette ga bedre resultat, men HRR var fremdeles 2MW for høy, se den røde kurven i Figur 10-26.

Det viste seg etter hvert at problemet skyldes måten FDS korrigerer for fluks av skalare størrelser. Dette er nærmere beskrevet i FDS Technical Reference Guide vol 1 (66). Det kan kort beskrives med at FDS benytter seg av en «prediction – correction scheme» slik at programmet estimerer verdien i neste celle og etterpå kontrollerer og justerer verdien. Hvis det ikke spesifiseres i modellen, benyttes sentraldifferanse-metoden som standard (89). Denne egner seg ikke for simuleringer med den dynamiske turbulensmodellen (90), det må derfor spesifiseres en annen metode. FDS Technical Reference Guide vol 1 (66) angir fem andre metoder, og anbefaler «Superbee» for LES simulering, som aktiveres ved å sette  $FLUX\_LIMITER=2$ . Simuleringene med «Superbee» ga den korrekte varmeavgivelseshastigheten, og ble derfor benyttet videre i oppgaven.



Figur 10-25 Varmeavgivelses hastighet for #F03 med standard Smagorinsky turbulensmodell



Figur 10-26 Varmeavgivelses hastighet for #F03 med dynamisk Smagorinsky turbulensmodell for tre forskjellige innstillinger.

Den lille toppen helt i starten på kurvene i Figur 10-25 og Figur 10-26 skyldes at det i disse simuleringene ikke var spesifisert at brannen skulle vokse i løpet av en gitt tid, men var satt på 10MW helt fra starten av. Resultatene videre er basert på simuleringer der brannen og ventilasjonen øker til sin maksverdi i løpet av 15 sekunder.

Samtlige simuleringer med parameteren «FDS6=.TRUE.» ble avbrutt på grunn av numerisk instabilitet, selv om FLUX\_LIMITER=2 er standard når «FDS6=.TRUE.». Det ble ikke funnet årsaken til disse problemene. De andre simuleringene var vellykket slik at det likevel var mulig å benytte den dynamiske turbulensmodellen.

I simuleringene var brannen plassert på en 56cm høy boks, avstanden mellom brannen og taket var i underkant av 2m. Ved å beregne den teoretiske flammehøyden med Heskestads ligning (10.2), viser resultatet at til dels stor del av forbrenningen vil inntreffe når branngassene strømmer langs taket. Ifølge Tilley et al. (43) resulterer dette til i at flammen ikke får utviklet maksimal oppdrift noe som gjør at «ceiling jet» ikke får like høy hastighet. Dette fører til at backlayering blir mindre når avstanden mellom brannen og taket blir mindre. De empiriske ligningene baserte seg på 2,4 meter takhøyde og forutsatte i sin standard-konfigurasjon at brannen var plassert på gulvet. I disse simuleringene var brannen plassert 56 cm fra gulvet, slik at en noe lavere verdi på

avstanden for backlayering var forventet. I tillegg er de empiriske ligningene vurdert som konservative (43).

$$L = -1,02D + 0,235\dot{Q}^{2/5} \quad (10.2)$$

Oppsettet ligner på simuleringene i (43) men bredden er omtrent det doble. En annen potensielt viktig forskjell er randbetingelsene for ventilasjon. I simuleringene fra Tilley et al. (43) er det angitt en konstant avtrekkshastighet, tilluften ble tilført gjennom randbetingelsen «OPEN» slik at den varierte med undertrykket i garasjen. I disse simuleringene var dette det motsatte. Hvorvidt dette påvirker resultatene er ikke undersøkt.

Tilley et al. (43) brukte FDS 5.2.5 for sine simuleringer, en eldre versjon sammenlignet med FDS 5.5.3 r7031 som er benyttet for disse simuleringene. En viktig forskjell er måten de håndterer strømninger nær parallelle hindringer på, slik som vegger og tak. I FDS 5.4.0 ble den gamle veggmodellen skiftet mot Werner-Wengle veggmodellen (91) siden den gav bedre resultat uten at den krevde mer beregningstid (92). Dette kan spille inn på resultatene i Tabell 10-7 siden de empiriske ligningene er resultatet av simuleringer med den gamle veggmodellen. Dette har ikke blitt videre undersøkt.

Forskjellen mellom å bruke adiabatisk eller betong som randbetingelse for overflatene var stor og uventet siden Deckers et al. (58) beskrev forskjellen på backlayering for de to som liten. Forskjellen mellom de to skyldes nedkjøling av røyken. Med den adiabatisk randbetingelsen vil ikke røyken kjøles av mot taket, noe som får den til å strømme lengre mot ventilasjonsretningen før den blir stoppet opp. Betongoverflaten vil etter hvert bli gradvis varmet opp. Avkjølingen av røyksjiktet vil derfor være størst i starten av simuleringen men vil avta etter hvert som overflaten blir varmet opp. Når betongoverflaten er varmet opp bør simulering med både adiabatisk og betong randbetingelse teoretisk sett gi det samme resultatet. Det ble gjennomført en kontrollsimulering med #F03 Dynsmag Betong, der simuleringstiden ble økt til 20 minutter. Dette forandret ikke avstanden på backlayering slik som antatt. Tilbakestrømmingen av røyk nådde steady state etter 4 minutter og ble der resten av simuleringen.

Resultatet med den dynamiske og den konstante turbulensmodellen overensstemte godt. Simuleringene med adiabatisk randbetingelser fylte garasjen og overensstemte ikke med de empiriske ligningene. Selv ikke finere grid viste noen forandring i resultatet. Kontrollsimuleringen med 20 m større avstand til veggen oppstrøms viste at selv denne store garasjen ville bli røykfylt slik at avstanden for backlayering var mer enn 65 meter. Dette er det dobbelte av avstanden fra de empiriske ligningene. For å finne ut om backlayering ville stoppe, ble det gjennomført simulering der beregningsdomenen ble forlenget med 80 meter sammenlignet med standardkonfigurasjonen. Selv denne garasjen var på vei å bli røykfylt, men ble avbrutt etter 280 sekunder. Backlayering var da 80 meter, uten tendenser til å bli bremsset.

Tilley et al (43) hevdet at de hadde nådd en steady state løsning etter 180 sekunder. Deres måleresultat var tatt som gjennomsnittet mellom 160-180 sekunder. Simuleringene med den minste brannen, #F01, gav den samme backlayering som de empiriske ligningene etter 180 sekunder. Fortsatt simulering viste at simuleringene med betong var i steady state, men de adiabatisk simuleringene fortsatte å bevege seg sakte bakover. Etter 380

sekunder var garasjen røykfylt. For #F02 og #F03 med adiabatisk randbetingelse, var garasjen røykfylt allerede ved 180 sekunder.

Resultatene tilsier at Tilley et al (43) muligens har simulert for kort tid for at steady state skal være nådd. Kontrollsimuleringer med andre versjoner av FDS hadde vært nyttig for å avklare om problemet skyldes forskjell i veggmodell eller om Tilley et al (43) har stoppet sine simuleringer med de store brannene for tidlig. Tilley et al (43) har ikke spesifisert et gyldighetsområde for ligningene. Det kan også ha vært for stor forskjell mellom den kritiske ventilasjonshastigheten og hastigheten på tilluften, slik at simuleringene var utenfor gyldighetsområdet for de empiriske ligningene.

Det er også interessant at simuleringene med betong som randbetingelse og strålingsmodellen avslått, overensstemte godt med de empiriske ligningene, når de egentlig burde ha vært et ikke-konservativt valg på grunn av den store nedkjølingen.

Selv om geometrien ser triviell ut har det vært en lang prosess med prøving og feiling. Det ble over 20 mislykkede simuleringer der forskjellige parametere ble testet ut, før de endelige resultatene var klare. Variasjon av parametere så som høyde og bredde i garasjen er allerede gjennomført av Tilley et al (43). Dette er derfor ikke videre undersøkt.

#### **10.3.4 Konklusjon**

Tilley et al (87) skriver at oppvarming av tak og vegger i hovedsak skjer gjennom stråling. For å unngå store usikkerheter med strålingen, kan strålingsmodellen deaktiveres. Hvis ikke randbetingelsene endres til adiabatisk vil store andeler av energien fra brannen gå med til å varme opp vegger og tak. Konklusjonene er, at det bør benyttes adiabatisk randbetingelse for å unngå usikkerheter med strålingsmodellen, spare beregningstid og sikre et konservativt resultat. Dette er også krav i flere standarder når strålingsmodellen er slått av (12) (10). Hvorvidt denne adiabatisk randbetingelsen fungerer som forutsatt er noe uklart etter denne serien av forsøk. Det må videre undersøkelser med høyere ventilasjonshastighet for å se om det er mulig å stoppe røyken.

Hvis det likevel er ønskelig å simulere med betong som randbetingelse må det gjennomføres simuleringer med helt brannforløp for å sikre at taket blir varmet opp på korrekt. Det vil også være nødvendig å simulere med strålingsmodellen slik at taket får den riktige oppvarmingen. For å sikre gode resultater må antallet «radiation angles» i FDS økes betraktelig fra grunninnstillingen 104.

Både simuleringer og de empiriske ligningene viser at det ikke vil være tilstrekkelig med en lufthastighet på 1 m/s for å forhindre backlayering. Selv med det ikke-konservative valget av betong som randbetingelse og deaktivert strålingsmodell var det ikke mulig å forhindre backlayering. Den nåværende anbefalingen i VTEK er at røykventilasjon er et tiltak som må til når garasjen ikke er sprinklet og over en viss størrelse. Det må derfor antas en brann på 10MW med et brannareal på 37,5m<sup>2</sup>. Denne brannen krever en betydelig større ventilasjonshastighet om backlayering skal forhindres slik som VTEK er formulert i dag, eller begrenses til 15 meter som er kravet i prEN/TS12101-11:2012 og NEN6098:2012.

Et salgsargument fra produsenter av jetvifter er at det er mulig å gå ned på ventilasjonskapasitet på tilluft og avtrekk når jetvifter er installert på en korrekt måte. Det vil derfor undersøkes videre i neste serie med forsøk i en hel garasje.

## 10.4 Simulering av garasje med tilluft, avtrekk og jetvifter

Randbetingelsene har mye å si for resultatet. En virkelig parkeringskjeller vil ikke ha åpne vegger slik som den forenklete garasjen i forrige avsnitt. Det vil derfor gjennomføres simuleringer med den samme geometrien, men med lukkede vegger i endene på garasjen. På grunn av at backlayering skyldes ceiling jet fra brannen vil det være gunstig med en høyere hastighet nær taket, slik at røyken bremses tidligere. Tillufts- og avtrekksviftene plasseres derfor høyt opp på veggen slik at hastigheten nærmest taket blir høyere enn ved gulvet. Det vil også gjennomføres simuleringer med jetvifter montert i taket slik at hastighetene nær taket blir enda høyere. En annen passiv måte å bremse «ceiling jeten» fra en brann på, er ved å benytte tverrgående bjelker i taket. Dette vil også simuleres og sammenlignes.

I litteraturstudien ble det avdekket noen uklårheter som bør undersøkes nærmere. En av disse var effekten av andre biler i garasjen. Tilley et al. (43) ville ikke ta stilling til om det var konservativt eller ikke å simulere uten andre biler. Jangi et al. (51) rapporterte at en bil parkert oppstrøms brannen fører til kompliserte strømningsmønster og lengre tilbakestrømning av røyk. Sannsynligheten at det begynner å brenne i en bil i en garasje er mye større når garasjen er full sammenlignet med når den er tom. Det vil derfor, i denne omgangen, gjøres simuleringer der garasjen er helt full av biler.

Fra forrige avsnitt ble det klart at det var store forskjeller mellom randbetingelsen adiabatisk og betong. Det vil derfor kontrolleres om forskjellen mellom de to, er like stor med dette oppsettet.

Plassering av jetvifter og valg av ventilasjonskapasitet på avtrekket er valgt i henhold til vedlegg D – «*Horisontal ventilation – Design of a Jet Fan System without using CFD analysis*» i prEN/TS12101-11:2012. Selv om dette kun er et utkast til den ferdige standarden gir det likevel en konservativ pekepinn på hvordan det bør gjøres. Det er også valgt en vifteplassering som er i henhold til anbefalinger gitt i simuleringsunderlaget fra Fläktwoods (tidligere brukt ved verifisering av jetvifte-simulering i avsnitt 10.2).

### 10.4.1 Oppsett

Geometrien i disse simuleringene er den samme som er benyttet tidligere. Brannen er satt til 10MW men et brannareal på  $37,5\text{m}^2$  i henhold til konklusjonen i avsnitt 5.1. Detaljert beskrivelse av innstillinger er sammenstilt i Tabell 10-8. Det vil bli gjennomført en parametervariasjon i henhold til Tabell 10-9. Parametrene som varieres er avtrekkshastigheten, plassering av jetvifter, plassering av brannen, tilstedeværelsen av biler og bjelker. Totalt er 20 simuleringer gjennomført. Målet for simuleringene er ikke å finne noen eksakte tallverdier, det er i stedet ønskelig å gjøre generelle observasjoner som grunnlag for diskusjon rundt nåværende standarder og som innspill til fremtidige simuleringer.

Input-filene til FDS for #G12, #GB03 og #GC06 er gitt i vedlegg 13, 14 og 15. Disse tre simuleringene viser kombinasjoner av de fleste parameterene slik at de andre simuleringene er variasjoner av disse.

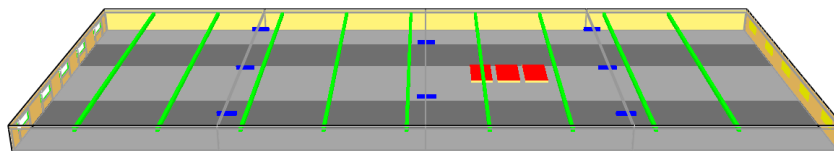
Tabell 10-8 Sammenstilling av parametere og geometri for #G01-12 og #GB01-03

<b>Generelt</b>	Geometri Cellestørrelse	80 x 34 x 2,5 m 0,18 x 0,18 x 0,18 m
	Randbetingelser Tid	Kontroll med 0,18 x 0,18 x 0,09 m Adiabatisk, Betong og «OPEN» 240 sekunder
<b>Brann</b>	HRR A <sub>f</sub> Brannvekst Brensel Forbrenningsenergi Sotfaktor	10 MW 3stk: 2,5 x 5m = 12,5m <sup>2</sup> 60 sekunder (Kun for stabilitet) Polyuretan 24 MJ / kg 0,2
<b>Sikt</b>	MASS_EXTINCTION_COEFFICIENT VISIBILITY_FACTOR (C)	8700 m <sup>2</sup> /kg (standard) 3 (standard)
<b>Ventilasjon - tilluft</b>	Hastighet  Areal Temperatur	Styres av undertrykk som skapes av avtrekket Randbetingelse: «OPEN» 16,3m <sup>2</sup> 20°C
<b>Ventilasjon - avtrekk</b>	Hastighet Areal Ramp	Varies, se for hvert forsøk 16,3m <sup>2</sup> 15 sekunder (For stabilitet)
<b>Ventilasjon - jetvifter</b>	Hastighet Dimensjoner Avstand fra tak Skyvekraft Ramp Merknad	19,39 m/s 2 x 0,36 x 0,36 m 0,36 m 55 N 15 sekunder (For stabilitet) 3 forskjellige konfigurasjoner, beskrevet i Figur 10-37, Figur 10-38 og Figur 10-39
<b>Biler</b>	Geometri – To bokser  Merknad	Underdelen - Bredde: 1,8m - Lengde: 4,86m - Høyde: 0,54m Overdelen - Bredde: 1,8m - Lengde: 3,5m - Høyde: 0,72m «Bilene» er hevet 18cm over gulvet
<b>Bjelker</b>	Dimensjon Avstand mellom bjelker	0,36 x 0,36m 8m
<b>Materialdata Betong</b>	Kilde Spesifikk varmekapasitet Varmekonduktivitet Densitet	Pyrosim <b>MER</b> 1,04 J / kgK 1,80 J / mK 2280 kg / m <sup>3</sup>

Tabell 10-9 Beskrivelse av innstillinger for hver enkelt simulering.

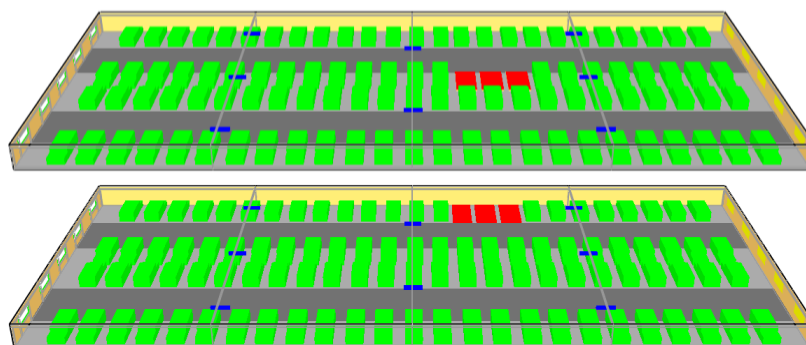
Sim. #	Randbetingelse		Hast. avtrekk [m/s]	Plassering av brannen		Jetvifter	Biler	Bjelker
	Adiabatisk	Betong		Figur 10-27 I Midten	Ved veggen			
G01	X		1,0	X		-	-	
G02	X		1,3	X		-	-	
G03	X		1,3		X	-	-	
G04	X		1,3		X	-	Ja	
G05	X		1,0	X		Konfig 1	-	
G06	X		1,0		X	Konfig 1	-	
G07	X		1,0	X		Konfig 2	-	
G08	X		1,0		X	Konfig 2	-	
G09	X		1,0	X		Konfig 2	Ja	
G10	X		1,0		X	Konfig 2	Ja	
G11	X		1,0	X		Konfig 3	-	
G12	X		1,0	X		Konfig 3	Ja	
G13	X		2,0		X	-		
GC03		X	1,3		X	-	-	
GC06		X	1,0		X	Konfig 1	-	
GC08		X	1,0		X	Konfig 2	-	
GC13		X	2,0		X	-	-	
GB01	X		1,3	X		-	-	X
GB02*	X		1,3	X		-	-	X
GB03	X		1,0	X		Konfig 2	-	X

\* Halvert cellestørrelsen i Z-retning

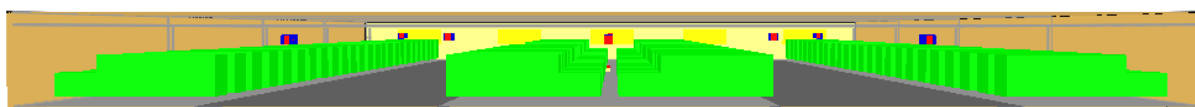


Figur 10-34 #GB03 Bjelker i taket, viftekonfigurasjon 2

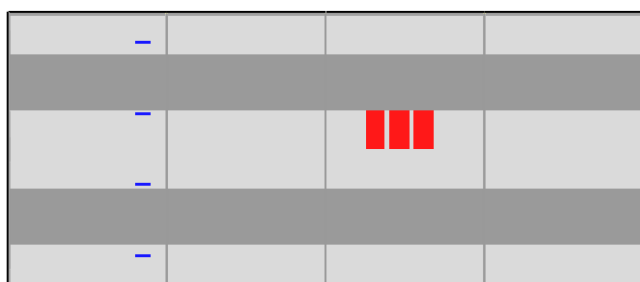




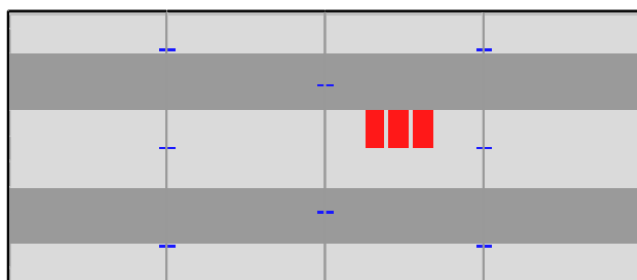
**Figur 10-35 Garasjen fylt med biler.**  
**Over: #G09. Brann i midten, viftekonfigurasjon 2.**  
**Nede: #G10. Brann ved veggen, viftekonfigurasjon 2**



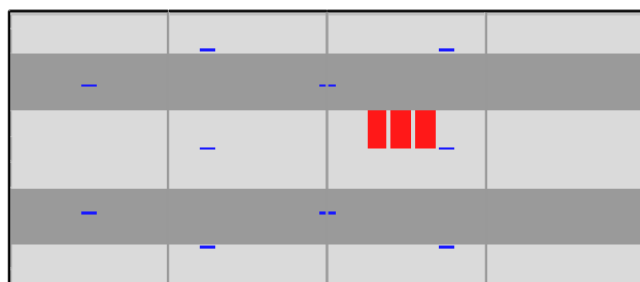
**Figur 10-36 #G09 Tverrsnitt av modellen. Bilene er parkert med fronten mot veggen og mot midten. Avstand mellom tak og vifte er 36cm.**



**Figur 10-37 #G05 Konfigurasjon 1.**  
 Viftene er plassert 17 meter fra bakre veggen. Avstanden mellom viftene er i henhold til anbefalinger fra det samme dokumentet som verifisering av jetviftene ble sammenlignet mot. Bredden mellom viftene er 9 meter. Den samme anbefalingen angir også 70 meter avstand til viften foran. Dette er oppfylt i og med at avstanden til avtrekket er 63 meter.



**Figur 10-38 #G07 Konfigurasjon 2**  
 Rekkene med viftene er plassert med 20 meters avstand i lengderetningen. Bredden mellom viftene er 16m for de i midten og 12,6m for de andre. Avstand til bakre veggen er 20 meter.



**Figur 10-39 #G11 Konfigurasjon 3**  
 Bredden mellom viftene er det samme som for Konfigurasjon 2. Avstand fra den bakre veggen er 10m, avstand i lengderetningen er 15m mellom hver rad med vifter. Dette oppsettet er i henhold til anbefalinger i prEN/TS12101-11:2012 (12). Det angis det at 30 meter mellom to vifter i lengderetningen er sikkert. Avstanden i bredden er maks 16 meter, dette er også oppfylt. Anbefalingen gjelder kun 50N jetvifter.

## 10.4.2 Resultat

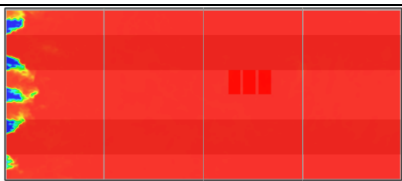


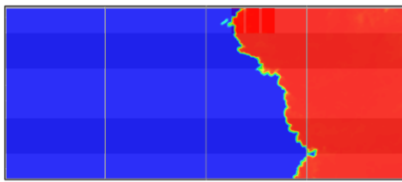
Følgende figurer viser sikten i 2 meters høyde, mot en grå overflate, etter 240 sekunder. På grunn av den høye sootfaktoren vil det nesten uansett være dårlig sikt hvis det er røyk til stede. Figurene viser derfor på en klar måte hvor lang backlayering simuleringene resulterte i. De blå områdene er røykfrie, de røde er røykfylte.

Resultatene er sammenstilt slik at hver parameter presenteres hver for seg for å enklere se gjennomgående trekk.

### ➤ Lufthastighetens innvirkning på backlayering.

Denne parameteren er allerede presentert i avsnitt 10.3 men er ikke med disse randbetingelsene. På grunn av at ikke alle parametere ble sjekket opp mot hverandre er det to tomme celler i tabellen. Det er tydelig forskjell på resultatene i Tabell 10-10. Kravet med 10-15meters backlayering viser at ventilasjonshastigheten som kreves i avtrekket er mellom 1,3 og 2,0 m/s. Måten å angi mengden luft er i henhold til vedlegg D i prEN/TS12101-11:2012, se . Forskjellen mellom tilluft og avtrekk skyldes ekspansjon av luften på grunn av den økte temperaturen. Dette vises tydelig i Figur 10-40, tilluftsvolumet synker når varmeavgivelseshastigheten økes.

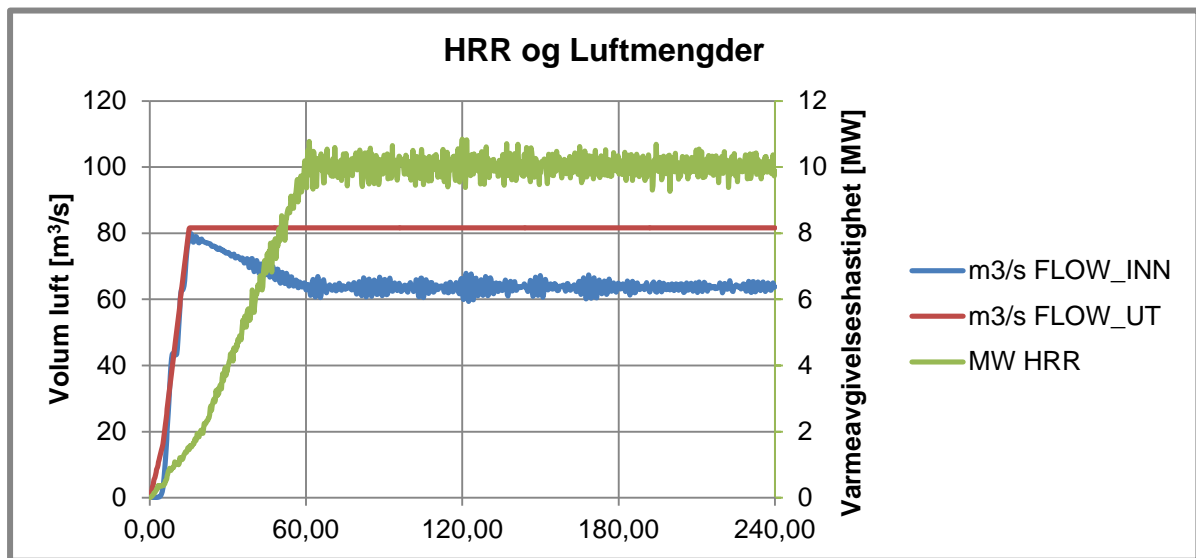
Tabell 10-10 Sammenstilling av resultat med forskjellige avtrekkshastigheter.

Hastighet avtrekk	Brann i midten	Brann ved veggen	
1,0 m/s	 #G01		Slice VIS_Soot m 30.0 27.0 24.0 21.0 18.0 15.0 12.0 9.00 6.00 3.00 0.00
1,3 m/s	 #G02	 #G03	
2,0 m/s		 #G13	

**Tabell 10-11 Forskjell på hastighet mellom tilluft og avtrekk for de adiabatisk simuleringene**

Avtrekk	Tilluft
1,0 m/s	0,78 m/s
1,3 m/s	1,07 m/s
2,0 m/s	1,77 m/s

\*Hastighetene er beregnet som luftvolum per sekund dividert med tverrsnittarealet i gasjen (81,9m<sup>2</sup>) i henhold til (12)

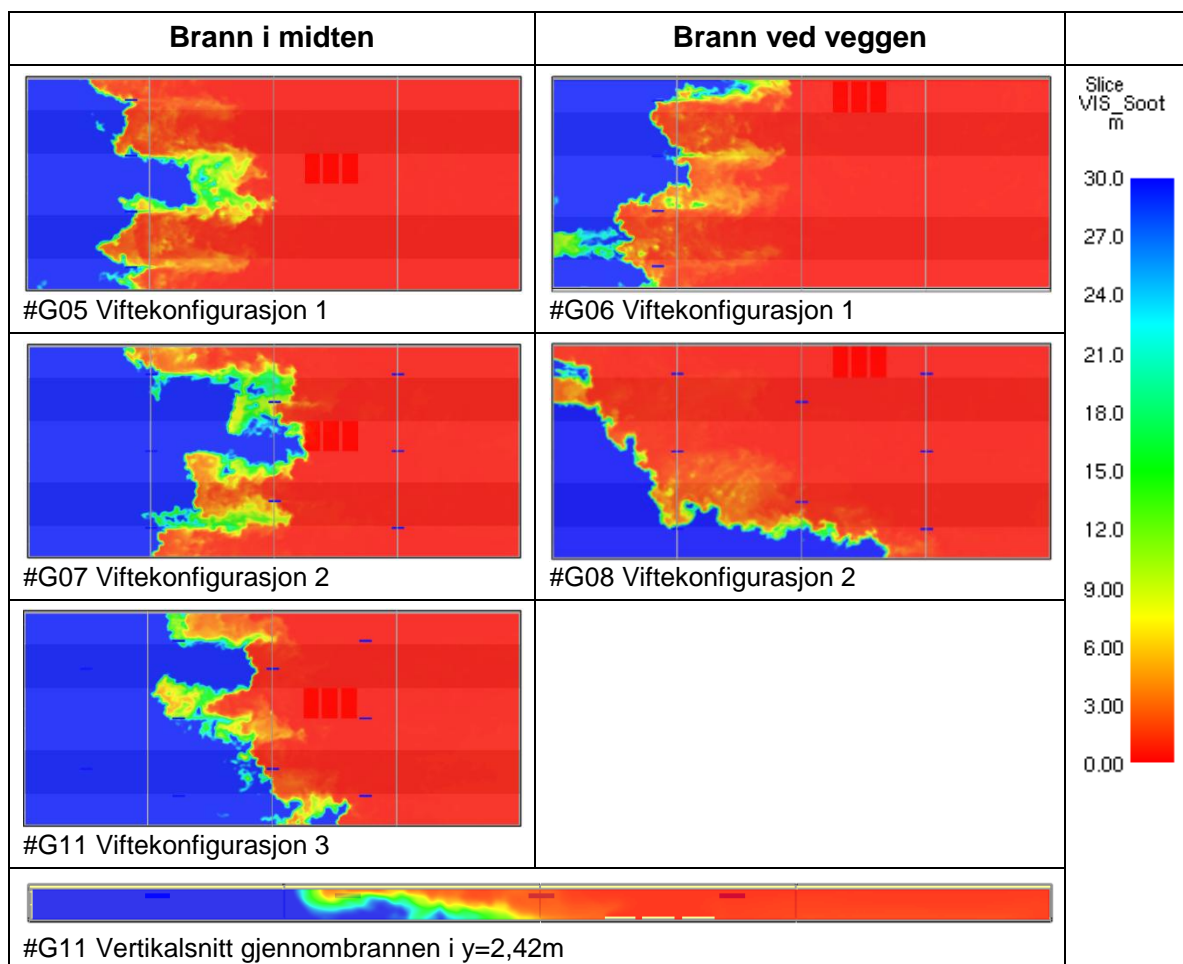


**Figur 10-40 HRR innvirkning på tilluft når konstant avtrekksvolum er spesifisert. #G05**

➤ **Brannens plassering påvirker backlayering. Simulering med jetvifter**

De tre forskjellige oppsettene med jetvifter er presentert i to kolonner i Tabell 10-12. I bunn er det i tillegg til horisontalsnitt også vist vertikalsnitt rett gjennom brannen i #G11.

**Tabell 10-12 Randbetingelsens innvirkning på tilbakestrømning av røyk. Simuleringer med jetvifter og to plasseringer for brannen.**

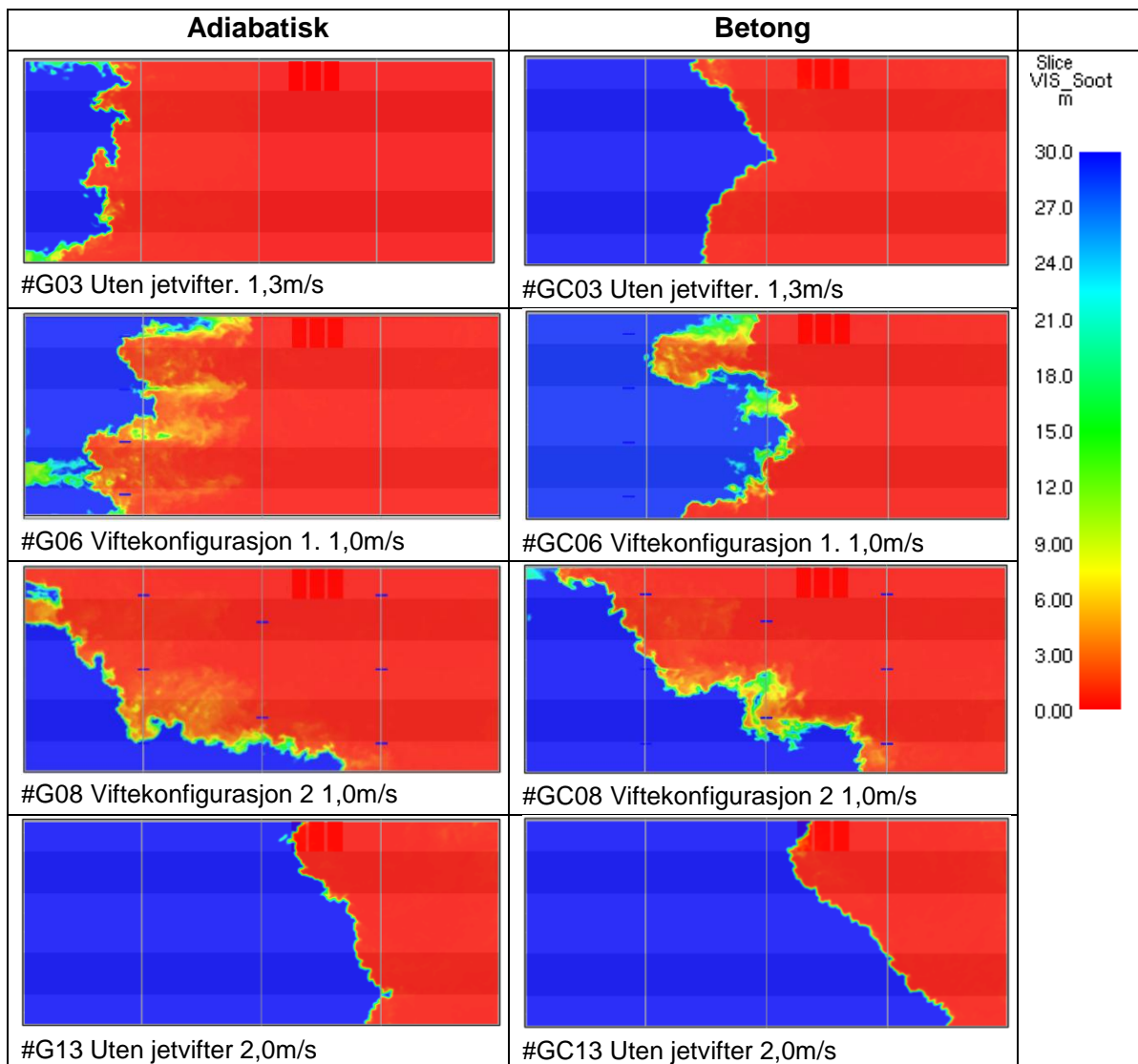


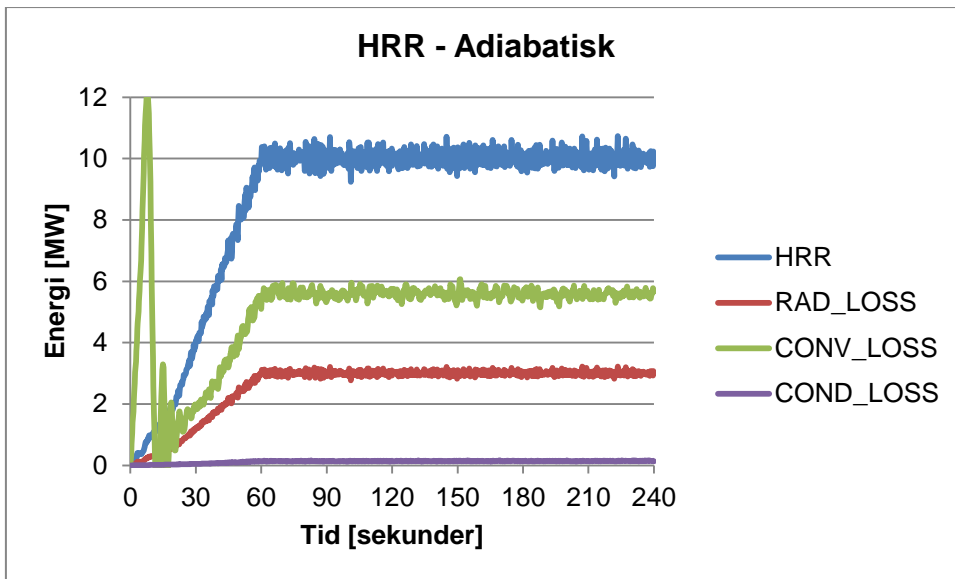
### ➤ Randbetingelsens innvirkning på backlayering

Dette er tidligere vist i avsnitt 10.3, resultatet der viste stor forskjell mellom betong og adiabatisk randbetingelse. Simuleringene med den adiabatisk randbetingelsen fylte hele garasjen. Her er resultatet noe annet, selv om forskjellen mellom betong og adiabatisk fortsatt er veldig stor så blir ikke hele garasjen røykfylt.

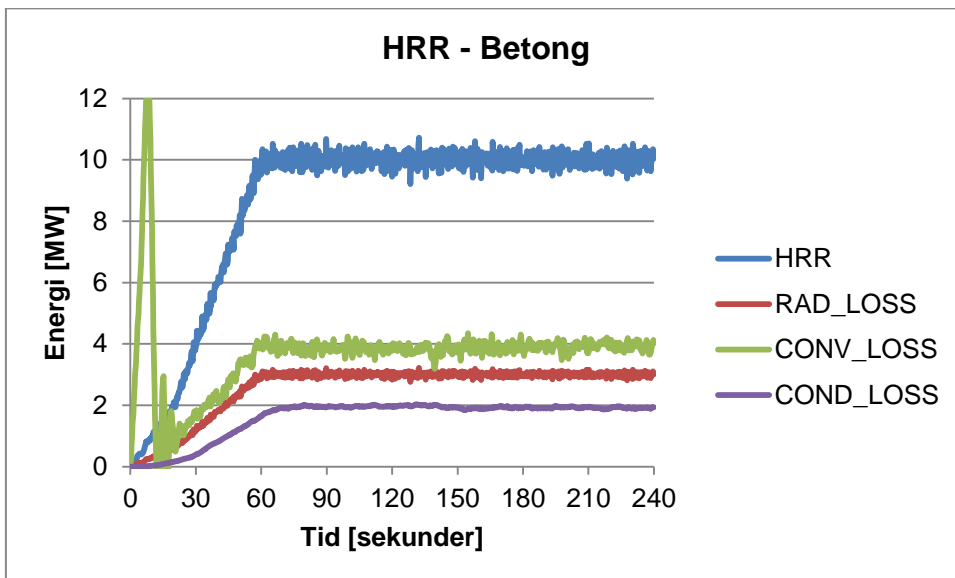
Ved å kontrollere HRR-kurvene i Figur 10-41 og Figur 10-42 ser vi tydelig forskjell på det totale varmetapet til omgivelsene i simuleringene. Strålingsenergien som vises i grafene forsvinner fra beregningene siden strålingsmodellen er slått av. Den adiabatisk randbetingelsen gir null energitap fra varmeledning siden den spesifiserer netto varmefluksen til å være 0. Betongen viser ca 2MW energitap i form av varmeledning, noe som fører til at det konvektive tapet er betydelig lavere (4MW) for betong sammenlignet med adiabatisk (5,8MW).

**Tabell 10-13 Randbetingelsens innvirkning på backlayering. Simuleringer med og uten vifter, og med forskjellige avtrekshastigheter**





Figur 10-41 Varmeavgivelseshastighet for #G03



Figur 10-42 Varmeavgivelseshastighet for #GC3

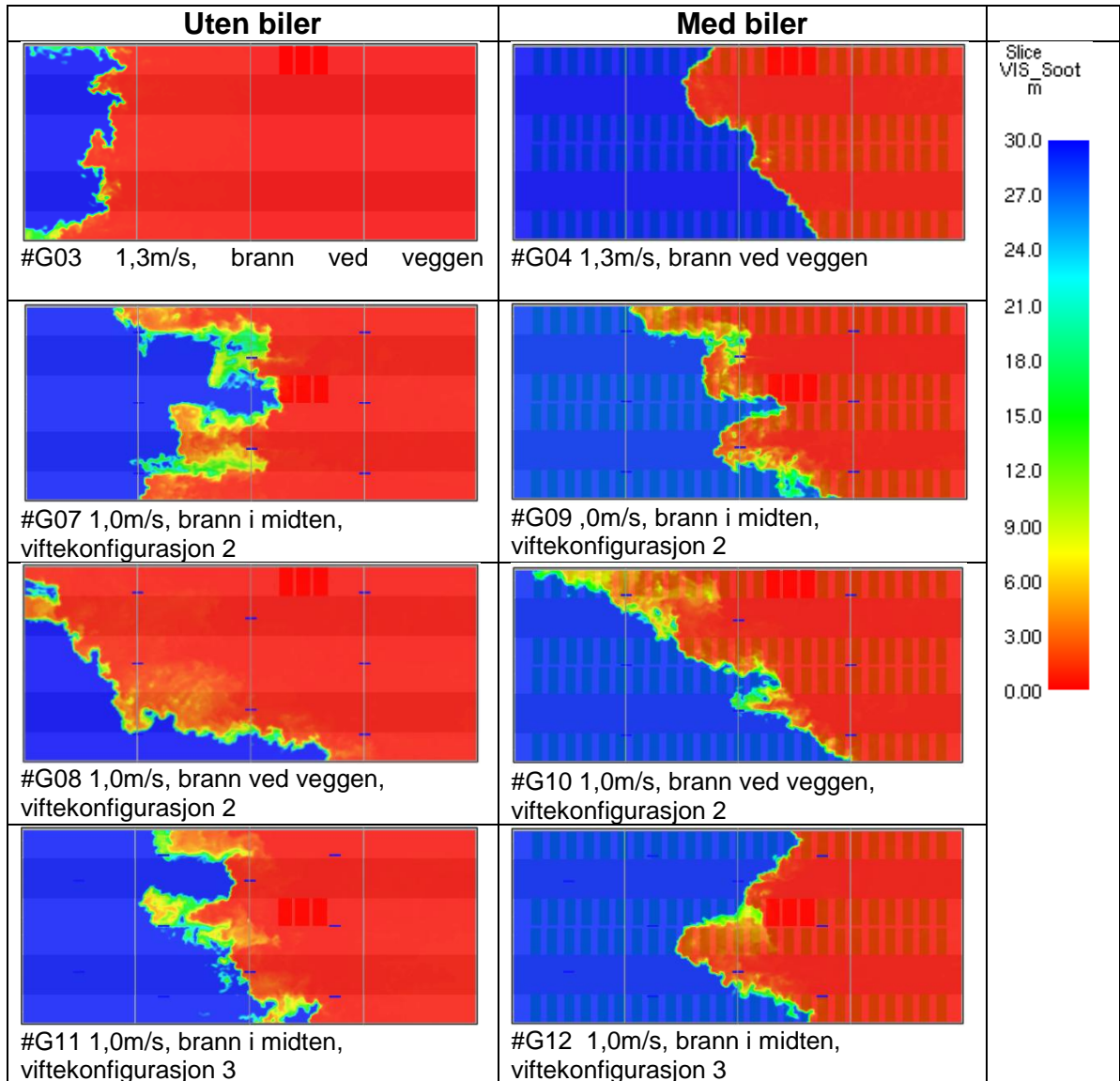
➤ **Bilers innvirkning på backlayering**

Dette er en av de mest interessante resultatene. Når garasjen er full av biler er backlayering betydelig mye mindre. Dette gjelder samtlige simuleringer, både med og uten jetvifter, se Tabell 10-14.

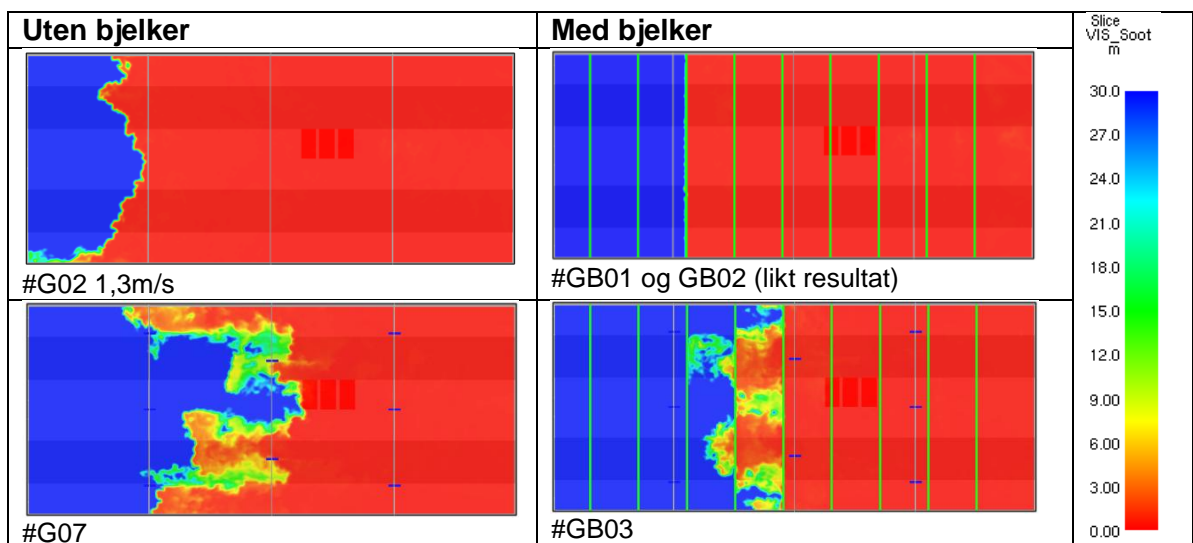
➤ **Innvirkning av bjelker på backlayering**

Simuleringer med og uten bjelker er vist i Tabell 10-14. Som kontroll var #GB02 den samme modellen som #GB01 men med halvert cellestørrelse i Z-retning. Resultatet var det samme for de to simuleringene.

**Tabell 10-14 Innvirkningen av full eller tom garasje på backlayering**



**Tabell 10-15 Innvirkning av bjelker på backlayering.**

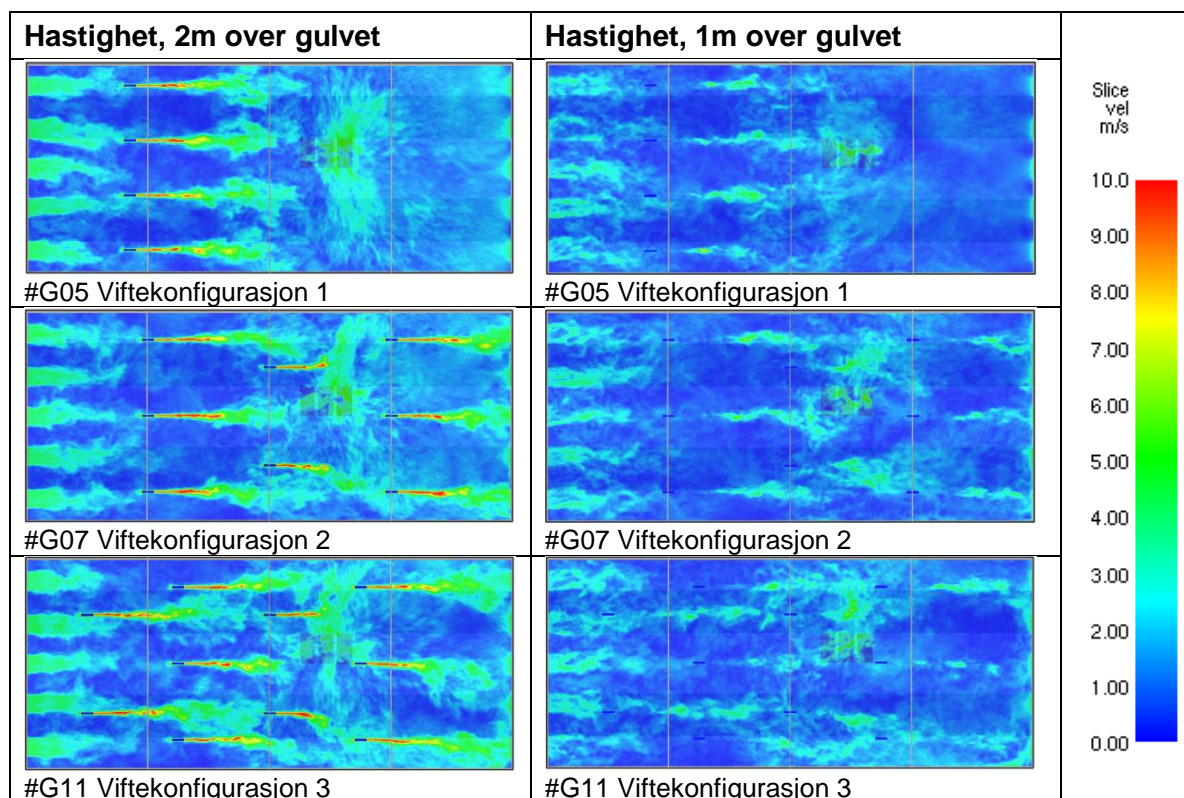




➤ **Hastighetsprofiler fra de tre jetviftekonfigurasjonene**

I Tabell 10-16er hastighetsprofiler for de tre viftekonfigurasjonene vist. Viftene akselererer luften ved taket. Hastighetsprofilene viser at noen vifter er for bredt plassert slik at hastigheten mellom de to ikke får høy nok hastighet, dette er mest tydelig i #G07 Viftekonfigurasjon 2, 2m over gulvet. Profilene er tatt etter 60 s, når brannen har akkurat har nådd sin maksimale varmeavgivelseshastighet på 10MW. Senere i simuleringen vil brannen begynne å påvirke strømningsmønsteret enda mer, slik at jeten fra vifter blir bøyet til siden.

**Tabell 10-16 Hastighetsprofiler etter 60s med de tre forskjellige viftekonfigurasjonene. Brannen er plassert i midten.**





### 10.4.3 Diskusjon

Innstillingene i #G02 var nesten de samme som for #F03 med dynamisk turbulensmodell og adiabatisk randbetingelser i avsnitt 10.3. Forskjellen var at de åpne gavlveggene var erstattet med fem tillufts-/avtrekksvifter plassert nær taket. Den totale kapasiteten på avtrekket og tilluft var den samme. Forskjellen med backlayering var stor, #F03 fylte garasjen medens #G02 klarte å begrense backlayering til ca. 25 meter. Viftene nær taket skapte en høyere hastighet ved takflaten slik at «ceiling jeten» kunne stoppes tidligere.

Effekten med høyere hastighet langs takflaten forsterkes enda mer med jetvifter, se Tabell 10-12. Simuleringene med jetvifter har mindre kapasitet på avtrekket sammenlignet med #G02, men resultatet viser likevel mindre backlayering. Disse simuleringene viser at hastigheten ved gulvet kan være mye lavere sammenlignet med hastigheten ved taket. Dette er også vist i hastighetsprofilene i Tabell 10-16. Hvis avtrekkskapasiteten blir for lav i forhold til antallet jetvifter, kan strømningsretningen ved gulvet snu. Dette var ikke observert i disse simuleringene. Lu et al. (46) registrerte at hvis mengden luft som blir transportert av jetviftene overstiger avtrekkskapasiteten, vil backlayering øke på grunn av at røyken strømmer bakover langs med gulvet. Det kan også dannes store rotasjonsmønstre slik at store deler av garasjen blir røykfylt. Selv om garasjen er riktig dimensjonert kan det hende at vifter slutter å virke i løpet av en brann, det bør derfor undersøkes hva som vil skje med strømningsmønstre i slike tilfeller.

Viftekonfigurasjon 1 og 3 var i henhold til anbefalinger fra henholdsvis Fläktwoods og prEN/TS12101-11:2012. Oppsettet av disse to konfigurasjonene er lagd for å gjøre det mulig å snu ventilasjonsretningen. Modellene mangler derfor noen vifter for å gjøre det mulig. Disse er utelatt fordi de ikke ville bli brukt i simuleringene siden de er plassert for nære avtrekket. Konfigurasjon 1 ville hatt fire like vifter på andre siden garasjen, konfigurasjon 2 ville hatt to ekstra vifter ved avtrekket slik som ved tilluften. Totalt gir dette 8, 8 og 12 jetvifter for henholdsvis konfigurasjon 1, 2 og 3. I stedet for å bruke flere vifter vil det være mulig å øke kapasiteten på avtrekket og oppnå de samme resultatene. Dette blir til slutt et spørsmål om optimering. Det finnes andre aspekter med jetvifter som ikke er diskutert her men som kan gi besparinger ved daglig drift for bla. CO kontroll. I tilfeller der geometrien er mer kompleks sammenlignet med disse simuleringene kan det være nødvendig å benytte jetvifter eller induksjonsvifter for å unngå sirkulasjonsmønstre og dødsoner. Når røyk blir fanget i sirkulasjonsmønstre vil det ikke hjelpe å øke avtrekks-hastigheten ifølge Deckers et al. (58)

Tilstedeværelsen av mange biler øker sannsynligheten for at en bil i garasjen skal begynne å brenne. En garasje med veldig få biler vil naturlig nok ha en lavere sannsynlighet for at en brann starter av seg selv på grunn av en teknisk svikt eller uhell. Sannsynligheten for hærverk kan bli økt når garasjen er nesten tom. En bil som det blir satt fyr på vil sannsynligvis få en meget rask brannutvikling i forhold til en mer naturlig brann. Det er ikke krav om å ta hensyn til hærverk ved brannprosjektering.

Simuleringene med garasjen full av biler førte til stor reduksjon av backlayering. På grunn av at bilene opptar et stort volum og en stor del av tverrsnittet i garasjen vil luften presses rundt og over bilene slik at den får en høyere hastighet. Det er derfor meget konservativt av gjeldene standarder for dette temaet i Belgia (9), Nederland (10), Storbritannia (11) og utkastet til CEN standard (12) å forutsette tomme garasjer.

I disse simuleringene var alle biler i lik høyde og det var stor plass mellom taket på garasjen og taket på bilene. For å sikre at det i en virkelig garasje, ikke er mulig for store biler å stoppe jeten fra en jetvifte, bør høyden på biler som tillates i garasjen være noe lavere enn taket slik at jeten kan gå over bilen.

Det er gjennomført mange simuleringer som av en eller annen grunn ble misslykket og derfor ikke presentert her. En viktig lærdom fra disse var at jetviftene ikke bare bør plasseres i kjørebanelen i garasjen. Ved å gjøre dette vil ikke hastigheten over taket på bilene bli høy nok, luften strømmer langs veien, siden dette gir minst motstand. Det er også mulig for røyken å gå mellom bilene og ytterveggen hvis ikke en jetvifte er plassert over raden av biler nærmest veggen.

Deckers et al. (58) rapporterte at tverrgående bjelker gjorde det mulig å benytte en lavere kapasitet på avtrekket, hvilket vil være det samme som å si at backlayering blir mindre. Dette var ikke så tydelig i disse simuleringene, noe som kan skyldes at bjelkene ikke var høye nok (kun 36 cm). Det er også mulig at griden var for grov for å detaljert løse strømningene rundt bjelkene. Selv med halvert gridstørrelse i Z-retning var resultatet det samme. Forholdet mellom de forskjellige sidene i gridcellene er ideelt 1:1, men bør ikke overstige 2:1 ifølge FDS User Guide (55). For å simulere med enda finere grid ville det derfor kreves å redusere avstanden i x og y-retning. For å bevare dimensjonene på jetviftene ville det kreves en halvering av gridstørrelsen noe som ville ført til meget lang simuleringstid. Det ble derfor valgt å ikke gjennomføre test med enda finere grid. Kombinasjonen av jetvifter og bjelker i taket var vellykket men gir en lav takhøyde igjen under viftene.

Randbetingelsene var satt til adiabatisk for de fleste simuleringene. Ulikt resultatet i forrige avsnitt, var det her mulig å begrense backlayering med høyere hastigheter, vifter, bjelker og biler. Simuleringene med betong som randbetingelse vil ikke gi korrekte resultat siden varmetapet til tak og vegger blir for stort når ikke strålingsmodellen er aktivert. Når resultatene med betong og adiabatisk randbetingelse sammenlignes er det tydelig hvor viktig randbetingelsene er for det endelige resultatet. Det ble gjennomført en kontrollsimulering med #GB03 med strålingsmodellen aktivert og standard innstillingen på 104 radiation angles. Resultatet avvik noe fra simuleringen uten strålingsmodell men forskjellene var små. Dette kan skyldes det lave antallet radiation angles. For god oppløsning på temperaturøkning fra stråling bør antallet radiation angles økes til 1000 eller mer. Dette vil øke simuleringstiden ytterligere.

#### **10.4.4 Konklusjon**

Simuleringene viste i motsetning til avsnitt 10.3 at det var mulig å begrense backlayering med adiabatisk randbetingelse. Ved å øke hastigheten ved taket ved hjelp av jetvifter, var det mulig å begrense backlayering uten å øke tilluft og avtrekk.

Biler i garasjen har stor innvirkning på resultatene og førte til mindre backlayering. Det er ikke undersøkt effekten av en halvfull garasje eller hva som ville skje hvis noen biler var så høye at de ville blokkert jetstrømmen fra jetviftene.

Bjelker på tvers av ventilasjonsretningen er gunstig og fører til mindre backlayering. Det har ikke vært mulig å kontrollere kombinasjon av bjelker og jetvifter med vinklede utkast, montert helt opp under taket. Dette skyldes begrensninger i programvaren, hvor geometrien må tilpasses gridet. Det ble forsøkt simulert i avsnitt 10.2 men det var ikke målte data tilgjengelig for å verifisere resultatet.

Når det gjelder randbetingelsene, så er det uklart om de adiabatisk randbetingelsene gir et for konservativt resultat sammenlignet med virkeligheten. Randbetingelsene bør derfor undersøkes videre for å se forskjellen på adiabatisk randbetingelser med deaktivert strålingsmodell mot betong og aktivert strålingsmodell.

CFD-programvaren FDS kan benyttes for simulering av røykventilasjon med jetvifter. Imidlertid må modellene av jetvifter verifiseres mot målte data, slik at resultatet fra simuleringene blir korrekt.

# DEL D – Oppsummering

## 11 Diskusjon

§11-17 Tilrettelegging for rednings- og sløkkemannskap i VTEK angir at tilbakestrømming av røyk skal forhindres og at en strømningshastighet på 1 m/s i tverrsnittet, normalt er tilstrekkelig for å forhindre dette. Anbefalingene avviker stort fra de andre europeiske landene som er gjennomgått. Disse angir en avstand som røyk for lov å strømme mot ventilasjonsretningen, såkalt backlayering. Siden ventilasjonssystemet dimensjoneres for mellom 10-15 meter backlayering når garasjen er tom, vil den faktiske tilbakestrømmingen ved en eventuell brannsituasjon sannsynligvis være noe mindre siden parkerte biler øker hastigheten i tverrsnittet pga innskrenkninger i tverrsnittsareal.

Anvisningen om at normalt minst 1 m/s er tilstrekkelig for å forhindre backlayering har vist seg å ikke stemme. Opprinnelsen til anbefalingen er en forenklet metode i Nederland (10) som tilsier at hvis det kan måles minimum 1,5 m/s i hele tverrsnitt så er kravet til backlayering på maksimum 15 meter oppfylt og det trengs ikke å gjennomføres CFD analyser. Dette var også verdien når anbefalingen ble publisert i VTEK i november 2011. Den ble senere redusert til 1 m/s av praktiske årsaker siden kravet på 1,5 m/s i hele tverrsnittet krevde veldig stor kapasitet til anlegget (8). I den nederlandske standarden er det angitt med en merknad at kravet gir store luftmengder, noe som kan tolkes som en oppfordring til å gjøre en CFD-analyse.

Simuleringene i oppgaven og funn i litteraturstudien viser at 1 m/s i hele tverrsnittet gir røykfylling i store deler av garasjen. Resultatene fra siste del av simuleringene viser at kravet bør ligge en plass mellom 1,3 og 2,0 m/s. I et av tilleggene til utkastet av prEN/TS12101-11:2012 angis forenklet metode når jetvifter ikke skal benyttes. Denne metoden angir maksimal bredde til 20 meter, og viser eksempel på hvordan en garasje fysisk kan deles i to deler og benytte den samme tilluften og avtrekket for de to. Dette gjør det mulig å bruke mindre kapasitet på ventilasjonen men likevel oppnå høye hastigheter.

Bruk av jetvifter og induksjonsvifter øker hastigheten ved taket slik at den totale kapasiteten på tilluft og avtrekk kan reduseres noe. Bjelker på tvers i taket gjør at det effektive tverrsnittet er noe mindre sammenlignet med flatt tak. Dette gir en høyere middelhastighet slik at backlayering reduseres noe, alternativt gjør det mulig å gå ned på kapasitet på tilluft og avtrekk. Det er viktig å sikre at jeten fra viftene ikke blokkeres av bjelkene. Langsgående bjelker krever minimum en vifte mellom hver bjelke for å sikre at røyk ikke strømmer langs med taket imellom to bjelker. Plassering av jetviftene er meget viktig, feil prosjektering kan være forskjellen på en nesten røykfri og en helt røykfylt garasje.

VTEK angir at når en garasje er sprinklet så trenger det ikke å installeres annen ventilasjon enn eksosventilasjon. Alle de andre landene som er gjennomgått har krav til røykventilasjon også i sprinklede garasjer, men tillater bruk av en mindre brann ved dimensjoneringen siden det forutsettes at brannen ikke sprer seg fra den første bilen. Simuleringene viser også at selv med 1 m/s er røykspredningen for stor med 4MW brann (tilsvarende én bil). Uten

røykventilasjon ville garasjen bli røykfylt i løpet av kort tid. Det er derfor noe underlig at VTEK ikke stiller krav til røykventilasjon siden sprinkler i seg selv ikke legger til rette for rednings og slukkemannskap i en parkeringskjeller, den forhindrer bare at brannen ikke antenner flere biler.

FDS er et populært CFD-verktøy som benyttes av mange rådgivende ingeniørbedrifter. For å sikre at simuleringen gjenspeiler virkeligheten er det nødvendig å verifisere simuleringene av kritiske komponenter (for eksempel jetvifter) slik at bl.a. strømningsmønsteret er korrekt. Simuleringene viste at standardkonfigurasjonen i FDS ga feil resultat og manglet spredning av jeten fra viftene. Simuleringene ble sammenlignet mot hastighetsprofiler fra Fläktwoods. Det stilles spørsmål til om profilene fra Fläktwoods er verifisert mot målte data, siden de avvek i horisontalspredning fra oppgitte verdier i (85) og (12).

Randbetingelsene til simuleringene må undersøkes videre. Det anbefales i (12) at strålingsmodellen slås av og at adiabatisk flater benyttes for randbetingelsene. Dette har også vært innstillingen til mange av de publiserte artiklene som er gjennomgått. Dette fjerner usikkerheten til om strålingsmodellen gir korrekt oppvarming av vegger og tak, samt det de adiabatisk flatene gir konservative resultat siden de ikke kjøler ned røyken. Etter simuleringene er det stilt spørsmål til om de adiabatisk flatene blir for konservativt og ikke gjenspeiler virkeligheten. Videre undersøkelser bør derfor se om betong som randbetingelse og strålingsmodellen aktivert gir lignende resultater. Dette var det ikke tid til å se på i denne oppgaven.

I simuleringene er det funnet at de høye hastighetene fra jetviftene fører til lang beregningstid når griden blir fin. På grunn av at geometrien må stemme overens med griden, er det liten valgfrihet i cellestørrelse hvis størrelsen på jetviftene skal overensstemme med de virkelige viftene. En forandring i tverrsnitt vil forandre skyvekraften, slik at den simulerte modellen ikke vil gjenspeile den virkelige viften. Å gjennomføre parametervariasjon med hele brannforløp tar derfor lang tid. Siden det er en steady state løsning som er målet med simuleringene og modellen ikke krever avansert forbrenningsmodell, ville det være gunstig å benytte et program som kan simulere med RANS og ustrukturert grid, for eksempel Ansys CFX. Dette sikrer en bedre oppløsning av jetviftene og strømming rundt bjelker og biler. Simuleringstiden for hvert scenario ville være betraktelig kortere slik at det er mulig å kontrollere flere scenarier i løpet av den samme tiden. Det ustrukturerte meshet ville heller ikke gi begrensninger til geometri.

## 12 Konklusjon

### 12.1 Simulering med FDS

Det er vist at standardinnstillingene i FDS ikke vil modellere spredningen fra en jetvifte korrekt. Den dynamiske Smagorinsky turbulensmodellen ga bedre resultater. Det er fortsatt en usikkerhet rundt bruk av adiabatisk randbetingelser som bør undersøkes videre, da simuleringer med disse ikke ga samsvar med empiriske ligninger fra tidligere simuleringer.

For simulering av store garasjer, gjennom et fullstendig brannforløp, vil det være mer hensiktsmessig å benytte et program som kan simulere med RANS, slik at simuleringstiden forkortes. Dette blir spesielt viktig når det skal gjennomføres parametervariasjoner med behov for å simulere mange scenarier.

### 12.2 Krav i VTEK

Oppgaven har undersøkt de preaksepterte ytelsene for parkeringskjeller i VTEK §11-17 Tilrettelegging for rednings- og slökkemansskaper. Det anbefales følgende forandringer:

#### Punkt 1.

En bil som brenner vil ikke bli begrenset av sprinkler, men brannen blir forhindret til å spre seg til andre biler. Hvis den sprinklede garasjen ikke blir røykventilert vil den raskt røykfylles og gjøre det vanskelig for brannvesenet å finne frem til brannen. En garasje som er sprinklet men ikke røykventilert vil dermed ikke oppfylle kravene i TEK §11-17 2. ledd: *«Byggverk skal tilrettelegges slik at en brann lett kan lokaliseres og bekjempes»*. Røykventilasjonsstandardene for lukkede parkeringsanlegg som er gjennomgått, stiller alle krav til røykventilasjon for sprinklede garasjer, dette vil også være kravet i den kommende CEN standarden prEN/TS12101-11:2012 ut fra utkastet som foreligger. VTEK §11-17 bør derfor revideres slik at også sprinklede garasjer skal røykventileres.

#### Punkt 4.

Anbefalingen at røykventilasjonssystemet skal dimensjoneres slik at tilbakestrømming av brannrøyk forhindres, spesifiserer ikke hva som skal ligge til grunn for dimensjoneringen. Gjelder dette en tom eller full garasje? Størrelse på brannen? Forskjellen på resultatene vil være meget store.

Simuleringene har vist at en ventilasjonshastighet på 1 m/s ikke vil forhindre tilbakestrømming av brannrøyk fra en 10MW brann (tilsvarende tre biler). Siden det er så mange faktorer som vil innvirke på det endelige resultatet vil det ikke være hensiktsmessig å spesifisere en hastighet. En bedre fremgangsmåte vil være å spesifisere akseptabel lengde på tilbakestrømmingen av brannrøyk i en garasje uten biler, slik som standardene i Nederland, Belgia, Storbritannia og utkastet til CEN standard gjør. Størrelsen på brannen må i dette tilfellet spesifiseres slik at kapasiteten på røykventilasjonen blir stor nok. Anbefaling til statiske verdier for designbrann som bør benyttes er gitt i Tabell 12-1. Disse er de samme som i utkastet til prEN/TS12101-11:2012.

Tabell 12-1 Statistiske verdier for designbrann som oppgitt i prEN/TS12101-11:2012

	Garasje med sprinkler	Garasje uten sprinkler
Antall biler i brann	1 stk	3 stk
HRR	4 MW	10 MW
Brannareal	12,5 m <sup>2</sup>	37,5 m <sup>2</sup>
Sotfaktor	0,2	0,2
Forbrenningsenergi	24 MJ/kg	24 MJ/kg

## 13 Anbefaling til videre arbeid

For videre arbeid med oppgaven anbefales det følgende punkter

- Verifisere simuleringene av jetvifter mot målte data, slik at spredningen av jetstrømmen horisontalt med taket kan undersøkes
- Sammenlign resultatene fra FDS simuleringene med simuleringer med Ansys CFX
- Gi en anbefaling til DiBK i forhold til at dagens preaksepterte løsninger ikke gir tilfredsstillende sikkerhet for rednings og slokkeinnsats.





## 14 Bibliografi

1. **Fjellsæter, Trond.** *Møte med Trøndelag brann- og redningstjeneste ang. branner i parkeringskjellere.* Trondheim, 19 Desember 2011.
2. **Kollegiet for brannfaglig terminologi.** Faguttrykk. *Kollegiet for brannfaglig terminologi.* [Internett] [Sisert: 5 April 2012.] <http://www.kbt.no>.
3. **Kommunal- og regionaldepartementet.** *Forskrift om tekniske krav til byggverk, TEK10.* Oslo : Kommunal- og regionaldepartementet, 2010. FOR-2010-03-26-489.
4. **DiBK.** *Veiledning om tekniske krav til byggverk, VTEK10.* Oslo : Direktoratet for byggkvalitet, 2012. VTEK10.
5. **Colt International Limited.** *Car Park Ventilation (CPV) - Full Scale Live Smoke Tests.* [Internett] 2004. [Sisert: 2 September 2011.] <http://www.coltinfo.com.au/products-and-systems/smoke-control/leaflet-car-park-ventilation-avon.pdf>.
6. **Johansen, Daniel, Engmann, Morten og Dyrød, Jostein.** *Studierapport: Parkeringskjellere i Europa.* Oslo : Oslo Brann- og Redningsetat, 2009.
7. **Statens Bygningstekniske Etat.** *Temaveiledning: Røykventilasjon.* Oslo : s.n., 2000. HO-3/2000.
8. **Børresen, Bent.** Telefonsamtal. Trondheim : s.n., April 2012.
9. **Bureau de Normalisation - NBN.** *NBN S21-208-2, Fire Protection Inside Buildings - Design of Smoke and Heat Exhaust Ventilation Systems (SHEVS) for Indoor Car Parks.* Bryssel : Bureau de Normalisation - NBN, 2007.
10. **Nederlands Normalisatie-instituut.** *NEN6098:2012 Smoke control systems for powered smoke exhaust ventilators in car park.* Delft, Nederland : Nederlands Normalisatie-instituut, 2012. NEN6098.
11. **British Standards Institution.** *BS 7346-7:2006 Components for smoke and heat control systems - Part 7: Code of practice on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat control systems for covered car parks.* London : British Standards Institution, 2006.
12. **CEN.** *prEN/TS 12101-11 Smoke and heat control systems. Part 11: Design, installation & commissioning requirements for enclosed car parks.* 2012. CEN TC191 SC1 WG9 N144.
13. **Standard Norge.** *NS-EN 12101-3:2002 Brannventilasjonssystemer - Del 3: Spesifikasjon for mekaniske brannventilasjonsanlegg. Med rettelseblad AC:2005.* Oslo : Standard Online AS, 2002.
14. **Car park fire safety.** *Fundamental design approaches for improvement of the fire safety in car parks - Work Package 1: Determination of design parameters, scenarios and objectives.* Gent, Nederland : s.n., 2010.
15. **NBN.** *NBN S21-208-2/pr A1:2010 Brandbeveiliging in gebouwen Ontwerp van rook- en armteafvoersystemen in gesloten parkeergebouwen.* Brussel : Bureau voor Normalisatie, 2010.

16. **Morgan, H.P, Vanhove, B. og DeSmedt, J-C.** *Extending the principles of Impulse Ventilation in Tunnels to apply to Smoke Control in Car Parks.* 1999.
17. **De Smedt, Jean-Claude.** Brandweer Vereniging Vlaanderen. [Internett] 2011. [Sisert: 18 November 2011.] [http://www.brandweervlaanderen.be/Portals/BVV/Documenten/Wie\\_zijn\\_wie/KAPB/KAPB\\_Smoke\\_control\\_in\\_car\\_parks.pdf](http://www.brandweervlaanderen.be/Portals/BVV/Documenten/Wie_zijn_wie/KAPB/KAPB_Smoke_control_in_car_parks.pdf).
18. **SCS Group.** SCS Group - Publications. [Internett] Desember 2009. [Sisert: 5 Oktober 2011.] [http://www.groupscs.co.uk/downloads/cpsDemystifiedNew\\_dec09.pdf](http://www.groupscs.co.uk/downloads/cpsDemystifiedNew_dec09.pdf).
19. **Systemair.** Tailored solutions for car park ventilation. *Systemair.* [Internett] [Sisert: 10 Februar 2012.] [http://www1.systemair.com/upload/Broschyre/Engelska/Jet\\_fans\\_systems.pdf](http://www1.systemair.com/upload/Broschyre/Engelska/Jet_fans_systems.pdf).
20. **Fläktwoods.** Precise Air Management - Product Range - Car Park Ventilation. *Fläktwoods Group.* [Internett] [Sisert: 10 Februar 2012.] <http://www.flaktwoods.com/ff9d2313-7f23-4906-90c1-8a56162aa221>.
21. **Ingebrigtsen, Sturla.** *Garasjeventilasjon 24nov 2011 Rambøll.* Trondheim : System Air AS, 2011.
22. **Colt group.** Colt Group - Car Park Ventilation Products. [Internett] 2011. [Sisert: 15 November 2011.] <http://www.coltinfo.co.uk/products/car-park-ventilation-products/>.
23. **Magnusson, Björn.** *Røykventilasjon og designbranner i garasjeanlegg.* Trondheim : NTNU, 2011.
24. **ECSC.** *Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in closed car parks.* Bryssel : European Coal and Steel Commission, 1997. EUR 18867.
25. **Joyeux, Daniel, et al., et al.** *Demonstration of real fire tests in car parks and high buildings.* s.l. : CTICM, Arbed Recherches, TNO, 2001.
26. **SwRI.** *Development of a database of full-scale calorimeter tests of motor vehicle burns.* Charlottesville, USA : Southwest Research Institute, 2008. SwRI Project No. 01.06939.01.003.
27. **van Oerle, N.J, Lemaire, A.D og van de Leur, P.H.E.** *The effectiveness of thrust ventilation in closed car parks.* Delft : TNO Building and Construction Research, 1999.
28. **Okamoto, Katsuhiko, et al., et al.** Burning behavior of sedan passenger cars. *Fire Safety Journal.* 2009, 44, ss. 301-310.
29. **NFPA.** *Fire Protection Handbook.* 19. utgave, volum 2. Massachusetts : National Fire Protection Association, 2003.
30. **Lönnermark, Anders og Blomqvist, Per.** Emissions from an automobile fire. *Chemosphere.* 2006, 62, ss. 1043-1056.
31. **BRE.** *Fire spread in car parks, BD2552.* London : Department for Communities and Local Government, 2010.

32. **Li, Yuguang.** *Assessment of Vehicle Fires in New Zealand Parking Buildings. Fire Engineering Research Report 04/2.* Canterbury : Department of Civil Engineering, University of Canterbury, 2004.
33. **Li, Yuguang og Spearpoint, Michael.** Analysis of Vehicle Fire Statistics in New Zealand Parking Buildings. *Fire Technology.* 1 January 2007, ss. 93-106.
34. **Denda, D.** About Parking Garage Fires. *American Fire Journal.* vol 45, no 2, 1993, ss. 22-25,27.
35. **Efectis Nederland BV.** *Onderzoek brand parkeergarage Lloydstraat, Rotterdam.* Rotterdam : Efectis Nederland BV, 2007.
36. **Noordijk, Leander og Lemaire, Tony.** Modelling of fire spread in car parks. [Internett] 2005. [Siteret: 29 September 2011.] <http://heron.tudelft.nl/50-4/2.pdf>.
37. **T. van Overbeek, A. Breunese, J. Gijsbers, K. Both, J. Maljaars, L. Noordijk.** New Regulations for Hollow Core Slabs After Premature Partial Collaps. *Structures in Fire: Proceedings of the Sixth International Conference.* Lancaster, Pennsylvania : DEStech Publications, Inc, 2011, ss. 141-148.
38. **SINTEF Byggforsk.** *520.380 Røykkontroll i bygninger.* 2006.
39. **The British Standards Institution.** *Components for smoke and heat control systems. Code of practice on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat control systems for covered car parks.* London : The British Standards Institution, 2006. BS 7346-7:2006.
40. **Burgi, H.** Swiss Tests on Fire Behaviour in Enclosed and Underground Car Parks. *Fire International.* 1971, 33, ss. 64-77.
41. **CETU.** Guide to road tunnel safety documentation - Booklet 4 Specific Hazard Investigations. *Centre d'etudes des tunnels.* [Internett] September 2003. [Siteret: 10 Mai 2012.] <http://www.cetu.equipement.gouv.fr/guide-to-road-tunnel-safety-a420.html>.
42. **Jangi, Mehdi, Tilley, Nele og Merci, Bart.** *Numerical simulations of some possible fire scenarios with RANS and LES.* Ghent, Belgia : Ghent University, Heat and Combustion Mechanics.
43. **Tilley, Nele, Deckers, Xavier og Merci, Bart.** CFD Study of relation between ventilation velocity and smoke backlayering distance in large closed car parks. *Fire Safety Journal.* 48, 2012.
44. **Drysdale, Douglas.** *Fire Dynamics.* 2. utgaven. s.l. : Wiley, 2007.
45. **Paulsen Husted, Bjarna.** *Calculating Smoke potential for use in Argos.* s.l. : Danish Institute of Fire and Security Technology, 2003.
46. **Lu, S, et al., et al.** Numerical Study on Impuls Ventilation for Smoke Control in an Underground Car Park. *Procedia Engineering 11.* 2011, ss. 369-378.
47. **Johansen, Bjørn S. og Karlsen, Gunnar.** Ventilasjon i parkeringshus. *Ventøk 3.12.* 2000.

48. **NFPA.** *NFPA 92B Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces.* Quincy, MA, USA : NFPA, 2005.
49. **CEN.** *prEN/TS 12101-11, Smoke and Heat Control System - Part 11: Design, Installation & Commissioning Requirements for Enclosed Car Parks, Draft version 2011 .* s.l. : Comité Européen de Normalisation - CEN, 2011.
50. **Morgan, H.P, Vanhove, B. og De Smedt, J-C.** Extending the principles of impulse ventilation in tunnels to apply to smoke control in car parks. *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes.* Volume 6, Number 2, 2004, ss. 53-71.
51. **Jangi, Mehdi, Tilley, Nele og Merci, Bart.** *Numerical simulations of some possible fire scenarios.* Ghent, Belgia : Ghent University, Heat and Combustion Mechanics.
52. **SFPE.** *SFPE Handbook.* Massachusetts : NFPA, 2002. ss. 2-19.
53. **Singapore Civil Defence Force.** *Fire safety requirements for ductless jet fan system in car parks.* Singapore : Singapore Civil Defence Force, Fire safety and shelter department, 2008. FSR3:2008.
54. **OpenFOAM Foundation.** OpenFoam. [Internett] [Sitert: 15 April 2012.] <http://www.openfoam.com/>.
55. **McGrattan, Kevin, et al., et al.** *Fire Dynamics Simulator (Version 5) User Guide.* Gaithersburg, Maryland, USA : National Institute of Standards and Technology, 2010. 1019-5.
56. **Zhang, X.G., et al., et al.** Numerical simulations on fire spread and smoke movement in an underground car park. *Building and environment.* 2007, 42, ss. 3466-3475.
57. **Viegas, João Carlos.** The use of impulse ventilation for smoke control in underground car parks. *Tunneling and Underground Space Technology.* 2010, 25, ss. 42-53.
58. **Deckers, X., et al., et al.** Smoke control in case of fire in a large car park: CFD simulations of full-scale configurations. *Fire Safety Journal.* 2012, doi:10.1016/j.firesaf.2012.02.005.
59. **PIARC Committee on Road Tunnels.** *Fire and smoke control in road tunnels.* s.l. : PIARC, 1999. ss. 63-65. 05.05.B.
60. **Merci, Bart og Tilley, Nele.** Relation Between Horizontal Ventilation Velocity and Backlayering Distance in Large Closed Car Parks. *Fire Safety Science - Proceedings of the Ninth International Symposium.* 2008, ss. 777-788.
61. **Yeoh, Guan Heng og Yuen, Kwok Kit.** *Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering.* s.l. : Elsevier Ltd., 2008. ISBN: 978-0-7506-8589-4.
62. **Crowe, Clayton T., Elger, Donald F. og Roberson, John A.** *Engineering Fluid Mechanics.* USA : John Wiley & Sons, 2005. ISBN 0-471-66161-9.
63. **Wilcox, David C.** *Basic Fluid Mechanics.* San Diego, USA : DCW Industries, 2007. ISBN 978-1-928729-31-0.

64. **Carlsson, Jörgen.** *Fire Modelling Using CFD - An introduction for Fire Safety Engineers.* Lund : Lunds Tekniska Högskola, 1999.
65. **Rubini, Dr. Philip.** *Simulation of fires in enclosures.* Lund : Department of Engineering, University of Hull, 2012.
66. **McGrattan, Kevin, et al., et al.** *Fire Dynamic Simulator (Version 5). Technical Reference Guide. Volume 1.* Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2010. 1018-5.
67. **Wikipedia.** Wikipedia. [Internett] [Sitert: 23 Mars 2012.] [http://en.wikipedia.org/wiki/Regular\\_grid](http://en.wikipedia.org/wiki/Regular_grid).
68. **Kreyszig, Erwin.** *Advanced Engineering Mathematics.* s.l. : John Wiley & Sons, Inc, 2006. ISBN-13: 978-0-471-72897-9.
69. **v.d. Giesen, B.J.M, et al., et al.** Modelling and simulation of a jet fan for controlled air flow in large enclosures. *Environmental Modelling & Software.* 2011, 26, ss. 191-200.
70. **Wilcox, David C.** *Turbulence Modelling for CFD.* La Cãnada, CA, USA : DCW Industries, 2006. ISBN 978-1-928729-08-2.
71. **Nogrid.** *Nogrid.* [Internett] [Sitert: 20 April 2012.] <http://www.nogrid.com/>.
72. **Pope, Stephen B.** *Turbulent Flows.* 1. s.l. : Cambridge University Press, 2000.
73. **Pope, Stephen B.** Ten questions concerning the large-eddy simulation of turbulent flows. *New Journal of Physics.* 6, 2004.
74. **Deardorff, James W.** A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics.* part 2, 1970, vol 41.
75. *Quality Assessment in the Fire Dynamics Simulator: A bridge to reliable Simulations.* **McDermott, Randall J.** Baltimore, Maryland : National Institute of Standards and Technology, 2011. Proceedings, Fire and Evacuation Modeling Technical Conference 2011.
76. **Denaro, Filippo Maria.** What does Finite Volume-based implicit filtering really resolve in Large-Eddy Simulations? *Journal of Computational Physics.* 2011, 230, ss. 3849–3883.
77. **Smagorinsky, J.** General Circulation Experiments with the Primitive Equations - 1. The basic Experiment. *Monthly Weather Review.* Mars 1963, ss. 99-164.
78. **Germano, Massimo, Piomelli, Ugo og Cabot, William H.** A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. *Physics of Fluids A vol 3, No 7.* 1991, ss. 1760-1765.
79. **Best Practice gruppen.** *CFD Best Practice.* s.l. : Best Practice gruppen, 2009.
80. **Karlsson, Björn og Quintiere, James G.** *Enclosure Fire Dynamics.* 1. Florida : CRC Press, 1999.
81. **NIST.** Fire Dynamic Simulator and Smokeview. [Internett] 2011. [Sitert: 17 Februar 2012.] <http://www.fire.nist.gov/fds/>.

82. **Gissi, Emanuele.** An introduction to Fire Simulation with FDS and Smokeview. [Internett] 2010. [Sitert: 20 Januar 2012.] <http://www.emanuelegissi.eu/>.
83. **McDermott, Randall, et al., et al.** *Fire Dynamic Simulator (Version 5). Technical Reference Guide. Volume 2: Verification.* Gaithersburg, Maryland, USA : NIST, 2010. 1018-5.
84. **ANSYS, Inc.** Fluid Dynamics Solutions. *ANSYS.* [Internett] [Sitert: 20 Mai 2012.] <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics>.
85. **Awbi, H.B.** *Ventilation of buildings.* 1. London : Chapman & Hall, 1991.
86. Why heat can be transferred through insulated wall. *FDS and Smokeview Discussion.* [Internett] 2 Februar 2010. [Sitert: 15 Mai 2012.] [https://groups.google.com/forum/?fromgroups#!topic/fds-smv/Oc06-TuaB\\_E](https://groups.google.com/forum/?fromgroups#!topic/fds-smv/Oc06-TuaB_E).
87. **Tilley, Nele, Rauwoens, Pieter og Merci, Bart.** Verification of the accuracy of CFD simulations in small-scale tunnel and atrium fire configurations. *Fire Safety Journal.* 2011, 46, ss. 186-193.
88. **McDermott, Randall J.** Issue 707: HRR for  $Q^*$  cases too high with FDS6. *FDS-SMV Issue tracker.* [Internett] 21 April 2009. [Sitert: 10 Mai 2012.] <http://code.google.com/p/fds-smv/issues/detail?id=707>.
89. —. FDS 6 Options. *FDS and Smokeview Discussions.* [Internett] McDermott, Randall J., 4 Mai 2009. [Sitert: 11 Mai 2012.] [https://groups.google.com/group/fds-smv/browse\\_thread/thread/7bb35719784756b7#](https://groups.google.com/group/fds-smv/browse_thread/thread/7bb35719784756b7#).
90. —. Issue 1215: Different HRR's. *FDS-SMV Issue Tracker.* [Internett] 10 Oktober 2010. [Sitert: 10 Mai 2012.] <http://code.google.com/p/fds-smv/issues/detail?id=1215>.
91. —. Randall J. McDermott. *FDS Wall Flows Part I: Straight Channels.* [Internett] 2 Juli 2009. [Sitert: 20 Mai 2012.] [http://randy.mcdermott.googlepages.com/fds\\_friction\\_factor.pdf](http://randy.mcdermott.googlepages.com/fds_friction_factor.pdf).
92. **NIST.** Release Notes for Fire Dynamics Simulator (FDS). *Fire Dynamics Simulator (FDS) and Smokeview.* [Internett] 29 Oktober 2010. [Sitert: 20 Mai 2012.] [http://code.google.com/p/fds-smv/wiki/FDS\\_Release\\_Notes](http://code.google.com/p/fds-smv/wiki/FDS_Release_Notes).

# Vedlegg 1 – Oppgavetekst



Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi  
Institutt for bygg, anlegg og transport

Page 1 of 3 pages

## **MASTEROPPGAVE** (TBA4905 Bygnings- og materialteknikk)

VÅREN 2012

for

**Björn Erik Olof Magnusson**

### Røykventilasjon i lukkede parkeringsanlegg

#### **BAKGRUNN**

Antall parkeringsgarasjer blir stadig flere og kompleksiteten øker. Ønsker om større åpne areal og flere biler stiller høyere krav til prosjektering, men har regelverket rundt brannsikring holdt følge med utviklingen? Branner i lukkede parkeringsgarasjer har vist seg å være vanskelig for brannvesenet å håndtere. Det er siden våren 2011 et avsnitt i Veiledning til byggt teknisk forskrift; §11-17 *Tilrettelegging for rednings- og slukkemannskap*, med preaksepterte ytelser for parkeringsgarasjer.

Paragrafen stiller krav til at røykventilasjon skal dimensjoneres slik at tilbakestrømming av brannrøyk forhindres, når garasjen er over 400m<sup>2</sup> og ikke er sprinklet. Det angis at det normalt kreves en ventilasjonshastighet i hele tverrsnittet på minimum 1m/s for å unngå tilbakestrømming av røyk. For sprinklede garasjer er det tilstrekkelig med kun eksosventilasjon.

Det finnes for tiden ikke en norsk eller felles europeisk standard for røykventilasjon i lukkede parkeringsanlegg. Belgia, Nederland og Storbritannia har nasjonale standarder. Det arbeides for tiden med en egen CEN standard for lukkede garasjeanlegg. Standarden ble påbegynt i 2008 men dato for ferdigstillelse er fortsatt ukjent.

#### **OPPGAVE**

- Undersøke og sammenligne kravene for røykventilasjon i parkeringskjellere i Norge med andre Europeiske land, inkludert utkastet til CEN standarden.
- Gjennomføre en litteraturstudie angående designbranner og røykventilasjon i parkeringsgarasjer.
- Ved hjelp av simuleringverktøyet Fire Dynamics Simulator (FDS), gjennomføre simuleringer for å kontrollere dagens krav i Norge mot anbefalinger i andre europeiske land.
- Hvis det viser seg at kravene i VTEK bør oppdateres, skal det presenteres anbefalinger til forandringer.
- Tilegne seg en dypere forståelse av simuleringer med FDS gjennom bl.a. faget «*Simulation of Fires in Enclosures, VBR200*» som fjernundervisning ved Lunds Teknisk Högskola.

## GENERELT

Oppgaveteksten er ment som en ramme for kandidatens arbeid. Justeringer vil kunne skje underveis, når en ser hvordan arbeidet går. Eventuelle justeringer må skje i samråd med faglærer ved instituttet.

Ved bedømmelsen legges det vekt på grundighet i bearbeidingen og selvstendighet i vurderinger og konklusjoner, samt at framstillingen er velredigert, klar, entydig og ryddig uten å være unødige voluminøs.

Besvarelsen skal inneholde

- standard rapportforside (automatisk fra DAIM, <http://daim.idi.ntnu.no/>)
- tittelside med ekstrakt og stikkord (mal finnes på siden <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank>)
- forord
- sammendrag på norsk og engelsk (studenter som skriver sin masteroppgave på et ikke-skandinavisk språk og som ikke behersker et skandinavisk språk, trenger ikke å skrive sammendrag av masteroppgaven på norsk)
- innholdsfortegnelse inklusive oversikt over figurer, tabeller og vedlegg
- om nødvendig en liste med beskrivelse av viktige betegnelser og forkortelser benyttet
- hovedteksten
- referanser til kildemateriale som ikke er av generell karakter, dette gjelder også for muntlig informasjon og opplysninger.
- oppgaveteksten (denne teksten signert av faglærer) legges ved som Vedlegg 1.
- besvarelsen skal ha komplett paginering (sidenummerering).

Besvarelsen kan evt. utformes som en vitenskapelig artikkel. Arbeidet leveres da også med rapportforside og tittelside og om nødvendig med vedlegg som dokumenterer arbeid utført i prosessen med utforming av artikkelen.

Se forøvrig «Råd og retningslinjer for rapportskrivning ved prosjektarbeid og masteroppgave ved Institutt for bygg, anlegg og transport». Finnes på <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank>

### Hva skal innleveres?

Rutiner knyttet til innlevering av masteroppgaven er nærmere beskrevet på <http://daim.idi.ntnu.no/>. Trykking av masteroppgaven bestilles via DAIM direkte til Skipnes Trykkeri som leverer den trykte oppgaven til instituttkontoret 2-4 dager senere. Instituttet betaler for 3 eksemplarer, hvorav instituttet beholder 2 eksemplarer. Ekstra eksemplarer må bekostes av kandidaten/ ekstern samarbeidspartner.

Ved innlevering av oppgaven skal kandidaten levere en CD med besvarelsen i digital form i pdf- og word-versjon med underliggende materiale (for eksempel datainnsamling) i digital form (f. eks. excel). Videre skal kandidaten levere innleveringsskjemaet (fra DAIM) hvor både Ark-Bibl i SBI og Fellestjenester (Byggsikring) i SB II har signert på skjemaet. Innleveringsskjema med de aktuelle signaturene underskrives av instituttkontoret før skjemaet leveres Fakultetskontoret.

Dokumentasjon som med instituttets støtte er samlet inn under arbeidet med oppgaven skal leveres inn sammen med besvarelsen.

Besvarelsen er etter gjeldende reglement NTNUs eiendom. Eventuell benyttelse av materialet kan bare skje etter godkjenning fra NTNU (og ekstern samarbeidspartner der dette er aktuelt). Instituttet har rett til å bruke resultatene av arbeidet til undervisnings- og forskningsformål som om



det var utført av en ansatt. Ved bruk ut over dette, som utgivelse og annen økonomisk utnyttelse, må det inngås særskilt avtale mellom NTNU og kandidaten.

**(Evt) Avtaler om ekstern veiledning, gjennomføring utenfor NTNU, økonomisk støtte m.v.**  
Beskrives her når dette er aktuelt. Se <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank> for avtaleskjema.

**Helse, miljø og sikkerhet (HMS):**

NTNU legger stor vekt på sikkerheten til den enkelte arbeidstaker og student. Den enkeltes sikkerhet skal komme i første rekke og ingen skal ta unødige sjanser for å få gjennomført arbeidet. Studenten skal derfor ved uttak av masteroppgaven få utdelt brosjyren "Helse, miljø og sikkerhet ved feltarbeid m.m. ved NTNU".

Dersom studenten i arbeidet med masteroppgaven skal delta i feltarbeid, tokt, befarings, feltkurs eller ekskursionsjoner, skal studenten sette seg inn i "Retningslinje ved feltarbeid m.m.". Dersom studenten i arbeidet med oppgaven skal delta i laboratorie- eller verkstedarbeid skal studenten sette seg inn i og følge reglene i "Laboratorie- og verkstedhåndbok". Disse dokumentene finnes på fakultetets HMS-sider på nettet, se <http://www.ntnu.no/ivt/adm/hms/>.

Studenter har ikke full forsikringsdekning gjennom sitt forhold til NTNU. Dersom en student ønsker samme forsikringsdekning som tilsatte ved universitetet, anbefales det at han/hun tegner reiseforsikring og personskadeforsikring. Mer om forsikringsordninger for studenter finnes under samme lenke som ovenfor.

**Innleveringsfrist:**

Arbeidet med oppgaven starter 16. januar 2012

Besvarelsen leveres senest ved registrering i DAIM innen 11. juni 2012 kl 1500.

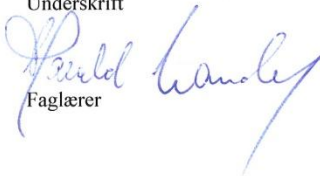
**Faglærer ved instituttet:** Harald Landrø

**Veileder(eller kontaktperson) hos ekstern samarbeidspartner:** Dag Denstad, Rambøll

Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU

Dato: 19.01.2012

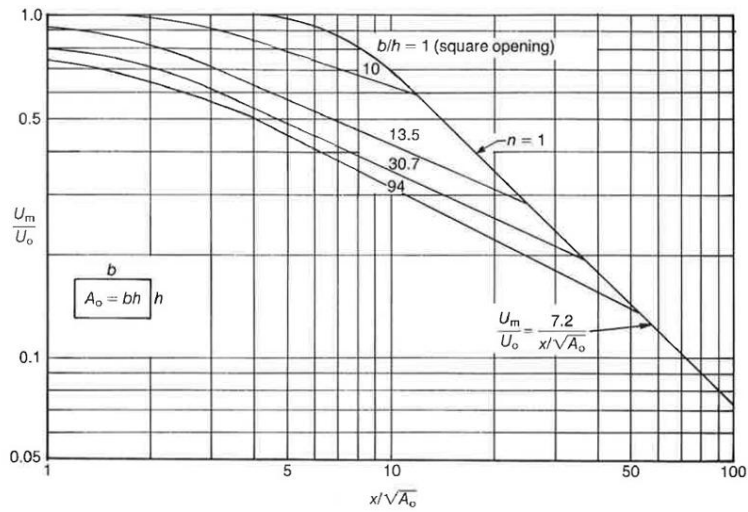
Underskrift



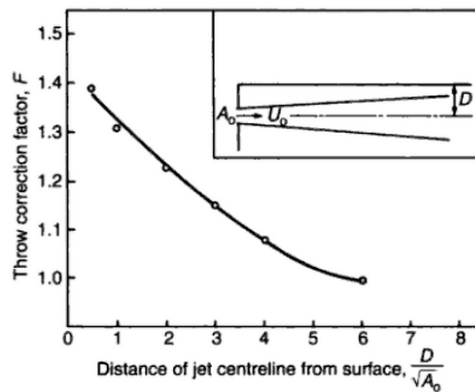
Faglærer



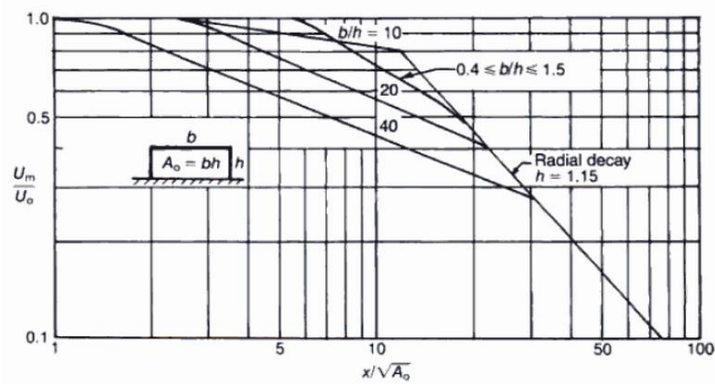
## Vedlegg 2 – Empirisk beregning av hastighet



Fritt strømmende jet:  
Jetstrømmens hastighet som funksjon av avstanden  $x$  (85)



Korreksjonsfaktor for en jet nær en parallell hindring. Skal multipliseres med verdien for fritt strømmende jet. (85)

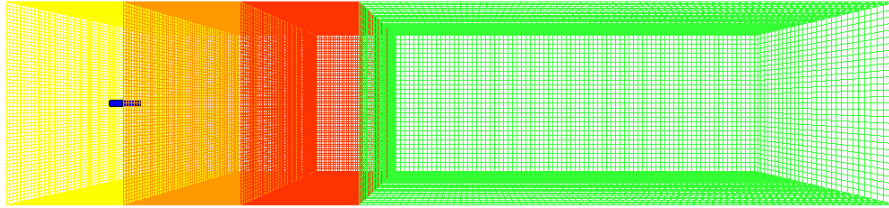


Jet langs en horisontal hindring:  
Jetstrømmens hastighet som funksjon av avstanden  $x$  (85)

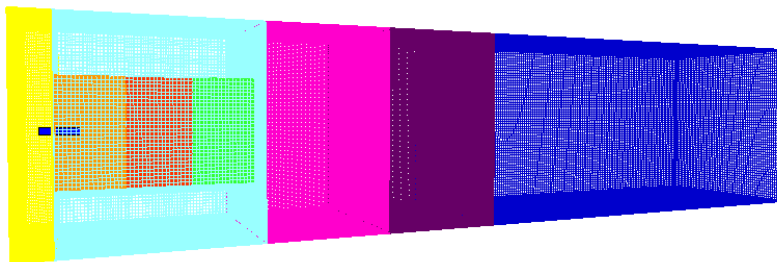


## Vedlegg 3 - Gridstørrelser

### Simulering #01-07,10



Inndeling av grid med 10 og 20cm celle størrelse



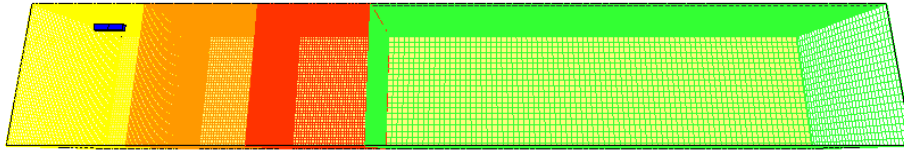
Inndeling av grid med 5cm celle størrelse

20cm grid	Grid 1 [Gul]	Grid 2 [Orange]	Grid 3 [Rød]	Grid 4 [Grønn]	Totalt
<b>Cellestørrelse [cm]</b>	20 x 20 x 20	20 x 20 x 20	20 x 20 x 20	40 x 40 x 40	
<b>Antall celler</b>	126 000	126 000	126 000	72 000	450 000

10 cm grid	Grid 1 [Gul]	Grid 2 [Orange]	Grid 3 [Rød]	Grid 4 [Grønn]	Totalt
<b>Cellestørrelse [cm]</b>	10 x 10 x 10	10 x 10 x 10	10 x 10 x 10	20 x 20 x 20	
<b>Antall celler</b>	1 008 000	1 008 000	1 008 000	576 000	3 600 000

5 cm grid	Cellestørrelse	Antall celler
Grid 1 [Gul]	10 x 10 x 10	259000
Grid 2 [Orange]	5 x 5 x 5	979000
Grid 3 [Rød]	5 x 5 x 5	979000
Grid 4 [Grønn]	5 x 5 x 5	979000
Grid 5 [Rosa]	10 x 10 x 10	1051000
Grid 6 [Lila]	10 x 10 x 10	1000800
Grid 7 [Blå]	20 x 20 x 20	482000
Grid 8 [Cyan]	20 x 20 x 20	34425
Grid 9 [Cyan]	20 x 20 x 20	34425
Grid 10 [Cyan]	20 x 20 x 20	34425
Grid 11 [Cyan]	20 x 20 x 20	34425
<b>Totalt</b>		<b>5867500</b>

## Simulering #11-12



Grid-inndeling for 20cm grid, jet langs med tak

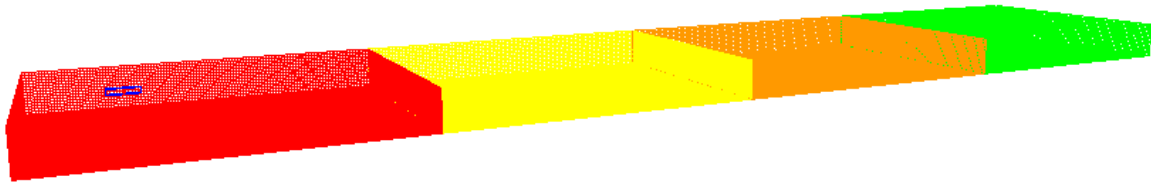
20cm grid	Grid 1 [Gul]	Grid 2 [Orange]	Grid 3 [Rød]	Grid [Grønn]	4	Totalt
<b>Cellestørrelse [cm]</b>	20 x 20 x 21	20 x 20 x 21	20 x 20 x 21	40 x 40 x 40		
<b>Antall celler</b>	84 000	84 000	84 000	48 000		300 000

Grid-inndeling for 10cm grid, jet langs med tak

10 cm grid	Grid 1 [Gul]	Grid 2 [Orange]	Grid 3 [Rød]	Grid [Grønn]	4	Totalt
<b>Cellestørrelse [cm]</b>	10 x 10 x 10	10 x 10 x 10	10 x 10 x 10	20 x 20 x 20		
<b>Antall celler</b>	672 000	672 000	672 000	384 000		2 400 000

## Vedlegg 3 – Gridstørrelser

### Simulering #V01-11



Grid-inndeling for 9, 18 og 20cm grid, jet langs med tak

20cm grid	Grid 1 [Rød]	Grid 2 [Gul]	Grid 3 [Orange]	Grid 4 [Grønn]	Totalt
<b>Størrelse (X/Y/Z) [m]</b>	24 / 20 / 3	24 / 20 / 3	24 / 20 / 3	21,6 / 20 / 3	
<b>Cellestørrelse [cm]</b>	20 x 20 x 20	20 x 20 x 20	20 x 20 x 20	20 x 20 x 20	
<b>Antall celler</b>	180 000	180 000	180 000	162 000	702 000

18cm grid	Grid 1 [Rød]	Grid 2 [Gul]	Grid 3 [Orange]	Grid 4 [Grønn]	Totalt
<b>Størrelse (X/Y/Z) [m]</b>	24,3 / 19,44 / 2,88	24,3 / 19,44 / 2,88	24,3 / 19,44 / 2,88	24,3 / 19,44 / 2,88	
<b>Cellestørrelse [cm]</b>	18 x 18 x 18	18 x 18 x 18	18 x 18 x 18	18 x 18 x 18	
<b>Antall celler</b>	233 280	233 280	233 280	233 280	933 120

18cm grid Dobbel bredde	Grid 1 [Rød]	Grid 2 [Gul]	Grid 3 [Orange]	Grid 4 [Grønn]	Totalt
<b>Størrelse (X/Y/Z) [m]</b>	24,3 / 38,88 / 2,88	24,3 / 38,88 / 2,88	24,3 / 38,88 / 2,88	24,3 / 38,88 / 2,88	
<b>Cellestørrelse [cm]</b>	18 x 18 x 18	18 x 18 x 18	18 x 18 x 18	18 x 18 x 18	
<b>Antall celler</b>	466 560	466 560	466 560	466 560	1 866 240

9cm grid	Grid 1 [Rød]	Grid 2 [Gul]	Grid 3 [Orange]	Grid 4 [Grønn]	Totalt
<b>Størrelse (X/Y/Z) [m]</b>	24,3 / 19,44 / 2,88	24,3 / 19,44 / 2,88	24,3 / 19,44 / 2,88	24,3 / 19,44 / 2,88	
<b>Cellestørrelse [cm]</b>	9 x 9 x 9	9 x 9 x 9	9 x 9 x 9	9 x 9 x 9	
<b>Antall celler</b>	1 866 240	1 866 240	1 866 240	1 866 240	7 464 960



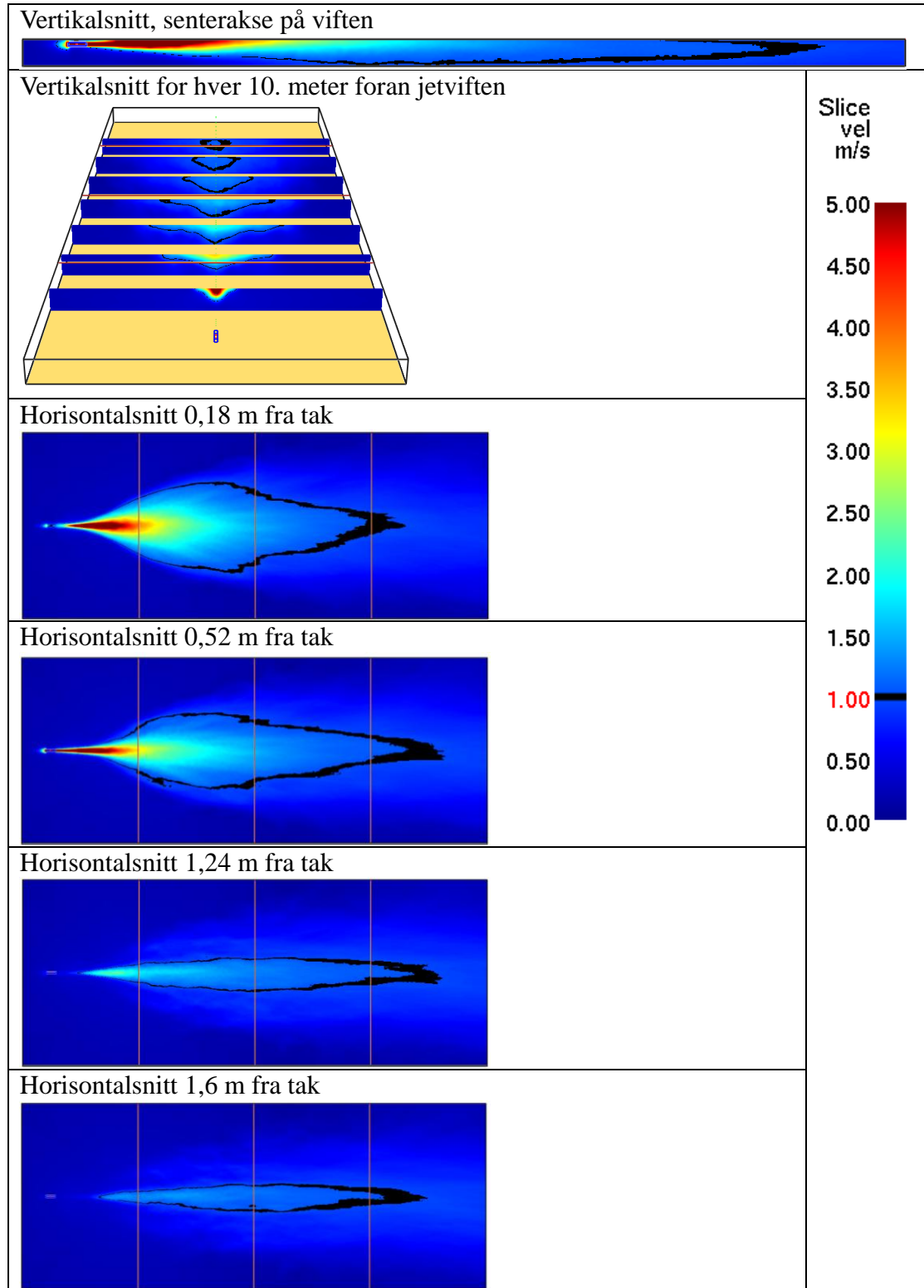


## Vedlegg 4 – Resultat simulering #19

Hastighetsprofiler for simulering #19.

$U_0=19,54\text{m/s}$ , Grid 18cm, Overkant vifte 36cm fra tak.

Beregningsdomene: 40m bred, 97m lang (90m foran viften), 3m høyt.





## Vedlegg 5 – TEK og VTEK §11-17 Tilrettelegging for rednings og slokkemannskap

### TEK (3)

#### § 11-17. Tilrettelegging for rednings- og slokkemannskap

1. Byggverk skal plasseres og utformes slik at rednings- og slokkemannskap, med nødvendig utstyr, har brukbar tilgjengelighet til og i byggverket for rednings- og slokkeinnsats.
2. Byggverk skal tilrettelegges slik at en brann lett kan lokaliseres og bekjempes.
3. Branntekniske installasjoner som har betydning for rednings- og slokkeinnsats skal være tydelig merket.

### VTEK (4)

#### § 11-17. Tilrettelegging for rednings- og slokkemannskap

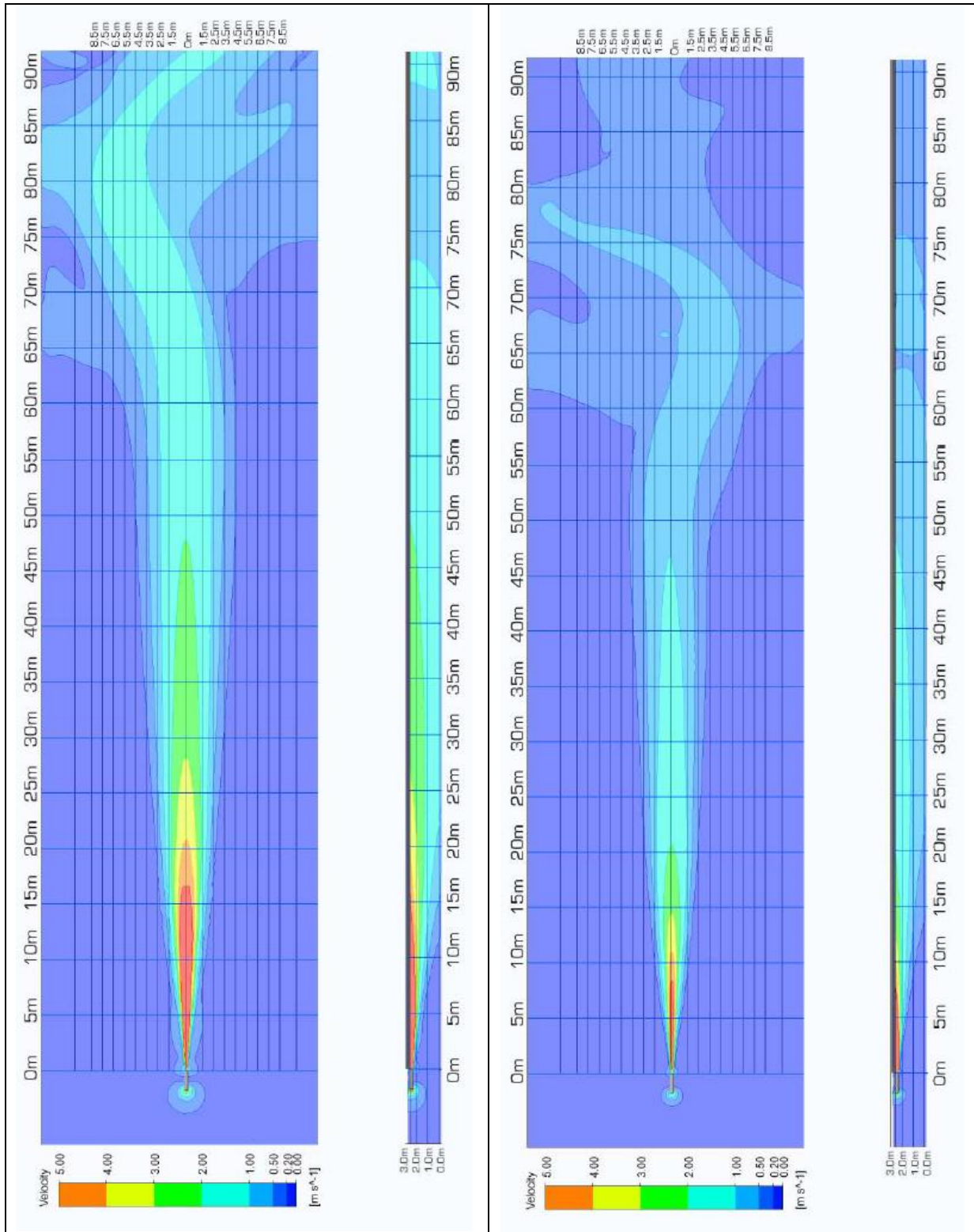
1. ***I parkeringskjellere som har bruttoareal mindre enn 400 m<sup>2</sup> eller har et automatisk slokkeanlegg, er det tilstrekkelig med normal ventilasjon (klima- og eksosventilasjon).***
2. *Parkeringskjellere uten automatisk slokkeanlegg og med bruttoareal større enn 400 m<sup>2</sup> må ha røykventilasjon. Dette kan være termisk røykventilasjon i samsvar med kapittel 10 i Melding HO-3/2000 Røykventilasjon. Temaveiledning eller mekanisk røykventilasjon basert på lateralt/langsgående ventilasjonsprinsipp.*
3. *Mekanisk røykventilasjon må ha ventilasjonsretning vekk fra inn- og utkjøringsrampe til parkeringskjelleren og til røykutkast i motsatt ende av rommet, plassert slik at røykspredning til overliggende byggverk unngås i størst mulig grad.*
4. ***Røykventilasjonen må dimensjoneres slik at det oppnås en lufthastighet i alle deler av rommet som hindrer tilbakestrømming av brannrøyk, normalt minst 1,0 m/s.***
5. *Antall og plassering av brannvesenets angrepsveier til parkeringskjeller må være slik at alle deler av parkeringskjelleren kan nås med maksimalt 50 m slangeutlegg fra angrepsvei. Dersom en kjeller inneholder to eller flere brannseksjoner, må det være minst én angrepsvei til hver brannseksjon.*
6. *Angrepsvei må være uavhengig av rømningsveier.*
7. *Det må være en egen branncelle mellom heissjakt og parkeringskjeller. Denne branncellen kan ikke være en del av brannvesenets angrepsvei. For parkeringskjeller over 400 m<sup>2</sup> må branncellen utføres som brannsluse.*
8. *Angrepsveier (trapperom) til parkeringskjellere med plan under øverste kjellergulv må ha brannsluse med tørroplegg for slokkevann på hvert plan.*
9. *Angrepsvei må være skilt fra resten av byggverket med murte eller støpte bygningsdeler med brannmotstand minst EI 60 A2-s1,d0 [A 60].*
10. *Det må være en lett synlig orienteringsplan som inneholder nødvendig informasjon om brannskillende bygningsdeler, rømnings- og angrepsveier, slokkeutstyr og branntekniske installasjoner (alarm- og slokkeanlegg) for parkeringskjelleren på vegg ved inn- og utkjøringsrampe og i alle angrepsveier.*

Røykventilasjon av parkeringskjeller er et tiltak for tilrettelegging for rednings- og slokkeinnsats. Røykventilasjon erstatter derfor ikke brannalarmanlegg eller automatisk slokkeanlegg



## Vedlegg 6 Hastighetsprofiler fra produsenten Fläktwoods

Simulering av 400mm jetvifte i CFD programmet CFX (RANS simulering).  
Full hastighet til venstre (øverst) og halv hastighet til høyre (nederst)





**Vedlegg 7 – Sammenstilling av simuleringer i artikler**

	Brannareal	HRR	Brensel	Cellestørrelse (X,Y,Z) [cm]	Turbulensmodell	Andel stråling (RADIATIVE FRACTION)	Smokeyield	Randbetingelser for gulv, vegger og tak
<b>Jangi et al (42)</b>	3 x 3 m 9m <sup>2</sup>	4 MW Lineær brannvekst 600 s.	Kun varmekilde	20 x 20 x 20	Standard	0,3	-	-
<b>Tilley et al (43)</b>	26m <sup>2</sup>	4 MW	-	20 x 20 x 10	Standard	0,34	-	Adiabatisk
<b>Deckers et al (58)</b>	3 x 1,5 m 4,5m <sup>2</sup>	Parametervariasjon mellom 0,2-4MW	Heksan	20 x 20 x 15 Finere 25cm nære taket: 20 x 20 x 5	Standard	0,2	0.22	Adiabatisk
<b>Zhang et al (56)</b>	4,8 x 1,8 m 8,64m <sup>2</sup>	Ventilasjonskontrollert Maks 70 MW	Heptan	20 x 20 x 10	Standard	-	0,037	-
<b>Viegas (57)</b>	-	4MW konvektiv	-	33 x 33 x 28,7	-	-	-	Adiabatisk
<b>Lu et al. (46)</b>	5x3m	4MW med medium brannvekst	-	20 x 20 x 20	-	-	0,05	Betong





## Vedlegg 8 – FDS input-fil for simulering #04

```

&HEAD CHID='Jetfan_fri_dynsmag_grid200', TITLE='Jetfan_fri_dynsmag_grid200'/
&TIME T_END=60.0/
&DUMP NFRAMES=600/
&MISC RADIATION=.FALSE., DYNMAG=.TRUE./

&MESH ID='MESH1', COLOR='YELLOW', IJK=35,60,60, XB=-3.0,4.0,-6.0,6.0,-6.0,6.0/
&MESH ID='MESH2', RGB=255,153,0, IJK=35,60,60, XB=4.0,11.0,-6.0,6.0,-6.0,6.0/
&MESH ID='MESH3', RGB=255,51,0, IJK=35,60,60, XB=11.0,18.0,-6.0,6.0,-6.0,6.0/
&MESH ID='MESH4', RGB=51,255,51, IJK=80,30,30, XB=18.0,50.0,-6.0,6.0,-6.0,6.0/

&DEVC ID='Hastighet-U 00101', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=0.0,0.0,0.0, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='Hastighet-U 00102', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=0.5,0.0,0.0, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='Hastighet-U 00103', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=1.0,0.0,0.0, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/

... FORKORTET INPUT-FILEN. En hastighetsmåler hver 50cm frem til 50m

&DEVC ID='Hastighet-U 00199', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=49.0,0.0,0.0, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='Hastighet-U 00200', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=49.5,0.0,0.0, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='Hastighet-U 00201', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=50.0,0.0,0.0, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/

&SURF ID='VIFTE',
      VEL=20.0,
      TAU_V=5.0,
      POROUS=.TRUE./

&OBST XB=-2.0,0.0,-0.2,-0.2,-0.2,0.2, COLOR='BLUE', SURF_ID='INERT'/ Jetvifte
&OBST XB=-2.0,0.0,0.2,0.2,-0.2,0.2, COLOR='BLUE', SURF_ID='INERT'/ Jetvifte
&OBST XB=-2.0,0.0,-0.2,0.2,-0.2,-0.2, COLOR='BLUE', SURF_ID='INERT'/ Jetvifte
&OBST XB=-2.0,0.0,-0.2,0.2,0.2,0.2, COLOR='BLUE', SURF_ID='INERT'/ Jetvifte
&OBST XB=-1.0,-1.0,-0.2,0.2,-0.2,0.2, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE'/ VIFTE

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-3.0,-3.0,-6.0,6.0,-6.0,6.0, COLOR='INVISIBLE'/ Vent XMIN
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=50.0,50.0,-6.0,6.0,-6.0,6.0, COLOR='INVISIBLE'/ Vent XMAX
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-3.0,50.0,-6.0,-6.0,-6.0,6.0, COLOR='INVISIBLE'/ Vent YMIN
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-3.0,50.0, 6.0,6.0,-6.0,6.0, COLOR='INVISIBLE'/ Vent YMAX
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-3.0,50.0,-6.0,6.0,-6.0,-6.0, COLOR='INVISIBLE'/ Vent ZMIN
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-3.0,50.0,-6.0,6.0,6.0,6.0, COLOR='INVISIBLE'/ Vent ZMAX

&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.0/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=0.0/

&TAIL /

```



## Vedlegg 9 – FDS input-fil for simulering #09

### Vedlegg 9 – FDS input-fil for simulering #09

```
HEAD CHID='Jetfan_fri_cs02_grid050_bokser', TITLE='Jetfan_fri_cs020_grid050'/
&TIME T_END=60.0/
&DUMP NFRAMES=600/
&MISC RADIATION=.FALSE., CHECK_KINETIC_ENERGY=.TRUE./

&MESH ID='MESH1', RGB=255,255,0, IJK=18,120,120, XB=-3.0,-1.2,-6.0,6.0,-6.0,6.0, MPI_PROCESS=0/
259 000
&MESH ID='MESH2', RGB=255,153,0, IJK=68,120,120, XB=-1.2,2.2,-3.0,3.0,-3.0,3.0, MPI_PROCESS=1/
979 000
&MESH ID='MESH3', RGB=255,51,0, IJK=68,120,120, XB=2.2,5.6,-3.0,3.0,-3.0,3.0, MPI_PROCESS=2/
979 000
&MESH ID='MESH4', RGB=51,255,51, IJK=68,120,120, XB=5.6,9.0,-3.0,3.0,-3.0,3.0, MPI_PROCESS=3/
979 000
&MESH ID='MESH5', RGB=255,0,204, IJK=73,120,120, XB=9.0,16.3,-6.0,6.0,-6.0,6.0, MPI_PROCESS=4/
1 051 000
&MESH ID='MESH6', RGB=102,0,102, IJK=70,120,120, XB=16.3,23.3,-6.0,6.0,-6.0,6.0, MPI_PROCESS=5/
1 000 800
&MESH ID='MESH7', RGB=0,0,204, IJK=134,60,60, XB=23.3,50.1,-6.0,6.0,-6.0,6.0, MPI_PROCESS=6/
482 000
&MESH ID='MESH8', RGB=153,255,255, IJK=51,45,15, XB=-1.2,9.0,-3.0,6.0,3.0,6.0, MPI_PROCESS=7/
34 425
&MESH ID='MESH9', RGB=153,255,255, IJK=51,15,45, XB=-1.2,9.0,3.0,6.0,-6.0,3.0, MPI_PROCESS=7/
34 425
&MESH ID='MESH10', RGB=153,255,255, IJK=51,45,15, XB=-1.2,9.0,-6.0,3.0,-6.0,-3.0, MPI_PROCESS=7/
34 425
&MESH ID='MESH11', RGB=153,255,255, IJK=51,15,45, XB=-1.2,9.0,-6.0,-3.0,-3.0,6.0, MPI_PROCESS=7/
34 425

&DEVC ID='Hastighet-U 00101', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=0.0,0.0,0.0, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='Hastighet-U 00102', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=0.5,0.0,0.0, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='Hastighet-U 00103', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=1.0,0.0,0.0, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/

... FORKORTET INPUT-FILEN. En hastighetsmåler hver 50cm frem til 50m

&DEVC ID='Hastighet-U 00199', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=49.0,0.0,0.0, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='Hastighet-U 00200', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=49.5,0.0,0.0, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='Hastighet-U 00201', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=50.0,0.0,0.0, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/
&SURF ID='VIFTE',
VEL=20.0,
TAU_V=5.0,
POROUS=.TRUE./

&OBST XB=-2.0,0.0,-0.2,-0.2,-0.2,0.2, COLOR='BLUE', SURF_ID='INERT'/ Jetvifte
&OBST XB=-2.0,0.0,0.2,0.2,-0.2,0.2, COLOR='BLUE', SURF_ID='INERT'/ Jetvifte
&OBST XB=-2.0,0.0,-0.2,0.2,-0.2,-0.2, COLOR='BLUE', SURF_ID='INERT'/ Jetvifte
&OBST XB=-2.0,0.0,-0.2,0.2,0.2,0.2, COLOR='BLUE', SURF_ID='INERT'/ Jetvifte
&OBST XB=-1.0,-1.0,-0.2,0.2,-0.2,0.2, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE'/ VIFTE

&OBST XB=-0.4,-0.45,-0.05,-0.10,0,-0.10, COLOR='GREEN', SURF_ID='INERT'/ VIFTE
&OBST XB=-0.5,-0.55,0.05,0.10,0,0.10, COLOR='GREEN', SURF_ID='INERT'/ VIFTE
&OBST XB=-0.6,-0.65,0,-0.10,0.05,0.10, COLOR='GREEN', SURF_ID='INERT'/ VIFTE
&OBST XB=-0.7,-0.75,0,0.10,-0.05,-0.10, COLOR='GREEN', SURF_ID='INERT'/ VIFTE

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-3.0,-3.0,-6.0,6.0,-6.0,6.0, COLOR='INVISIBLE'/ Vent XMIN
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=50.0,50.0,-6.0,6.0,-6.0,6.0, COLOR='INVISIBLE'/ Vent XMAX
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-3.0,50.0,-6.0,-6.0,-6.0,6.0, COLOR='INVISIBLE'/ Vent YMIN
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-3.0,50.0,6.0,6.0,-6.0,6.0, COLOR='INVISIBLE'/ Vent YMAX
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-3.0,50.0,-6.0,6.0,-6.0,-6.0, COLOR='INVISIBLE'/ Vent ZMIN
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-3.0,50.0,-6.0,6.0,6.0,6.0, COLOR='INVISIBLE'/ Vent ZMAX

&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.0/
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBX=0.0/

&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=0.0/

&TAIL /
```



## Vedlegg 10 – FDS input-fil for simulering #12

```

&HEAD CHID='Jetfan_tak_dynsmag_grid100', TITLE='Jetfan_tak_dynsmag_grid100'/
&TIME T_END=60.0/
&DUMP NFRAMES=600/
&MISC RADIATION=.FALSE., DYNMAG=.TRUE./

&MESH ID='MESH1', COLOR='YELLOW', IJK=70,120,81, XB=-3.0,4.0,-6.0,6.0,-8.0,0.4/
&MESH ID='MESH2', RGB=255,153,0, IJK=70,120,81, XB=4.0,11.0,-6.0,6.0,-8.0,0.4/
&MESH ID='MESH3', RGB=255,51,0, IJK=70,120,81, XB=11.0,18.0,-6.0,6.0,-8.0,0.4/
&MESH ID='MESH4', RGB=51,255,51, IJK=160,60,40, XB=18.0,50.0,-6.0,6.0,-8.0,0.4/

&DEVC ID='Hastighet-U 00101', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=0.0,0.0,0.0, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='Hastighet-U 00102', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=0.5,0.0,0.0, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='Hastighet-U 00103', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=1.0,0.0,0.0, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='Hastighet-U 00104', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=1.5,0.0,0.0, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/

... FORKORTET INPUT-FILEN. En hastighetsmåler hver 50cm frem til 50m

&DEVC ID='Hastighet-U 00199', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=49.0,0.0,0.0, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='Hastighet-U 00200', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=49.5,0.0,0.0, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='Hastighet-U 00201', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=50.0,0.0,0.0, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/
&SURF ID='VIFTE',
    VEL=20.0,
    TAU_V=5.0,
    POROUS=.TRUE./
&SURF ID='ADIABATIC',
    COLOR='GRAY 80',
    ADIABATIC=.TRUE./

&OBST XB=-2.0,0.0,-0.2,-0.2,-0.2,0.2, COLOR='BLUE', SURF_ID='INERT'/ Jetvifte
&OBST XB=-2.0,0.0,0.2,0.2,-0.2,0.2, COLOR='BLUE', SURF_ID='INERT'/ Jetvifte
&OBST XB=-2.0,0.0,-0.2,0.2,-0.2,-0.2, COLOR='BLUE', SURF_ID='INERT'/ Jetvifte
&OBST XB=-2.0,0.0,-0.2,0.2,0.2,0.2, COLOR='BLUE', SURF_ID='INERT'/ Jetvifte
&OBST XB=-1.0,-1.0,-0.2,0.2,-0.2,0.2, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE'/ VIFTE

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-3.0,-3.0,-6.0,6.0,-8.0,0.4, COLOR='INVISIBLE'/ Vent XMIN
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=50.0,50.0,-6.0,6.0,-8.0,0.4, COLOR='INVISIBLE'/ Vent XMAX
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-3.0,50.0,-6.0,-6.0,-8.0,0.4, COLOR='INVISIBLE'/ Vent YMIN
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-3.0,50.0,6.0,6.0,-8.0,0.4, COLOR='INVISIBLE'/ Vent YMAX
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-3.0,50.0,-6.0,6.0,-8.0,-8.0, COLOR='INVISIBLE'/ Vent ZMIN
&VENT SURF_ID='ADIABATIC', XB=-3.0,50.0,-6.0,6.0,0.4,0.4, COLOR='INVISIBLE'/ Vent ZMAX

&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.0/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=0.0/

&DEVC ID='FLOW', QUANTITY='VOLUME FLOW', XB=0.0,0.0,-0.2,2.0,-0.2,0.2/

&TAIL /

```



**Vedlegg 11 – FDS input-fil for simulering #V09**

```

&HEAD CHID='Jetfan_veri_grid180_36cmFraTak', TITLE='Jetfan_veri_dynsmag_grid180_36cmFraTak'/
&TIME T_END=180.0/
&DUMP RENDER FILE='Jetfan_verifisering_grid180.gel', DT_RESTART=300.0, NFRAMES=180/
&MISC RADIATION=.FALSE., DYNMAG=.TRUE./

&MESH ID='MESH1', COLOR='RED', IJK=135,108,16, XB=-7.0,17.3,-9.72,9.72,-2.68,0.2/
&MESH ID='MESH2', COLOR='YELLOW', IJK=135,108,16, XB=17.3,41.6,-9.72,9.72,-2.68,0.2/
&MESH ID='MESH3', RGB=255,153,0, IJK=135,108,16, XB=41.6,65.9,-9.72,9.72,-2.68,0.2/
&MESH ID='MESH4', COLOR='GREEN', IJK=135,108,16, XB=65.9,90.2,-9.72,9.72,-2.68,0.2/

&DEVC ID='U-Velocity01', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=-0.5,0.0,-0.34, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='U-Velocity02', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=0.0,0.0,-0.34, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='U-Velocity03', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=0.5,0.0,-0.34, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/

... FORKORTET INPUT-FILEN. En hastighetsmåler hver 50cm frem til 89,5m

&DEVC ID='U-Velocity179', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=88.5,0.0,-0.34, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='U-Velocity180', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=89.0,0.0,-0.34, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='U-Velocity181', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=89.5,0.0,-0.34, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/

&SURF ID='VIFTE',
    VEL=19.34,
    TAU_V=5.0,
    POROUS=.TRUE./

&SURF ID='JETVIFTE', FREE_SLIP=.TRUE., ADIABATIC=.TRUE./

&OBST XB=-2.0,0.0,-0.18,-0.18,-0.52,-0.16, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ Jetvifte
&OBST XB=-2.0,0.0,0.18,0.18,-0.52,-0.16, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ Jetvifte
&OBST XB=-2.0,0.0,-0.18,0.18,-0.52,-0.52, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ Jetvifte
&OBST XB=-2.0,0.0,-0.18,0.18,-0.16,-0.16, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ Jetvifte
&OBST XB=-1.0,-1.0,-0.18,0.18,-0.52,-0.16, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE'/ VIFTE

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-7.0,-7.0,-10.0,10.0,-2.8,0.2, COLOR='INVISIBLE'/ Vent XMIN
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=90.2,90.2,-10.0,10.0,-2.8,0.2, COLOR='INVISIBLE'/ Vent XMAX
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-7.0,90.2,-10.0,-10.0,-2.8,0.2, COLOR='INVISIBLE'/ Vent YMIN
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-7.0,90.2,10.0,10.0,-2.8,0.2, COLOR='INVISIBLE'/ Vent YMAX

&OBST SURF_ID='INERT', XB=-7.0,90,-10.0,10.0,-2.8,-2.8, COLOR='BROWN'/ Gulv
&OBST SURF_ID='INERT', XB=-7.0,90,-10.0,10.0,0.2,0.2, COLOR='BROWN'/ Tak

&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.0/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=-2/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=2/

&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=0.0/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=0.2/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=-0.2/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=-0.4/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=-1/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=-1.5/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=-2/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=-2.5/

&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=5/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=10/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=15/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=20/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=30/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=40/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=50/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=60/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=70/

&DEVC ID='FLOW', QUANTITY='VOLUME FLOW', XB=0.0,0.0,-0.18,0.18,-0.52,-0.16/

&TAIL /

```





**Vedlegg 12 – FDS input-fil for simulering #F03 Dynsmag betong**

```

&HEAD CHID='F03 Dynsmag Betong Finere grid'/
&TIME T_END=380.0/
&DUMP NFRAMES=380/
&MISC RADIATION=.FALSE., SURF_DEFAULT='BETONG', DYNMAG=.TRUE., FLUX_LIMITER=2/

&MESH ID='MESH1', IJK=110,192,32, XB=-45.0,-25.0,-17.2,17.36,-0.2,2.68/
&MESH ID='MESH2', IJK=110,192,32, XB=-25.0,-5.0,-17.2,17.36,-0.2,2.68/
&MESH ID='MESH3', IJK=110,192,32, XB=-5.0,15.0,-17.2,17.36,-0.2,2.68/
&MESH ID='MESH4', IJK=110,192,32, XB=15.0,35.0,-17.2,17.36,-0.2,2.68/

&REAC ID='POLYURETHANE',
      FYI='NFPA Babrauskas',
      C=6.3,
      H=7.1,
      O=2.1,
      N=1.0,
      SOOT_YIELD=0.1,
      HEAT_OF_COMBUSTION=24000,
      C_EDC=0.001/

&RAMP ID='BILBRANN_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='BILBRANN_RAMP_Q', T=15.0, F=1.0/

&RAMP ID='VIFTE HAST', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='VIFTE HAST', T=15.0, F=1.0/

&MATL ID='BETONG',
      FYI='NBSIR 88-3752 - ATF NIST Multi-Floor Validation',
      SPECIFIC_HEAT=1.04,
      CONDUCTIVITY=1.8,
      DENSITY=2280.0/

&SURF ID='BETONG',
      COLOR='GRAY 60',
      MATL_ID(1,1)='BETONG',
      MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
      THICKNESS(1)=0.18/

&SURF ID='BILBRANN',
      COLOR='RED',
      HRRPUA=266.7,
      RAMP_Q='BILBRANN_RAMP_Q'/

&SURF ID='INNLUFT',
      RGB=204,255,255,
      VEL=-1.0,
      RAMP_V='VIFTE HAST'/

&OBST XB=0.0,7.5,0.0,5.0,0.0,0.54/ BOKS MED BRANN
&VENT XB=0.0,7.5,0.0,5.0,0.54,0.54, COLOR='RED', SURF_ID='BILBRANN' /

&OBST XB=-45.0,35.0,-17.2,17.2,2.4,2.6, OUTLINE=.TRUE., SURF_ID='BETONG'/ TAK
&OBST XB=-45.0,35.0,-12.0,-5.0,-0.2,0.0, SURF_ID='BETONG'/ VEI1
&OBST XB=-45.0,35.0,5.0,12.0,-0.2,0.0, SURF_ID='BETONG'/ VEI2
&OBST XB=-45.0,35.0,-17.2,-12.0,-0.2,0.0, SURF_ID='BETONG'/ PARKERING1
&OBST XB=-45.0,35.0,12.0,17.2,-0.2,0.0, SURF_ID='BETONG'/ PARKERING3
&OBST XB=-45.0,35.0,-5.0,5.0,-0.2,0.0, SURF_ID='BETONG'/ PARKERING2
&OBST XB=-45.0,35.0,17.0,17.2,0.0,2.4, OUTLINE=.TRUE., SURF_ID='BETONG'/ VEGG1
&OBST XB=-45.0,35.0,-17.2,-17.0,0.0,2.4, OUTLINE=.TRUE., SURF_ID='BETONG'/ VEGG2

&VENT SURF_ID='INNLUFT', XB=-45.0,-45.0,-17.0,17.0,0.0,2.4/ INNLUFT
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=35.0,35.0,-17.0,17.0,0.0,2.4/ UT

&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBX=2.5/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBX=0/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBZ=2/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBZ=1/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=8.5/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', PBX=8.5/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=8.5/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=2.0/

```



## Vedlegg 13 – FDS input-fil for simulering #G12

```

&HEAD CHID='G12 Med vifter Config3 - 1,0ms - Med biler - Midt i rommet'/
&TIME T_END=240.0/
&MISC RADIATION=.FALSE., CHECK_KINETIC_ENERGY=.TRUE., DYNMAG=.TRUE., FLUX_LIMITER=2,
      SURF_DEFAULT='ADIABATIC'/
&RADI RADIATIVE_FRACTION=0.3 /

&MESH ID='MESH1', IJK=110,192,16, XB=-45.0,-25.0,-17.2,17.36,-0.2,2.68/
&MESH ID='MESH2', IJK=110,192,16, XB=-25.0,-5.0,-17.2,17.36,-0.2,2.68/
&MESH ID='MESH3', IJK=110,192,16, XB=-5.0,15.0,-17.2,17.36,-0.2,2.68/
&MESH ID='MESH4', IJK=110,192,16, XB=15.0,35.0,-17.2,17.36,-0.2,2.68/

----- BRENSEL
&REAC ID='POLYURETHANE',
      FYI='NFPA Babrauskas',
      C=6.3,
      H=7.1,
      O=2.1,
      N=1.0,
      HEAT_OF_COMBUSTION=24000,
      SOOT_YIELD=0.2,
      C_EDC=0.001/

----- RAMP
&RAMP ID='BILBRANN_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='BILBRANN_RAMP_Q', T=20.0, F=0.2/
&RAMP ID='BILBRANN_RAMP_Q', T=40.0, F=0.6/
&RAMP ID='BILBRANN_RAMP_Q', T=60.0, F=1.0/

&RAMP ID='VIFTE HAST', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='VIFTE HAST', T=5.0, F=0.2/
&RAMP ID='VIFTE HAST', T=10.0, F=0.6/
&RAMP ID='VIFTE HAST', T=15.0, F=1.0/

----- OVERFLATER

&SURF ID='ADIABATIC',
      ADIABATIC=.TRUE./

&SURF ID='BETONG',
      COLOR='GRAY 60',
      ADIABATIC=.TRUE./

&SURF ID='VEI BETONG',
      COLOR='GRAY 40',
      ADIABATIC=.TRUE./

&SURF ID='BILBRANN',
      COLOR='RED',
      HRRPUA=265.0,
      RAMP_Q='BILBRANN_RAMP_Q'/

&SURF ID='VIFTE',
      VEL=19.34,
      POROUS=.TRUE.,
      RAMP_V='VIFTE HAST'/

&SURF ID='JETVIFTE',
      FREE_SLIP=.TRUE.,
      ADIABATIC=.TRUE./

&SURF ID='UTLUFT',
      RGB=204,255,255,
      VEL=4.938,
      RAMP_V='VIFTE HAST'/

----- BRANN
&OBST XB=0.0,2.52,0.0,5.0,0.0,0.18, SURF_IDS='BILBRANN','ADIABATIC','ADIABATIC'/ BILBRANN1
&OBST XB=3.06,5.58,0.0,5.0,0.0,0.18, SURF_IDS='BILBRANN','ADIABATIC','ADIABATIC'/ BILBRANN2
&OBST XB=6.12,8.64,0.0,5.0,0.0,0.18, SURF_IDS='BILBRANN','ADIABATIC','ADIABATIC'/ BILBRANN3

----- BILER

```

## Vedlegg 13 – FDS input-fil for simulering #G12

```
&MULT ID='bilrad1_1', DXB=-3,-3,0,0,0, N_LOWER=0, N_UPPER=13 /
&OBST XB=-2.3,-0.5,12,16.8,0.2,0.8, COLOR='GREEN' MULT_ID='bilrad1_1'/ BIL1-dell
&OBST XB=-2.3,-0.5,12,15.6,0.8,1.5, COLOR='GREEN' MULT_ID='bilrad1_1'/ BIL1-dell

&MULT ID='bilrad1_2', DXB=-3,-3,0,0,0, N_LOWER=0, N_UPPER=10 /
&OBST XB=32,30.2,12,16.8,0.2,0.8, COLOR='GREEN' MULT_ID='bilrad1_2'/ BIL1-del2
&OBST XB=32,30.2,12,15.6,0.8,1.5, COLOR='GREEN' MULT_ID='bilrad1_2'/ BIL1-del2

&MULT ID='bilrad2_1', DXB=-3,-3,0,0,0, N_LOWER=0, N_UPPER=13 /
&OBST XB=-2.6,-0.8,0.2,5.0,0.2,0.8, COLOR='GREEN' MULT_ID='bilrad2_1'/ BIL2
&OBST XB=-2.6,-0.8,1.5,5.0,0.8,1.5, COLOR='GREEN' MULT_ID='bilrad2_1'/ BIL2

&MULT ID='bilrad2_2', DXB=-3,-3,0,0,0, N_LOWER=0, N_UPPER=7 /
&OBST XB=32,30.2,0.2,5.0,0.2,0.8, COLOR='GREEN' MULT_ID='bilrad2_2'/ BIL2-nedenfor brannen
&OBST XB=32,30.2,1.5,5.0,0.8,1.5, COLOR='GREEN' MULT_ID='bilrad2_2'/ BIL2-nedenfor brannen

&MULT ID='bilrad3', DXB=-3,-3,0,0,0, N_LOWER=0, N_UPPER=24 /
&OBST XB=32,30.2,-0.2,-5,0.2,0.8, COLOR='GREEN' MULT_ID='bilrad3'/ BIL3
&OBST XB=32,30.2,-1.5,-5,0.8,1.5, COLOR='GREEN' MULT_ID='bilrad3'/ BIL3

&MULT ID='bilrad4', DXB=-3,-3,0,0,0, N_LOWER=0, N_UPPER=24 /
&OBST XB=32,30.2,-12,-16.8,0.2,0.8, COLOR='GREEN' MULT_ID='bilrad4'/ BIL4
&OBST XB=32,30.2,-12,-15.6,0.8,1.5, COLOR='GREEN' MULT_ID='bilrad4'/ BIL4

----- GEOMETRI

&OBST XB=-45.0,35.0,-17.2,17.2,2.4,2.6, OUTLINE=.TRUE., SURF_ID='BETONG'/ TAK
&OBST XB=-45.0,35.0,-12.0,-5.0,-0.3,0.0, SURF_ID='VEI BETONG'/ VEI1
&OBST XB=-45.0,35.0,5.0,12.0,-0.3,0.0, SURF_ID='VEI BETONG'/ VEI2
&OBST XB=-45.0,35.0,-17.2,-12.0,-0.3,0.0, SURF_ID='BETONG'/ PARKERING1
&OBST XB=-45.0,35.0,12.0,17.2,-0.3,0.0, SURF_ID='BETONG'/ PARKERING3
&OBST XB=-45.0,35.0,-5.0,5.0,-0.3,0.0, SURF_ID='BETONG'/ PARKERING2
&OBST XB=-45.0,35.0,17.0,17.2,0.0,2.4, OUTLINE=.TRUE., SURF_ID='BETONG'/ VEGG1
&OBST XB=-45.0,35.0,-17.2,-17.0,0.0,2.4, OUTLINE=.TRUE., SURF_ID='BETONG'/ VEGG2
&OBST XB=-45.0,-44.8,-17.0,17.0,0.0,2.4, OUTLINE=.TRUE., SURF_ID='BETONG'/ VEGG3
&OBST XB= 34.8, 35.0,-17.0,17.0,0.0,2.4, OUTLINE=.TRUE., SURF_ID='BETONG'/ VEGG4

----- JETVIFTER

&OBST XB=-35.0,-35.0,7.82,8.18,1.68,2.04, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE'/ VIFTE 0
&OBST XB=-36.0,-34.0,7.82,7.82,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 0
&OBST XB=-36.0,-34.0,8.18,8.18,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 0
&OBST XB=-36.0,-34.0,7.82,8.18,1.68,1.68, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 0
&OBST XB=-36.0,-34.0,7.82,8.18,2.04,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 0

&OBST XB=-35.0,-35.0,-8.18,-7.82,1.68,2.04, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE'/ VIFTE 00
&OBST XB=-36.0,-34.0,-8.18,-8.18,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 00
&OBST XB=-36.0,-34.0,-7.82,-7.82,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 00
&OBST XB=-36.0,-34.0,-8.18,-7.82,1.68,1.68, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 00
&OBST XB=-36.0,-34.0,-8.18,-7.82,2.04,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 00

&OBST XB=-20.0,-20.0,12.24,12.6,1.68,2.04, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE'/ VIFTE 1
&OBST XB=-21.0,-19.0,12.24,12.24,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 1
&OBST XB=-21.0,-19.0,12.60,12.6,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 1
&OBST XB=-21.0,-19.0,12.24,12.6,1.68,1.68, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 1
&OBST XB=-21.0,-19.0,12.24,12.6,2.04,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 1

&OBST XB=-20.0,-20.0,-0.18,0.18,1.68,2.04, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE'/ VIFTE 2
&OBST XB=-21.0,-19.0,-0.18,-0.18,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 2
&OBST XB=-21.0,-19.0,0.18,0.18,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 2
&OBST XB=-21.0,-19.0,-0.18,0.18,1.68,1.68, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 2
&OBST XB=-21.0,-19.0,-0.18,0.18,2.04,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 2

&OBST XB=-20.0,-20.0,-12.6,-12.24,1.68,2.04, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE'/ VIFTE 3
&OBST XB=-21.0,-19.0,-12.6,-12.6,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 3
&OBST XB=-21.0,-19.0,-12.24,-12.24,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 3
&OBST XB=-21.0,-19.0,-12.6,-12.24,1.68,1.68, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 3
&OBST XB=-21.0,-19.0,-12.6,-12.24,2.04,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 3

&OBST XB=-5.0,-5.0,7.82,8.18,1.68,2.04, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE'/ VIFTE 4
&OBST XB=-6.0,-4.0,7.82,7.82,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 4
&OBST XB=-6.0,-4.0,8.18,8.18,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 4
&OBST XB=-6.0,-4.0,7.82,8.18,1.68,1.68, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 4
&OBST XB=-6.0,-4.0,7.82,8.18,2.04,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 4
```

## Vedlegg 13 – FDS input-fil for simulering #G12

```
&OBST XB=-5.0,-5.0,-8.18,-7.82,1.68,2.04, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE'/ VIFTE 5
&OBST XB=-6.0,-4.0,-8.18,-8.18,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 5
&OBST XB=-6.0,-4.0,-7.82,-7.82,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 5
&OBST XB=-6.0,-4.0,-8.18,-7.82,1.68,1.68, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 5
&OBST XB=-6.0,-4.0,-8.18,-7.82,2.04,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 5

&OBST XB=10.0,10.0,12.24,12.6,1.68,2.04, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE'/ VIFTE 6
&OBST XB=9.0,11.0,12.24,12.24,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 6
&OBST XB=9.0,11.0,12.6,12.6,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 6
&OBST XB=9.0,11.0,12.24,12.6,1.68,1.68, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 6
&OBST XB=9.0,11.0,12.24,12.6,2.04,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 6

&OBST XB=10.0,10.0,-0.18,0.18,1.68,2.04, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE'/ VIFTE 7
&OBST XB=9.0,11.0,-0.18,-0.18,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 7
&OBST XB=9.0,11.0,0.18,0.18,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 7
&OBST XB=9.0,11.0,-0.18,0.18,1.68,1.68, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 7
&OBST XB=9.0,11.0,-0.18,0.18,2.04,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 7

&OBST XB=10.0,10.0,-12.6,-12.24,1.68,2.04, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE'/ VIFTE 8
&OBST XB=9.0,11.0,-12.6,-12.6,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 8
&OBST XB=9.0,11.0,-12.24,-12.24,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 8
&OBST XB=9.0,11.0,-12.6,-12.24,1.68,1.68, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 8
&OBST XB=9.0,11.0,-12.6,-12.24,2.04,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 8

----- TIL- OG FRALUFT

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-45.00,-45.00,-1.5,1.5,1.1,2.1, COLOR='GREEN'/ INNLUFT Midten
&HOLE XB=-44.78,-45.01,-1.5,1.5,1.1,2.1 /
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-45.00,-45.00,-8.0,-5.0,1.1,2.1, COLOR='GREEN'/ INNLUFT V2
&HOLE XB=-44.78,-45.01,-8.0,-5.0,1.1,2.1 /
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-45.00,-45.00,-15.0,-12.0,1.1,2.1, COLOR='GREEN'/ INNLUFT V1
&HOLE XB=-44.78,-45.01,-15.0,-12.0,1.1,2.1 /
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-45.00,-45.00,8.0,5.0,1.1,2.1, COLOR='GREEN'/ INNLUFT H2
&HOLE XB=-44.78,-45.01,8.0,5.0,1.1,2.1 /
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-45.00,-45.00,15.0,12.0,1.1,2.1, COLOR='GREEN'/ INNLUFT H1
&HOLE XB=-44.78,-45.01,15.0,12.0,1.1,2.1 /

&VENT SURF_ID='UTLUFT', XB=34.79,34.79,-1.5,1.5,1.1,2.1, COLOR='YELLOW'/ UTLUFT Midten
&VENT SURF_ID='UTLUFT', XB=34.79,34.79,-8.0,-5.0,1.1,2.1, COLOR='YELLOW'/ UTLUFT V2
&VENT SURF_ID='UTLUFT', XB=34.79,34.79,-15.0,-12.0,1.1,2.1, COLOR='YELLOW'/ UTLUFT V1
&VENT SURF_ID='UTLUFT', XB=34.79,34.79,8.0,5.0,1.1,2.1, COLOR='YELLOW'/ UTLUFT H2
&VENT SURF_ID='UTLUFT', XB=34.79,34.79,15.0,12.0,1.1,2.1, COLOR='YELLOW'/ UTLUFT H1

----- RESULTAT

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=8.5/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', PBY=8.5/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBY=8.5/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=2.0/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBZ=2.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=2.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-15.0/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=-15.0/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=-10.0/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=-5.0/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.0/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBZ=1.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=1.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=2.5/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', PBY=2.5/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBY=2.5/

&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBY=0/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBY=2.5/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBY=5/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBY=16/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBZ=1.5/

&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBY=0.0/
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBY=2.5/
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBY=1.55/
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBY=17/
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBY=16.8/
```

## Vedlegg 13 – FDS input-fil for simulering #G12

```
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBZ=1.8/  
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBZ=2.0/  
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBZ=2.2/  
  
&DEVC ID='FLOW_INN', QUANTITY='VOLUME FLOW', XB=-44.8,-44.8,-15,15,1.1,2.1 /  
&DEVC ID='FLOW_UT', QUANTITY='VOLUME FLOW', XB=34.8,34.8,-15,15,1.1,2.1 /  
  
&TAIL /
```

**Vedlegg 14 – FDS input-fil for simulering #GB03**

```

&HEAD CHID='GB03 Med vifter Config2 - 1,0ms - Uten biler - Midt i rommet'/
&TIME T_END=240.0/
&DUMP RENDER_FILE='GB03 Med vifter Config2 - 1,0ms - Uten biler - Midt i rommet.gel',
DT_RESTART=120.0/
&MISC RADIATION=.FALSE., CHECK_KINETIC_ENERGY=.TRUE., DYNMAG=.TRUE., FLUX_LIMITER=2,
SURF_DEFAULT='ADIABATIC'/
&RADI RADIATIVE_FRACTION=0.3 /

&MESH ID='MESH1', IJK=110,192,16, XB=-45.0,-25.0,-17.2,17.36,-0.2,2.68/
&MESH ID='MESH2', IJK=110,192,16, XB=-25.0,-5.0,-17.2,17.36,-0.2,2.68/
&MESH ID='MESH3', IJK=110,192,16, XB=-5.0,15.0,-17.2,17.36,-0.2,2.68/
&MESH ID='MESH4', IJK=110,192,16, XB=15.0,35.0,-17.2,17.36,-0.2,2.68/

----- BRENSEL
&REAC ID='POLYURETHANE',
      FYI='NFPA Babrauskas',
      C=6.3,
      H=7.1,
      O=2.1,
      N=1.0,
      HEAT_OF_COMBUSTION=24000,
      SOOT_YIELD=0.2,
      C_EDC=0.001/

----- RAMP
&RAMP ID='BILBRANN_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='BILBRANN_RAMP_Q', T=20.0, F=0.2/
&RAMP ID='BILBRANN_RAMP_Q', T=40.0, F=0.6/
&RAMP ID='BILBRANN_RAMP_Q', T=60.0, F=1.0/

&RAMP ID='VIFTE HAST', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='VIFTE HAST', T=5.0, F=0.2/
&RAMP ID='VIFTE HAST', T=10.0, F=0.6/
&RAMP ID='VIFTE HAST', T=15.0, F=1.0/

----- OVERFLATER
&SURF ID='ADIABATIC',
      ADIABATIC=.TRUE./

&SURF ID='BETONG',
      COLOR='GRAY 60',
      ADIABATIC=.TRUE./

&SURF ID='VEI BETONG',
      COLOR='GRAY 40',
      ADIABATIC=.TRUE./

&SURF ID='BILBRANN',
      COLOR='RED',
      HRRPUA=265.0,
      RAMP_Q='BILBRANN_RAMP_Q'/

&SURF ID='VIFTE',
      VEL=19.34,
      POROUS=.TRUE.,
      RAMP_V='VIFTE HAST'/

&SURF ID='JETVIFTE',
      FREE_SLIP=.TRUE.,
      ADIABATIC=.TRUE./

&SURF ID='UTLUFT',
      RGB=204,255,255,
      VEL=4.938,
      RAMP_V='VIFTE HAST'/

----- BRANN
&OBST XB=0.0,2.52,0.0,5.0,0.0,0.18, SURF_IDS='BILBRANN','ADIABATIC','ADIABATIC'/ BILBRANN1
&OBST XB=3.06,5.58,0.0,5.0,0.0,0.18, SURF_IDS='BILBRANN','ADIABATIC','ADIABATIC'/ BILBRANN2
&OBST XB=6.12,8.64,0.0,5.0,0.0,0.18, SURF_IDS='BILBRANN','ADIABATIC','ADIABATIC'/ BILBRANN3

```

## Vedlegg 14 – FDS input-fil for simulering #GB03

----- BJELKER

```
&MULT ID='bjelke_tvers', DXB=-8,-8,0,0,0, N_LOWER=0, N_UPPER=8 /
&OBST XB=25,25.4,-17,17,2,2.4, COLOR='GREEN' MULT_ID='bjelke_tvers' /
```

----- GEOMETRI

```
&OBST XB=-45.0,35.0,-17.2,17.2,2.4,2.6, OUTLINE=.TRUE., SURF_ID='BETONG' / TAK
&OBST XB=-45.0,35.0,-12.0,-5.0,-0.3,0.0, SURF_ID='VEI BETONG' / VEI1
&OBST XB=-45.0,35.0,5.0,12.0,-0.3,0.0, SURF_ID='VEI BETONG' / VEI2
&OBST XB=-45.0,35.0,-17.2,-12.0,-0.3,0.0, SURF_ID='BETONG' / PARKERING1
&OBST XB=-45.0,35.0,12.0,17.2,-0.3,0.0, SURF_ID='BETONG' / PARKERING3
&OBST XB=-45.0,35.0,-5.0,5.0,-0.3,0.0, SURF_ID='BETONG' / PARKERING2
&OBST XB=-45.0,35.0,17.0,17.2,0.0,2.4, OUTLINE=.TRUE., SURF_ID='BETONG' / VEGG1
&OBST XB=-45.0,35.0,-17.2,-17.0,0.0,2.4, OUTLINE=.TRUE., SURF_ID='BETONG' / VEGG2
&OBST XB=-45.0,-44.8,-17.0,17.0,0.0,2.4, OUTLINE=.TRUE., SURF_ID='BETONG' / VEGG3
&OBST XB= 34.8, 35.0,-17.0,17.0,0.0,2.4, OUTLINE=.TRUE., SURF_ID='BETONG' / VEGG4
```

----- JETVIFTER

```
&OBST XB=-25.0,-25.0,12.24,12.6,1.68,2.04, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE' / VIFTE 1
&OBST XB=-26.0,-24.0,12.24,12.24,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 1
&OBST XB=-26.0,-24.0,12.6,12.6,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 1
&OBST XB=-26.0,-24.0,12.24,12.6,1.68,1.68, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 1
&OBST XB=-26.0,-24.0,12.24,12.6,2.04,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 1

&OBST XB=-25.0,-25.0,-0.18,0.18,1.68,2.04, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE' / VIFTE 2
&OBST XB=-26.0,-24.0,-0.18,-0.18,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 2
&OBST XB=-26.0,-24.0,0.18,0.18,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 2
&OBST XB=-26.0,-24.0,-0.18,0.18,1.68,1.68, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 2
&OBST XB=-26.0,-24.0,-0.18,0.18,2.04,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 2

&OBST XB=-25.0,-25.0,-12.6,-12.24,1.68,2.04, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE' / VIFTE 3
&OBST XB=-26.0,-24.0,-12.6,-12.6,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 3
&OBST XB=-26.0,-24.0,-12.24,-12.24,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 3
&OBST XB=-26.0,-24.0,-12.6,-12.24,1.68,1.68, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 3
&OBST XB=-26.0,-24.0,-12.6,-12.24,2.04,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 3

&OBST XB=-5.0,-5.0,7.82,8.18,1.68,2.04, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE' / VIFTE 4
&OBST XB=-6.0,-4.0,7.82,7.82,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 4
&OBST XB=-6.0,-4.0,8.18,8.18,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 4
&OBST XB=-6.0,-4.0,7.82,8.18,1.68,1.68, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 4
&OBST XB=-6.0,-4.0,7.82,8.18,2.04,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 4

&OBST XB=-5.0,-5.0,-8.18,-7.82,1.68,2.04, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE' / VIFTE 5
&OBST XB=-6.0,-4.0,-8.18,-8.18,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 5
&OBST XB=-6.0,-4.0,-7.82,-7.82,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 5
&OBST XB=-6.0,-4.0,-8.18,-7.82,1.68,1.68, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 5
&OBST XB=-6.0,-4.0,-8.18,-7.82,2.04,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 5

&OBST XB=15.0,15.0,12.24,12.6,1.68,2.04, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE' / VIFTE 6
&OBST XB=14.0,16.0,12.24,12.24,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 6
&OBST XB=14.0,16.0,12.6,12.6,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 6
&OBST XB=14.0,16.0,12.24,12.6,1.68,1.68, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 6
&OBST XB=14.0,16.0,12.24,12.6,2.04,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 6

&OBST XB=15.0,15.0,-0.18,0.18,1.68,2.04, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE' / VIFTE 7
&OBST XB=14.0,16.0,-0.18,-0.18,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 7
&OBST XB=14.0,16.0,0.18,0.18,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 7
&OBST XB=14.0,16.0,-0.18,0.18,1.68,1.68, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 7
&OBST XB=14.0,16.0,-0.18,0.18,2.04,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 7

&OBST XB=15.0,15.0,-12.6,-12.24,1.68,2.04, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE' / VIFTE 8
&OBST XB=14.0,16.0,-12.6,-12.6,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 8
&OBST XB=14.0,16.0,-12.24,-12.24,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 8
&OBST XB=14.0,16.0,-12.6,-12.24,1.68,1.68, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 8
&OBST XB=14.0,16.0,-12.6,-12.24,2.04,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE' / VIFTE 8
```

----- TIL- OG FRALUFT

```
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-45.00,-45.00,-1.5,1.5,1.1,2.1, COLOR='GREEN' / INNLUFT Midten
&HOLE XB=-44.78,-45.01,-1.5,1.5,1.1,2.1 /
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-45.00,-45.00,-8.0,-5.0,1.1,2.1, COLOR='GREEN' / INNLUFT V2
&HOLE XB=-44.78,-45.01,-8.0,-5.0,1.1,2.1 /
```



## Vedlegg 14 – FDS input-fil for simulering #GB03

```
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-45.00,-45.00,-15.0,-12.0,1.1,2.1, COLOR='GREEN'/ INNLUFT V1
&HOLE XB=-44.78,-45.01,-15.0,-12.0,1.1,2.1 /
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-45.00,-45.00,8.0,5.0,1.1,2.1, COLOR='GREEN'/ INNLUFT H2
&HOLE XB=-44.78,-45.01,8.0,5.0,1.1,2.1 /
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-45.00,-45.00,15.0,12.0,1.1,2.1, COLOR='GREEN'/ INNLUFT H1
&HOLE XB=-44.78,-45.01,15.0,12.0,1.1,2.1 /

&VENT SURF_ID='UTLUFT', XB=34.79,34.79,-1.5,1.5,1.1,2.1, COLOR='YELLOW'/ UTLUFT Midten
&VENT SURF_ID='UTLUFT', XB=34.79,34.79,-8.0,-5.0,1.1,2.1, COLOR='YELLOW'/ UTLUFT V2
&VENT SURF_ID='UTLUFT', XB=34.79,34.79,-15.0,-12.0,1.1,2.1, COLOR='YELLOW'/ UTLUFT V1
&VENT SURF_ID='UTLUFT', XB=34.79,34.79,8.0,5.0,1.1,2.1, COLOR='YELLOW'/ UTLUFT H2
&VENT SURF_ID='UTLUFT', XB=34.79,34.79,15.0,12.0,1.1,2.1, COLOR='YELLOW'/ UTLUFT H1

----- RESULTAT

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=8.5/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', PBX=8.5/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=8.5/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=2.0/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBZ=2.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=2.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-15.0/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=-15.0/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=-10.0/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=-5.0/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.0/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBZ=1.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=1.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=2.5/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', PBX=2.5/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=2.5/

&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBX=0/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBX=2.5/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBX=5/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBX=16/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBZ=1.5/

&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBX=0.0/
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBX=2.5/
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBX=1.55/
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBX=17/
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBX=16.8/

&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBZ=1.8/
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBZ=2.0/
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBZ=2.2/

&DEVC ID='FLOW_INN', QUANTITY='VOLUME FLOW', XB=-44.8,-44.8,-15,15,1.1,2.1 /
&DEVC ID='FLOW_UT', QUANTITY='VOLUME FLOW', XB=34.8,34.8,-15,15,1.1,2.1 /

&TAIL /
```



## Vedlegg 15 – FDS input-fil for simulering #GC06

```

&HEAD CHID='GC06 Med vifter - 1,0ms - Uten biler - Ved veggen'/
&TIME T_END=240.0/
&DUMP RENDER_FILE='GC06 Med vifter - 1,0ms - Uten biler - Ved veggen.gel', DT_RESTART=120.0/
&MISC RADIATION=.FALSE., CHECK_KINETIC_ENERGY=.TRUE., DYNMAG=.TRUE., FLUX_LIMITER=2/
&RADI RADIATIVE_FRACTION=0.3 /

&MESH ID='MESH1', IJK=110,192,16, XB=-45.0,-25.0,-17.2,17.36,-0.2,2.68/
&MESH ID='MESH2', IJK=110,192,16, XB=-25.0,-5.0,-17.2,17.36,-0.2,2.68/
&MESH ID='MESH3', IJK=110,192,16, XB=-5.0,15.0,-17.2,17.36,-0.2,2.68/
&MESH ID='MESH4', IJK=110,192,16, XB=15.0,35.0,-17.2,17.36,-0.2,2.68/

----- BRENSSEL
&REAC ID='POLYURETHANE',
      FYI='NFPA Babrauskas',
      C=6.3,
      H=7.1,
      O=2.1,
      N=1.0,
      HEAT_OF_COMBUSTION=24000,
      SOOT_YIELD=0.2,
      C_EDC=0.001/

----- RAMP
&RAMP ID='BILBRANN_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='BILBRANN_RAMP_Q', T=20.0, F=0.2/
&RAMP ID='BILBRANN_RAMP_Q', T=40.0, F=0.6/
&RAMP ID='BILBRANN_RAMP_Q', T=60.0, F=1.0/

&RAMP ID='VIFTE HAST', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='VIFTE HAST', T=5.0, F=0.2/
&RAMP ID='VIFTE HAST', T=10.0, F=0.6/
&RAMP ID='VIFTE HAST', T=15.0, F=1.0/

----- OVERFLATER

&MATL ID='BETONG',
      FYI='NBSIR 88-3752 - ATF NIST Multi-Floor Validation',
      SPECIFIC_HEAT=1.04,
      CONDUCTIVITY=1.8,
      DENSITY=2280.0/

&SURF ID='BETONG',
      COLOR='GRAY 60',
      MATL_ID(1,1)='BETONG',
      MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
      THICKNESS(1)=0.18/

&SURF ID='VEI BETONG',
      COLOR='GRAY 40',
      MATL_ID(1,1)='BETONG',
      MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
      THICKNESS(1)=0.18/

&SURF ID='BILBRANN',
      COLOR='RED',
      HRRPUA=265.0,
      RAMP_Q='BILBRANN_RAMP_Q'/

&SURF ID='VIFTE',
      VEL=19.34,
      POROUS=.TRUE.,
      RAMP_V='VIFTE HAST'/

&SURF ID='JETVIFTE',
      FREE_SLIP=.TRUE./

&SURF ID='UTLUFT',
      RGB=204,255,255,
      VEL=4.938,
      RAMP_V='VIFTE HAST'/

```

## Vedlegg 15 – FDS input-fil for simulering #GC06

----- BRANN

```
&OBST XB= 0.0,2.52,12,17,0.0,0.18, COLOR='RED', SURF_IDS='BILBRANN','BETONG','BETONG'/ BILBRANN1
&OBST XB= 3.06,5.58,12,17,0.0,0.18, COLOR='RED', SURF_IDS='BILBRANN','BETONG','BETONG'/ BILBRANN2
&OBST XB= 6.12,8.64,12,17,0.0,0.18, COLOR='RED', SURF_IDS='BILBRANN','BETONG','BETONG'/ BILBRANN3
```

----- GEOMETRI

```
&OBST XB=-45.0,35.0,-17.2,17.2,2.4,2.6, OUTLINE=.TRUE., SURF_ID='BETONG'/ TAK
&OBST XB=-45.0,35.0,-12.0,-5.0,-0.3,0.0, SURF_ID='VEI BETONG'/ VEI1
&OBST XB=-45.0,35.0,5.0,12.0,-0.3,0.0, SURF_ID='VEI BETONG'/ VEI2
&OBST XB=-45.0,35.0,-17.2,-12.0,-0.3,0.0, SURF_ID='BETONG'/ PARKERING1
&OBST XB=-45.0,35.0,12.0,17.2,-0.3,0.0, SURF_ID='BETONG'/ PARKERING3
&OBST XB=-45.0,35.0,-5.0,5.0,-0.3,0.0, SURF_ID='BETONG'/ PARKERING2
&OBST XB=-45.0,35.0,17.0,17.2,0.0,2.4, OUTLINE=.TRUE., SURF_ID='BETONG'/ VEGG1
&OBST XB=-45.0,35.0,-17.2,-17.0,0.0,2.4, OUTLINE=.TRUE., SURF_ID='BETONG'/ VEGG2
&OBST XB=-45.0,-44.8,-17.0,17.0,0.0,2.4, OUTLINE=.TRUE., SURF_ID='BETONG'/ VEGG3
&OBST XB= 34.8, 35.0,-17.0,17.0,0.0,2.4, OUTLINE=.TRUE., SURF_ID='BETONG'/ VEGG4
```

----- JETVIFTER

```
&OBST XB=-28.0,-28.0,13.32,13.68,1.68,2.04, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE'/ VIFTE 1
&OBST XB=-29.0,-27.0,13.32,13.32,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 1
&OBST XB=-29.0,-27.0,13.68,13.68,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 1
&OBST XB=-29.0,-27.0,13.32,13.68,1.68,1.68, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 1
&OBST XB=-29.0,-27.0,13.32,13.68,2.04,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 1
```

```
&OBST XB=-28.0,-28.0,4.32,4.68,1.68,2.04, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE'/ VIFTE 2
&OBST XB=-29.0,-27.0,4.32,4.32,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 2
&OBST XB=-29.0,-27.0,4.68,4.68,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 2
&OBST XB=-29.0,-27.0,4.32,4.68,1.68,1.68, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 2
&OBST XB=-29.0,-27.0,4.32,4.68,2.04,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 2
```

```
&OBST XB=-28.0,-28.0,-4.68,-4.32,1.68,2.04, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE'/ VIFTE 3
&OBST XB=-29.0,-27.0,-4.68,-4.32,2.04,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 3
&OBST XB=-29.0,-27.0,-4.68,-4.68,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 3
&OBST XB=-29.0,-27.0,-4.32,-4.32,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 3
&OBST XB=-29.0,-27.0,-4.68,-4.32,1.68,1.68, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 3
```

```
&OBST XB=-28.0,-28.0,-13.68,-13.32,1.68,2.04, COLOR='RED', SURF_ID='VIFTE'/ VIFTE 4
&OBST XB=-29.0,-27.0,-13.68,-13.32,2.04,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 4
&OBST XB=-29.0,-27.0,-13.68,-13.68,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 4
&OBST XB=-29.0,-27.0,-13.32,-13.32,1.68,2.04, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 4
&OBST XB=-29.0,-27.0,-13.68,-13.32,1.68,1.68, COLOR='BLUE', SURF_ID='JETVIFTE'/ VIFTE 4
```

----- TIL- OG FRALUFT

```
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-45.00,-45.00,-1.5,1.5,1.1,2.1, COLOR='GREEN'/ INNLUFT Midten
&HOLE XB=-44.78,-45.01,-1.5,1.5,1.1,2.1 /
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-45.00,-45.00,-8.0,-5.0,1.1,2.1, COLOR='GREEN'/ INNLUFT V2
&HOLE XB=-44.78,-45.01,-8.0,-5.0,1.1,2.1 /
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-45.00,-45.00,-15.0,-12.0,1.1,2.1, COLOR='GREEN'/ INNLUFT V1
&HOLE XB=-44.78,-45.01,-15.0,-12.0,1.1,2.1 /
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-45.00,-45.00,8.0,5.0,1.1,2.1, COLOR='GREEN'/ INNLUFT H2
&HOLE XB=-44.78,-45.01,8.0,5.0,1.1,2.1 /
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-45.00,-45.00,15.0,12.0,1.1,2.1, COLOR='GREEN'/ INNLUFT H1
&HOLE XB=-44.78,-45.01,15.0,12.0,1.1,2.1 /
```

```
&VENT SURF_ID='UTLUFT', XB=34.79,34.79,-1.5,1.5,1.1,2.1, COLOR='YELLOW'/ UTLUFT Midten
&VENT SURF_ID='UTLUFT', XB=34.79,34.79,-8.0,-5.0,1.1,2.1, COLOR='YELLOW'/ UTLUFT V2
&VENT SURF_ID='UTLUFT', XB=34.79,34.79,-15.0,-12.0,1.1,2.1, COLOR='YELLOW'/ UTLUFT V1
&VENT SURF_ID='UTLUFT', XB=34.79,34.79,8.0,5.0,1.1,2.1, COLOR='YELLOW'/ UTLUFT H2
&VENT SURF_ID='UTLUFT', XB=34.79,34.79,15.0,12.0,1.1,2.1, COLOR='YELLOW'/ UTLUFT H1
```

----- RESULTAT

```
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=8.5/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', PBX=8.5/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=8.5/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=2.0/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBZ=2.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=2.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=-15.0/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=-15.0/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=-10.0/
```

## Vedlegg 15 – FDS input-fil for simulering #GC06

```
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=-5.0/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.0/  
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBZ=1.0/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=1.0/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=2.5/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', PBZ=2.5/  
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBZ=2.5/  
  
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBZ=0/  
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBZ=2.5/  
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBZ=5/  
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBZ=16/  
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBZ=1.5/  
  
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBZ=0.0/  
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBZ=2.5/  
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBZ=1.55/  
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBZ=17/  
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBZ=16.8/  
  
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBZ=1.8/  
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBZ=2.0/  
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBZ=2.2/  
  
&DEVC ID='FLOW_INN', QUANTITY='VOLUME FLOW', XB=-44.8,-44.8,-15,15,1.1,2.1 /  
&DEVC ID='FLOW_UT', QUANTITY='VOLUME FLOW', XB=34.8,34.8,-15,15,1.1,2.1 /  
  
&TAIL /
```