



CFD-baserad dimensionering av brandgasventilation

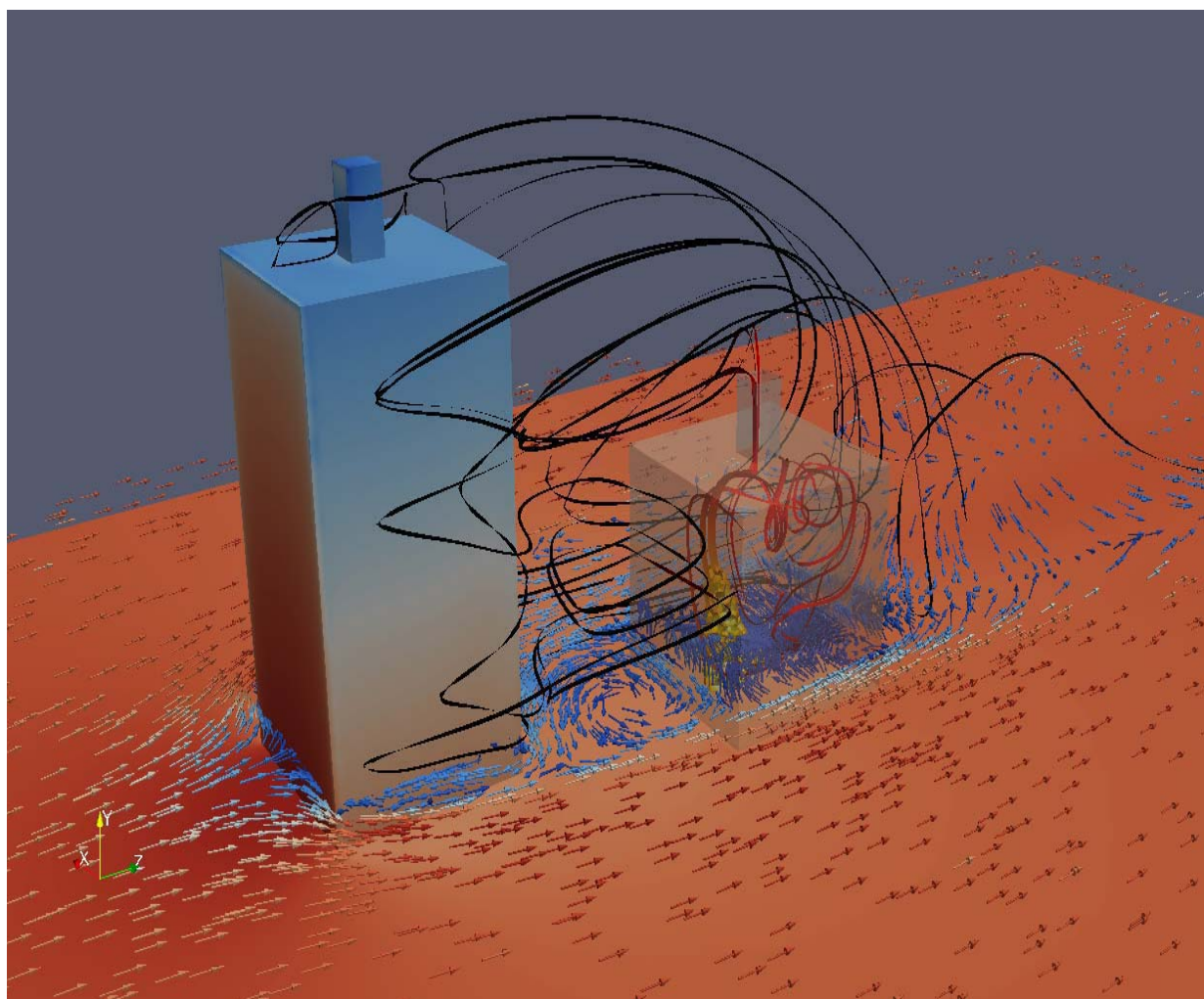
- Simulering av vindtryckets inverkan på termisk brandgasventilation



Brandforsk projekt 100-071



Åforsk projekt 07-231



Stockholm 2010



ÅF-Infrastruktur AB

DOKUMENTINFORMATION

Rapportnamn	CFD baserad dimensionering av brandgasventilation - Simulering av vindtryckets inverkan på termisk brandgasventilation
Antal sidor	49
Finansierad av	BRANDFORSK (Brandforsk projekt 100-071) ÅFORSK (Åforsk projekt 07-231)

FÖRFATTARE	E-post:	
	Jörgen Carlsson	jorgen.carlsson@afconsult.com
	Brandingenjör/Tekn. Lic. Brandteknik	
	Joakim Möller	joakim.moller@afconsult.com
	Civ. Ing./Tekn. Dr. Tillämpad Matematik	

Innehållsförteckning

Förord	4
Sammanfattning.....	5
Summary	7
1 Inledning.....	9
1.1 Bakgrund.....	9
1.2 Syfte	9
2 Metod.....	10
2.1 FDS	10
2.2 OpenFOAM	10
2.3 SOFIE	12
2.4 Experimentserier	12
3 Tidigare forskning på området.....	14
4 Beräkningsresultat.....	18
4.1 Simulering av vindinducerat tryck på byggnad	18
4.1.1 FDS.....	19
4.1.2 SimpleFoam.....	22
4.1.3 Oodles.....	24
4.1.4 SOFIE.....	26
4.2 Brandrum enligt Steckler, Quintiere och Rinkinen	28
4.2.1 FDS.....	28
4.2.2 ReactingFoam.....	30
4.2.3 Xoodles.....	31
4.2.4 BuoyantSimpleSourceRadiantFoam	31
4.2.5 FireFoam	33
4.2.6 SOFIE.....	34
4.3 Medelskalförsök av brandgasventilation med sidvind.....	35
4.3.1 BuoyantSimpleSourceRadiantFoam	36
4.3.2 FDS.....	39
4.3.3 SOFIE.....	40
5 Diskussion.....	42
5.1 Tillämpningsexempel - extern vind runt en storskalig byggnad.....	43
5.2 Tillämpningsexempel - extern vind mot vägghängda ventilatorer	44
5.3 Rekommendationer	46
Referenser.....	48

Förord

Denna rapport redovisar resultatet av projektet ”Optimerad dimensionering av brandgasventilation - Inverkan av extern vindpåverkan och utformning”. Projektet är samfinansierat av Brandforsk och Åforsk.

Till projektet har en referensgrupp varit knuten med följande deltagare:

Anders Klippberg	Brandkonsulten AB
Bengt-Göran Dingfors	Forsmarks Kraftgrupp
Tony Karlsson	D+H Svenska AB

Referensgruppens synpunkter, stöd vid prioriteringar samt rapportgranskning var varit mycket uppskattade.

Projektet hade svårligen kunnat utföras utan de beräkningsresurser som tillhandahållits av Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI, vilket vi är mycket tacksamma för.

Stockholm i Augusti 2010

Sammanfattning

Det blåser nästan alltid. Mer eller mindre. Vinden skapar ett tryck på en byggnads omslutande ytor men kan även, beroende på läckage, störa flödet inom byggnaden. Den här rapporten behandlar vindens effekter på termisk brandgasventilation och vilken roll dagens CFD-program kan spela vid dimensionering.

Intentionen har varit att systematiskt verifiera en rad olika beräkningsapplikationer. Endast fritt tillgängliga program har beaktats då kommersiell programvara generellt är alltför kostsam för att användas vid enklare brandtekniska utredningar. CFD-applikationerna har inledningsvis utvärderats mot experimentell data från väl utredda och beräkningsmässigt isolerade fall inkluderande rumsbrand och fri vindströmning över en byggnad. Därefter har en experimentserie inkluderande ett öppet brandrum med brandgasventilator i taket och ett termiskt flöde från en brand simulerats givet olika vindlaster på brandgasventilatorn.

Samtliga program ger en mycket bra prediktion av vindtrycket på både lovert och läsidan av en vindexponerad byggnad även med relativt grova beräkningsnät. Vindens effekter på tak är svårare att simulera då även ett platt tak ger ett komplicerat flöde med en kraftig separation. Nätet bör i dessa fall alltid göras tillräckligt fint (låga y^+) för att fånga de grundläggande gränsskiktsfenomenen, men när detta är uppfyllt ges en mycket bra överensstämmelse med experimentell data. Vad som menas med ett tillräckligt fint nät beror av scenariot. I flera fall visar det sig att även beräkningar där strömningen är underupplöst ger försvarliga resultat.

De program som utvecklats för brandtekniska tillämpningar har som väntat inga problem att simulera förhållandena i ett enkelt välventilerat brandrum, resultaten överensstämmer mycket bra med tillgänglig testdata. Applikationerna inom OpenFOAM, som ursprungligen inte är avsedda för tyngdkraftsstyrda flöden med icke-förblandad förbränning, har det väsentligt svårare. En helt ny applikation, FireFOAM har provats men denna är i skrivande stund inte färdigutvecklad och bedömningen är att applikationen ännu inte är redo att användas för generella beräkningar.

För friliggande byggnader med någorlunda platta tak ($<20^\circ$ lutning) kan ett externt vindflöde antas resultera i ett undertryck på taket. Praktiskt innebär detta undertryck att massflödet genom en brandgasventilator förstärks. En motverkande effekt är att vinden tenderar att störa luftflödet inne i byggnaden vilket medför att effektiv brandgasventilation motverkas. Om byggnaden inte är friliggande kan vindflöden runt intilliggande bebyggelse motverka brandgasventilationen och rent av skapa ett övertryck i anslutning till brandgasventilatorn. Detta visas i rapporten genom en enkel fiktiv fullskaleberäkning relaterad till småskaleförsök.

En fiktiv beräkning har även genomförts för ett scenario med vindpåverkan vid brandgasventilation via fönsterband. Resultatet visar tydligt att vinden har en påverkan och att

ventilatorn får en relativt låg utströmningskoefficient. På den vindutsatta sidan syns tydligt att vinden blåser in genom fönsterventilatorn i större utsträckning än brandgaser ventileras ut.

Baserat på den genomförda litteraturstudien och den stora mängd simuleringar som utförts kan följande rekommendationer ges för dimensionering av brandgasventilation:

- För dimensionering av takventilatorer på en fristående byggnad med ett relativt platt tak ($<20^\circ$ lutning) behöver knappast vindpåverkan inkluderas som en del av den effektiva utströmningskoefficienten. Eftersom vinden i medeltal kan förväntas skapa ett undertryck på taket, vilket förstärker utflödet, representerar vindstilla förhållanden det "sämsta" fallet avseende utströmningskoefficienten.
- Även om en extern vind medger en förbättrad utströmningskoefficient innebär öppningar i fasadskalet, bland annat för ersättningsluft och andra byggnadsläckage, en intern strömning inom byggnaden som i många fall är tillräcklig för att störa brandgasskiktet och leda till en rökfylld lokal. Om brandgasventilationen syftar till att ge god sikt i lokalen måste detta beaktas och åtgärder vidtas för att begränsa effekterna av vindpåverkan.
- Om byggnaden inte är fristående och framför allt om den är omgiven av högre byggnader eller högre byggnadsdelar kan övertryck uppstå på taket vilket begränsar eller, i extrema fall, helt motverkar utströmning genom ventilatorn. Samtliga CFD applikationer har visat sig kunna prediktera tryckfördelning till följd av vind och kan användas för att utvärdera dess effekter. För att undvika långa exekveringstider utelämnas rimligen förbränningsmodellen i detta skede. Det är även rimligt att utföra den första analysen med en stationär simulering för att undvika tidsstegning. På så sätt kan även en viss optimering av ventilatorernas placering göras innan den brandtekniska beräkningen.
- Vid beräkning är det av stor vikt att beräkningsdomänen är förlängd runt det studerade objektet. Minst 5 gånger objektets höjd (H) uppströms och nedströms och minst $4 \cdot H$ ovanför objektet rekommenderas. Åt sidorna rekommenderas generellt $5 \cdot H$.
- Randvillkoren uppåt och på modellens sidor väljs med fördel som free-slip (symmetri).
- Vid användning av vägghängda ventilatorer, fönsterband och liknande finns en överhängande risk för inflöde genom ventilatorer på lovartsidan vilket kan göra brandventilationen kontraproduktiv. CFD simuleringar är tillämpliga för att utvärdera effekten. Beräkningsnätet har stor betydelse för såväl det kvalitativa som det kvantitativa resultatet. Användning av kubiska nät är, för komplicerade geometrier, tveksam men bör kunna användas för kvalitativa beräkningar.
- LES har fördelen att ge mer realistisk utdata men ger i normalfallet avsevärt längre exekveringstider. Bortsett från FDS som baseras på en mycket effektiv LES-lösare finns inget skäl att använda denna metod för enklare brandtekniska utredningar.
- RANS applikationer har fördelen av att kunna utelämnas tidsstegningen och simulera ett stationärt förhållande vilket sparar mycket tid. Användning av RANS modeller rekommenderas vid förstudie, för studier av genomförbarhet och för rimlighetsanalys.

Summary

Although there are few occasions during a year that the wind is calm, calculations on smoke ventilation rarely, or never, consider its effects. The wind creates a pressure on the surrounding walls of a building and can affect the internal air movements through leakages or openings in the facade. This document reports on the wind effects on thermal smoke ventilation and the possibilities to make predictions using CFD applications of different complexity.

The intention has been a systematic approach in verifying the capabilities of a number of different computational tools. As a rule, only free software has been included since the commercial CFD packages has been judged less used among fire safety engineers and too costly for use in simple fire engineering investigations. The chosen CFD programs has initially been evaluated by comparing computational results with experimental data from a wind exposed cube and a simple well-ventilated, single room, fire scenario. These problems are then combined using an experimental setup with a wind-exposed smoke ventilator mounted on the roof of a structure with a small pool fire below.

Although using fairly rough computational grids, all the programs show good predictions of wind pressure on the sides of a building. The separation effect on the building roof is more complex and therefore more difficult to predict. In order to follow good practice, the mesh should be fine enough to include the boundary layer (small y^+). However, in several calculations good and mesh independent results are obtained using grids that do not resolve the boundary layer.

Clearly, a room with a small fire is easily and very well predicted by programs specialized in fire engineering simulations. Most of the OpenFOAM applications however, are not aimed at the simulation of buoyant turbulent combustion and show considerable difficulties in predicting even a simple fire scenario. A new application called FireFOAM is currently under development. An early version has been evaluated showing some promise. Nevertheless, its use in full scale simulations is yet to be refined.

Considering a building with a flat or a moderately sloped roof ($<20^\circ$), the wind flow is expected to result in an underpressure on the roof. In terms of thermal smoke ventilation this implies an enhanced mass flow through the ventilator. Depending on openings and leakage in the façade, the wind is however, likely to disturb the creation of a stable smoke layer within the building. Furthermore, in the case of neighbouring structures the wind flow can limit and in some cases counteract the ventilation, creating an overpressure in the roof. The effect is shown in the report using a simple fictional calculation.

A fictional calculation of wind effects of wall mounted fire ventilators. The wind results in a low discharge coefficient, on the windward side air flows into the ventilator rather than being ventilated to the outside.

Based on the work done the following conclusions and recommendations are given:

- In case of flat or moderately sloped roofs ($<20^\circ$) on single buildings is not necessary to include the wind effect regarding the evaluation of the effective discharge coefficient. The wind is likely to result in a lifting force on the roof, enhancing the smoke discharge.
- Inflow through leakage or openings in the façade may destroy the smoke layer and cause the building to be completely smoke-filled. This problem need to be addressed if the purpose of the smoke ventilation is to improve the visibility in case of fire.
- If the building is surrounded by other structures, primarily structures higher than the building itself, the external wind can in some cases limit or counteract the smoke ventilation. The effect can be shown using a simple CFD flow analysis.
- When calculating flow around structures it is essential that the computational domain is stretched beyond the structure being evaluated. It is recommended to extend the domain 5 times the height of the structure upstream and downstream and at least 4 times its height above it. It is also recommended to extend the model 5 times the height to the sides.
- The boundary conditions to the sides and above the model should be chosen as free-slip or symmetry.
- Using wall mounted smoke ventilation can result in an inflow of air on the windward side thus counteracting the purpose.
- Large Eddy Simulation tools generally provide more realistic predictions but to the cost of long simulation time. Except from FDS which is based on a very efficient LES-solver, there is currently no clear benefit in using this method. To date FDS is by far the most suitable model in most fire simulations, including the ones where external wind is present.
- Programs based on RANS can be used without the time-stepping terms. These steady-state simulations need less execution times and therefore the RANS-method is recommended for screening and feasibility studies.

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Brandgasventilation av ett brandrum fyller ett flertal olika syften. För det första förväntas utventilering av varma gaser ge lägre temperatur i brandrummet vilket ger mindre risk för snabb antändning och brandspridning. För det andra ska räddningstjänstens insats underlättas genom att brandgaserna inte tillåts fylla hela volymen vid aktivering av brandgasventilationen eller åtminstone att viss siktbarhet kan erhållas för invändig insats. I publika lokaler dimensioneras brandgasventilation ofta för att förbättra förhållandena under utrymning vid en brand.

Vid dimensionering av termisk brandgasventilation finns ett antal alternativa metoder för att bestämma erforderlig storlek på ventilatorer, inkluderande den totala öppningsarean av frånluftsluckor i taknivå och av tilluftsöppningar i marknivå. Ett normalt förfarande vid beräkning är att simulera ett antal brandförlopp i lokalen, ibland med enkla ekvationssystem som kan lösas med handberäkning men oftast med någon datorbaserad modell. Endast ett fåtal "dimensionerande" fall brukar därvid beaktas och inverkan av extern vind eller hur ventilatorerna är utformade och placerade tas i normalfallet inte hänsyn till alls. Det kan därmed uppfattas som att dimensionering i många fall utförs med en onödigt kraftig förenkling av ett, komplext men till synes lösbart, problem.

Luftflöden inne i en byggnad är beroende av flera olika parametrer men i händelse av brand utgörs de största faktorerna av brandinducerade temperaturskillnader och yttre vind. Om dessa kan beräknas kan ingenjören få en bättre förståelse för termisk brandgasventilation och dess funktion. Detta är grunden till en mer korrekt dimensionering.

1.2 Syfte

Projektet har haft som syfte att systematiskt utvärdera olika beräkningsprogram och deras förmåga att prediktera brand, vindinducerat tryck och effekten av vind på termisk brandgasventilation. Detta leder fram till programmens förmåga att visa på nyttan med brandskyddsåtgärder i form av brandgasventilatorer. En sådan systematisk genomgång kan även förväntas leda till rekommendationer för dimensionering av termisk brandgasventilation vid vindpåverkan.

För att beräkningsmässigt lösa upp alla längdskalor i brandtekniska problem av industriell storlek krävs mycket stora beräkningsnät. En del av syftet här har därför varit att analysera beräkningsresultatets noggrannhet, jämfört med experimentell data, som erhålls då strömningen är underupplöst.

2 Metod

Olika CFD modeller utvärderas med avseende på deras förmåga att prediktera kombinationen av turbulent förbränning, tyngdkraftsstyrt flöde och interaktionen med extern vind.

Utvärderingen sker genom att beräkningsresultatet jämförs med data från försök som presenterats i den öppna litteraturen.

De program och bakomliggande modeller som används vid simulering beskrivs översiktligt nedan. Här anges också den experimentella data som använts inom ramen för projektet.

2.1 FDS

FDS (Fire Dynamics Simulator), McGrattan m.fl. (2009) är en CFD-lösare baserad på finita volymmetoden och anpassad för inkompressibel, icke isotherm, strömning och speciellt utvecklat för simulering av brandinducerade flöden. Källkoden är öppen, skriven i Fortran. Konserveringsekvationerna diskretiseras på ett rektangulärt nät och löses numeriskt med andra ordningens noggrannhet för både tid och rum. Det rektangulära nätet är en begränsning när det kommer till icke-ortogonala och krökta ytor. Den huvudsakliga turbulensmodellen baseras på LES där de oupplösta längdskalorna inkluderas via Smagorinskys modell. Förbränning inkluderas genom att lösa en transportekvation för skalären "mixture fraction" från vilken huvudsakliga förbränningsprodukter och -reaktanter kan härledas utifrån reaktionsekvationen. Källtermen för strålning erhålls från en finita volymsformulering av strålningsekvationen för en grå gas. Även en wide-band modell finns.

FDS karakteriseras av sin enkelhet, stabilitet och robusthet. Det finns ett flertal parametrar som kan justeras baserat på det aktuella scenariet men som normalt inte behöver beaktas och därmed är mer eller mindre dolda. En indatafil för strömning över en enkel geometri färdigställs på omkring en timma oaktat tid för nätoptimering.

Simuleringarna har inom ramen för projektet gjorts med 64 bit FDS 5 subversion 2383 kompilerad och exekverad på ett HP-kluster under Red Hat Enterprise Linux 3.0.

2.2 OpenFOAM

Koden är en generell open-source CFD lösare skriven i C++, OpenFOAM (2009). Koden baseras på finita volym metoden och kan hantera godtyckliga nät. För icke-stationära beräkningar används en semi-implicit tidstegare, PISO, medan stationära problem löses med hjälp av SIMPLE. Koden innehåller en stor mängd olika turbulensmodeller, både RANS- och LES- modeller. Källkoden är som påpekats öppen och det är relativt enkelt att inkludera egna applikationer i en modell. I detta projekt har flera färdiga applikationer använts dock har en ny applikation, som kallas "BuoyantSimpleSourceRadiantFoam" implementerats inom ramen för projektet.

- *ReactingFoam*. En icke-stationär modul som används för att simulera turbulent förbränning. Turbulensen modelleras med RANS modeller. Reaktioner specificeras i indatafiler på chemkin-format.
Förutom ekvationer för turbulens och bevarandet av massa, rörelsemängd och energi, tillkommer här transportekvationerna för de ingående ämnena. För N ämnen resulterar detta i N-1 extra ekvationer. Då antalet ämnen och antalet reaktioner ofta är många resulterar detta i stora system av ekvationer. Ekvationernas styvhet gör också att tidstegen måste väljas mycket små. Sammantaget gör detta modellen mycket beräkningsintensiv för storskaliga förbränningssimuleringar. Modellen saknar en strålningsmodell, vilket kan anses begränsa dess praktiska användning i brandtekniska tillämpningar.
- *Xoodles*. En icke-stationär applikation som används för att simulera turbulent förbränning. Turbulensen modelleras med LES. Förbränningsmodellen är flameletbaserad. Istället för att simulera de enskilda ämnena simuleras istället fraktionerna av olika gasblandningar; bränsle, oxidant samt produkten av förbränningen. Detta gör applikationen mer intressant för ingenjörsmässig tillämpning.
Modellen saknar en strålningsmodell, vilket begränsar dess praktiska användning.
- *SimpleFoam*. Stationär applikation för inkompressibel turbulent strömning. Turbulensen simuleras med RANS.
SimpleFoam är en isoterm modell.
- *TurbFoam*. Icke-stationär applikation för inkompressibel turbulent strömning. Turbulensen simuleras med RANS.
TurbFoam är en isoterm modell.
- *Oodles*. Icke-stationär applikation för inkompressibel turbulent strömning. Turbulensen simuleras med LES.
Oodles är en isoterm modell.
- *BuoyantSimpleSourceRadiantFoam*. Koden är utvecklad på ÅF. Den är baserad på applikationen BuoyantSimpleRadiantFoam som är en stationär RANS kod. Koden löser ekvationerna för kompressibel strömning och inkluderar en strålningsmodell, P1.
Till programmet har möjligheten att addera mass- och energikällor implementerats vilket gör det möjligt att använda modellen för förbränningssimuleringar.

En ny version - 1.6 - av OpenFOAM finns numera som officiell version. I denna har en omorganisering gjorts som har inneburit en ökad användarvänlighet. Flera olika applikationer har slagits samman till en och samma. Till exempel ingår nu Oodles i SimpleFoam. Flera nya förbränningsmodeller har också tillkommit där den mest intressanta är FireFoam:

- *FireFoam*. Icke-stationär applikation för kompressibel turbulent strömning. Koden är utformad för flöden vid låga machtal. Förbränningen antas vara icke-förblandad och modelleras en mixture-fraktion modell där de kemiska reaktionerna antas ske oändligt snabbt.

Turbulensen simuleras primärt via LES-modeller. Koden innehåller även modeller för strålning och värmeförluster till omgivande ytor genom värmeledning.

Till de generella fördelarna med OpenFOAM hör användningen av ostrukturerade nät och valfriheten som ges i och med den stora verktygslåda av modeller som kontinuerligt utvecklas och uppdateras. För tillfället är dock koden relativt svåränvänd med hänsyn till att dokumentationen är begränsad, att grafiskt gränssnitt saknas och att flera av de, för brandtekniska tillämpningar, intressanta modellerna inte är intuitiva i sin användning. Uppställningen av ett relativt enkelt problem kräver flera timmar. Oftast används en extern pre-processor för att bygga geometri och nät.

2.3 SOFIE

SOFIE, Simulation OF Fires In Enclosures, Rubini (2009) är en CFD lösare för inkompressibel, icke-isoterm strömning som utvecklats för att kunna användas särskilt för brandtekniska tillämpningar. SOFIE är en RANS-modell baserad på finita volymmetoden. Transportekvationerna diskretiseras normalt på ett rektangulärt nät, även om programmet är skrivet för ett generellt kurvlinjärt koordinatsystem.

Flera olika turbulensmodeller finns implementerade men inom ramen för det här projektet används den vanligaste tvåekvationsmodellen, $k-\epsilon$, modifierad för tyngdkraftsstyrt flöde. Förbränning kan simuleras med Eddy-Breakup modell eller med flameletbaserad modell, den förstnämnda har använts.

Strålningstermen erhålls genom att lösa strålningsekvationen via DTRM och primärt med antagandet att brandgasernas optiska egenskaper kan beskrivas enligt ett grågasmedia.

SOFIE kräver vissa bakgrundskunskaper i CFD och fysikaliska modeller. En indatafil av ett enkelt strömningsfall över en singular geometri kräver i storleksordningen en timma oaktat tid för nätoptimering.

Simuleringarna har i projektet utförts på en vanlig arbetsstation under Windows XP och med 32 bit SOFIE2009. I denna version har en del begränsningar i minnesallokeringen lösts för att tillåta mer storskaliga simuleringar än tidigare versioner samtidigt som ett flertal funktioner tillkommit såsom transienta randvillkor. Då SOFIE inte är parallelliserad innebär kompilering i 32 bitar att storleken på ett beräkningsfall begränsas till 2 GB.

2.4 Experimentserier

För att systematiskt utvärdera CFD applikationerna används ett antal testfall där olika aspekter på brand, brandgasventilation och vindlaster utvärderas. Först simuleras ett fall med vindinducerat tryck därefter brand i byggnad och sist kombinationen.

- Simulering av vindinducerat tryck på byggnad – Richards, Hoxey och Short (2001). Externströmning runt en kub i fullskala. Experimentell data i form av tryckkoefficient på kuben finns tillgängliga.

- Simulering av brand – Steckler, Quintiere och Rinkinen (1982).
Simulering av en metanflamma i ett rum med en dörröppning. Fallet är väl dokumenterat med data över temperatur- och hastighetsprofiler i rummet och i dörröppningen.
- Simulering av brandgasventilation med och utan vindlast, medelskala – Ghosh (1993).
En studie över hur termisk brandgasventilation påverkas av extern vind och effekten av en sarg runt ventilatorn. Röskiktstjocklek och utströmningskoefficienten är dokumenterade.

Ovanstående utgör grunden för denna utvärdering. Utöver detta har även en experimentell uppställning av Morgan och Marchant (1975) använts, dock endast kvalitativt då flera indataparametrar är okända.

3 Tidigare forskning på området

Det finns ett relativt stort antal artiklar och rapporter om vindens inverkan på och inom byggnader. Det finns också en riklig tillgång på numeriska och experimentella presentationer av brandgasventilation i olika skala, dock utan inverkan av vind.

Brandgasventilationens beroende och känslighet avseende tilluft finns dokumenterat, bland annat av Hägglund, Nireus och Werling (1996) som ger tydliga visuella och kvantitativa beskrivningar av den praktiska effekten av olika utföranden såsom varierande antal tilluftsöppningar och placering av tillufts- och frånluftsöppningar. I rapporten ges även en vägledning om effekten av extern vind på termisk brandgasventilation. Försöken visade att även en svag vind leder till ett instabilt brandgasskikt, omblandning och total rökfylld av brandrummet.

Ingasson och Persson (1995) presenterar en översikt av kunskapsläget kring vindpåverkan på termisk brandgasventilation som fortfarande är aktuell. I några CFD baserade simuleringar, dock utförda i 2D, visas vindens inverkan på temperaturen i brandgaserna och massflödet genom en brandventilator. Brandgasventilationen modelleras här som hål i taket, utan omgivande sarg, och vinden ger en tydlig negativ inverkan på ventilatorns effektivitet.

Spehl (1993) sammanfattar tillgänglig, kvalitativ, kunskap om vindens påverkan på byggnader och var zoner med övertryck och undertryck kan förväntas. Sadeltak med en vinkel om mindre än 25° mot markplanet kommer alltid, i medeltal, att uppvisa undertryck över hela taket medan tak med en lutning understigande 40° (men mer än 25°) uppvisar omväxlande över- och undertryck som ett resultat av den turbulenta luftströmmen över taket. Variationer i tryckbilden över en byggnad varierar med byggnadens geometri, hörn och interaktion mellan olika höga byggnadsdelar.

Kandola (1990) diskuterar vindens påverkan på byggnader i allmänhet men även dess effekt på flödet genom takventilatorer. Artikeln leder fram mot en enkel analys av brandventilatorns effektivitet. En ventilators förutsättningar att vädra ut gaser sammanfattas genom olikheten för den effektiva strömningskoefficienten:

$$C_{piT} + C_{piw} - C_{por} > 0$$

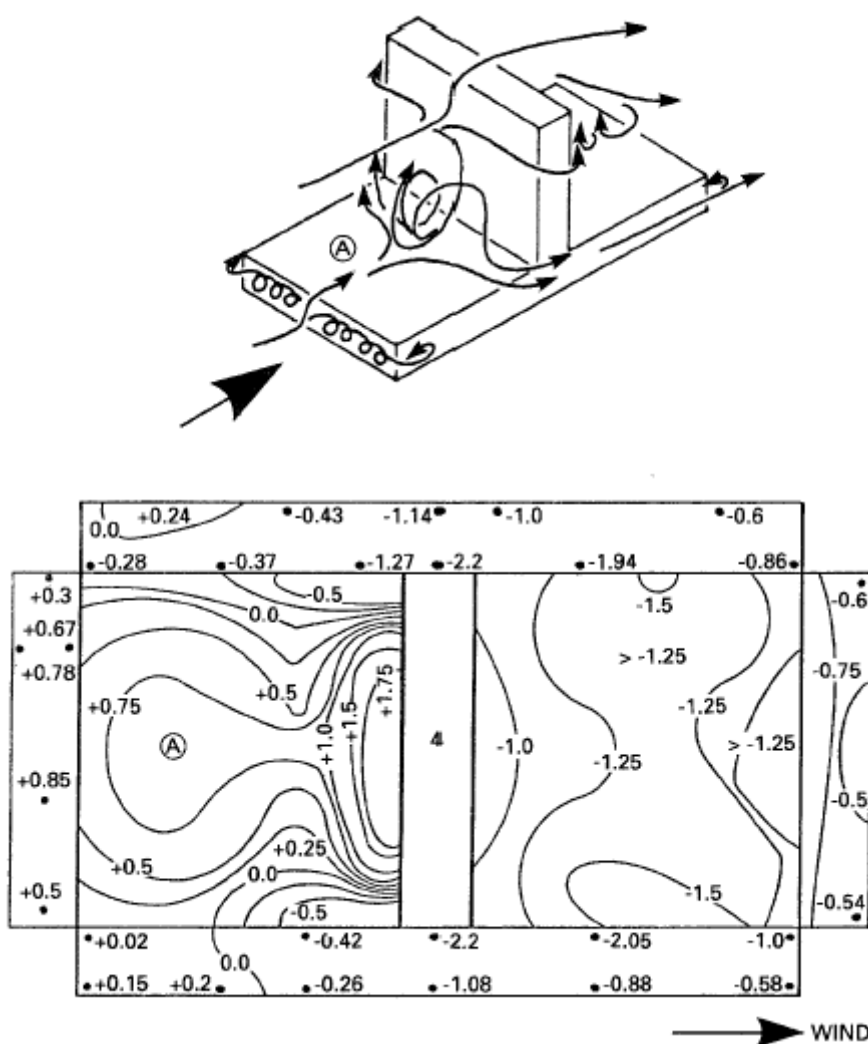
C_{piT} = intern tryckkoefficient genererad av branden vilken, för ett homogent brandgasskikt ges av: $gd_p(\rho_a - \rho_g)/0.5\rho_a U_{ref}^2$, d.v.s. termisk stigningskraft / dynamiska trycket vid referenshöjden.

C_{por} = extern, vindgenererad, tryckkoefficient där ventilatorn är placerad, hämtas från diagram, t.ex. Figur 1.

C_{piw} = intern tryckkoefficient genererad av extern vind och läckage, hämtas från diagram, se Figur 2.

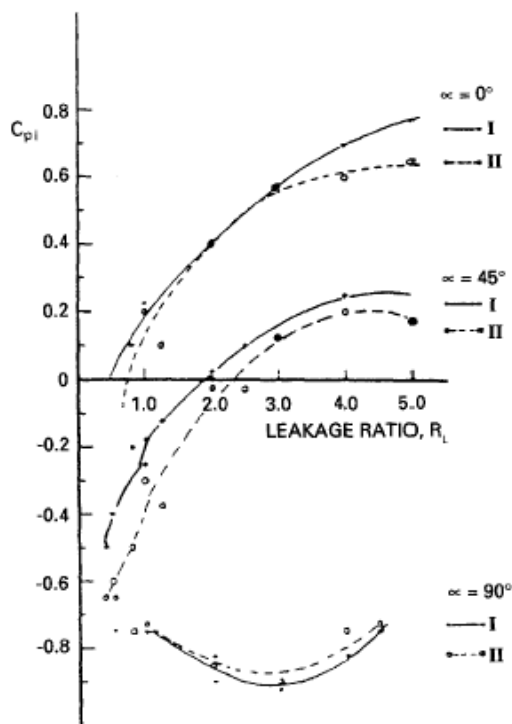
Detta samband figurerar även i CENs rapport CR12101-5 (2000) som en förutsättning för ventilatorns funktion. Ett värde under 0 anses innebära ett luftflöde in genom ventilatorn.

Det noteras att medan Kandola själv använder sig av tabellerade data så kan dessa tre parametrar även förväntas simuleras med CFD.



Figur 1. Tryckkoefficientens fördelning vid strömning över hinder. Från Kandola (1990).

Det interna tryck som induceras av vinden är kraftigt beroende av vindriktning och hur läckytorna är fördelade på byggnadens olika väggar. Figur 2 visar den interna tryckkoefficienten som funktion av R_L = läckarea på lovartsidan/läckarea på läsidan.



Figur 2. Intern tryckkoefficient för olika vindriktningar mot rektangulär/kubisk byggnad. I och II visar uppmätt data från olika delar av samma försökskub. Från Kandola (1990).

Ett flertal resultat från standardiserade test finns tillgängliga och resultaten presenteras i tillverkarens datablad. Vid standardprovning av brandgasventilatorer används isoterma förhållanden och flöden genereras mekaniskt istället för termiskt. Mätningar kan utföras med eller utan extern sidvind. Den så framtagna flödeskoefficienten varierar kraftigt beroende på brandgasventilationens utförande och på yttre förhållanden, värden mellan 0.3-0.9 är förhärskande vilket ska jämföras med de rekommendationer som ofta ges i handböcker: konstant värde på 0.7. Den standardiserade provningsmetoden diskuteras av Sanquer (2002). Numeriska simuleringar med RANS, $k-\epsilon$ turbulensmodell visar sig ge mycket bra överensstämmelse med experimentell data för flödeskoefficienten.

Den vindinducerade tryckkoefficientens fördelning över byggnader finns uppmätta och beskrivna för flera olika konfigurationer. Natalini m.fl. (2002) redovisar data för tryckkoefficienten över ett skärmtak i olika försöksskala och visar att allt för små skalor, preliminärt skalor under 1:100, ger resultat som avviker även kvalitativt från fullskaliga försök. Castro och Robins (1976) experimentserie utgör alltså referensförsök, bland annat vid validering av olika beräkningsprogram. Mätningar gjordes för såväl tryckkoefficienten som för hur långt från objektet som flödesstörningar kunde upptäckas. Hastighetsstörningen på avståndet 4,5H i vaken nedströms var endast några få procent och på 8H var skillnaden inte mätbar. Detta kan jämföras med experimentell data från fullskaleförsök utförda av Richards och Hoxey (1993) där mätning av byggnadens påverkan på det statiska trycket runt omkring

den visade 5% inverkan på mellan 3H-5H. H representerar karakteristisk längdskala, i dessa fall objektets höjd.

Ruck (1993) presenterar mätningar med laser Doppler anemometer (LDA) och visar effekten av termisk stigitkraft från en uppvärmd byggnad i förhållande till pålagd vind. Återanläggning av flödet bakom en struktur redovisas med beroende av värmeavgivningen från byggnaden och Reynolds tal, variationer mellan 4H och 5.5H anges. Längden av flödets återanläggning som funktion av hindrets geometri diskuteras vidare av Kramer och Gebhardt (1990) med fokus på hur sådan kunskap används för att positionera brandgasventilation över ett tak. En återanläggningslängd på knappt 2H anges för en kubisk bluff body baserat på försök av Gowda, Kramer och Gebhardt (1983). Strömningshastigheten i dessa vindtunnelförsök var hög, 18 m/s över en bluff body med dimensionen 30 mm.

Ett flertal aspekter på numerisk simulering av strömningskoefficienten på en byggnad inklusive inverkan av nätets design, beräkningsdomänens storlek och val av turbulensmodell beskrivs av Oliveira och Younis (2000). Genom jämförande beräkningar visas att 2D beräkningar är mycket känsliga avseende domänstorleken och att dessa kan förväntas ge kvantitativt felaktiga resultat även om trender kan härledas. Beräkningsdomänen för 3D beräkningar bör utifrån författarnas beräkningar utföras så att randvillkoren flyttas ut på ett avstånd av minst 5H från sidorna och 4H ovanför en byggnad med höjden H. Det noteras att detta sammanfaller med ovan refererade experimentella resultat.

Flera studier, bland annat de av Lakehal och Rodi (1997) samt Oliviera och Younis (2000), antyder att enkla RANS baserade beräkningsmodeller generellt har svårt att prediktera de relativt komplexa flödessepareringar som följer vid strömning, även över enkla rektangulära strukturer. Samtliga varianter av turbulensmodellen k- ϵ visar avvikelser för såväl recirkulationszonen på läsidan som separeringen på taket.

Den enda systematiska experimentella studien av brandventilatorers funktion vid brand, inkluderat termisk stigitkraft och extern vindlast, som påträffats i den öppna litteraturen är den av Ghosh (1993). Några uppföljande studier har inte hittats. Ghosh provar ett flertal scenarier där ventilatorns placering i luftströmen, brandgastemperatur och vindhastighet varieras. Även utformningen på ventilatorn studeras genom att variera höjden på sargen runt ventilatorn.

4 Beräkningsresultat

4.1 Simulering av vindinducerat tryck på byggnad

I den här sektionen undersöks hur väl respektive CFD-applikation predikterar strömning och vindinducerad tryckfördelning över en friliggande kubiskt konstruktion, 6m×6m×6m, Richards, Hoxey och Short (2001).

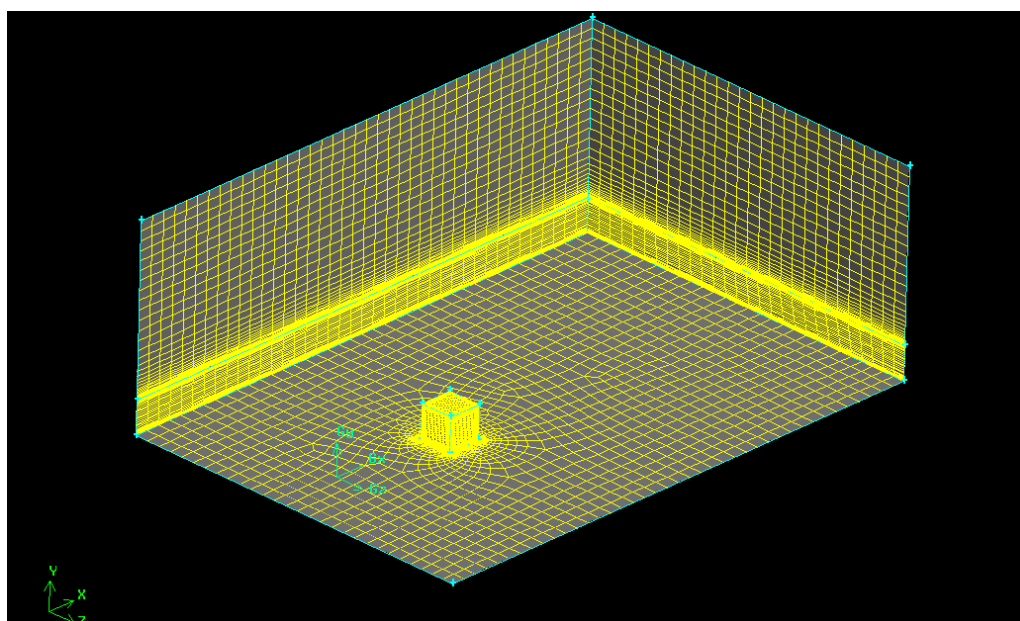
Figur 3 och Figur 4 visar grundscenariet i form av meshningen använd för beräkning med OpenFOAM. I det senare fallet är kuben vriden 45 grader mot friströmsriktningen. Detta fall är enkelt att simulera i OpenFOAM eftersom nätet är ostrukturerat. Det är möjligt men praktiskt ointressant att simulera detta scenario med FDS eller SOFIE vilka båda normalt använder strukturerade cartesiska nät.

I scenariot kommer en storskalig separation att uppträda. För en fullgod noggrannhet med RANS-modeller skall det finnas en tydlig skelseparation mellan längdskalorna för medelströmning och turbulens. En farhåga är att så inte är fallet här och noggrannheten därför kan förväntas vara begränsad.

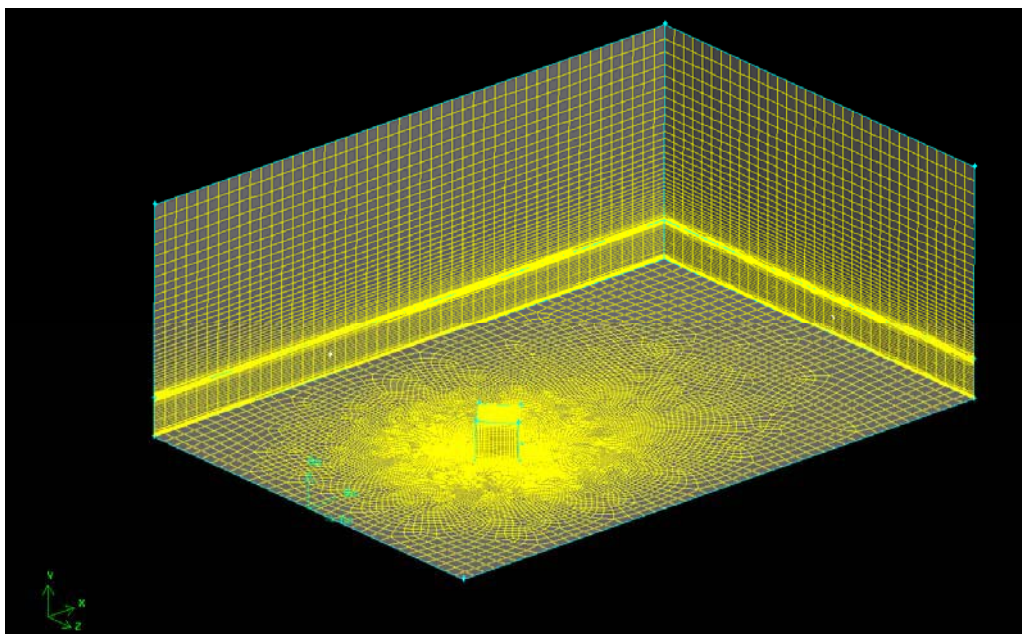
Fördelningar för hastigheten, turbulenta längdskalorna och intensiteten finns angivna och från dessa kan profiler för friströmshastigheten, turbulent kinetiska energi och turbulent dissipation skapas genom:

$$k = \frac{3}{2}(UI)^2$$

$$\varepsilon = 0.1643 \frac{k^{3/2}}{l}$$



Figur 3. Grovt beräkningsnät för första kubfallet, strömningen träffar kuben plant framifrån.



Figur 4. Ett andra testfall med kuben vriden 45 grader mot friströmmen. Exempel på finare nät.

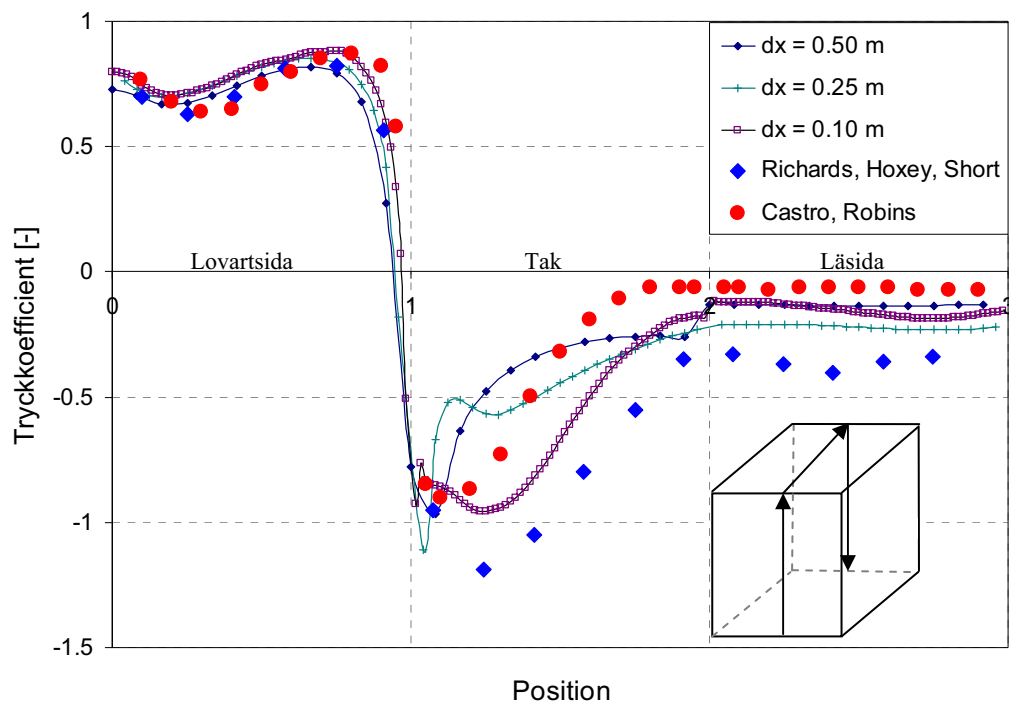
4.1.1 FDS

FDS används som regel med, i termer av LES, väldigt grova nät. Programmet inkluderar inte användning av väggfunktion utan sätter per default ett randvärde baserat på hastigheten i första kontrollvolymen. Detta innebär att det inte finns något enkelt sätt att veta om nätet är tillfredsställande upplöst.

Ett flertal screeningsimuleringar har genomförts. Det är tydligt att, medan domänens rand uppströms och nedströms kubens definieras som inflöde respektive som tryckvillkor och marken är solid (no-slip), så bör övriga randvillkor väljas med noll-gradient och noll-flux alltså motsvarande ett symmetrivillkor (eller free-slip). Effekten av att använda tryckvillkor även på övriga sidor är en generell underskattning av trycket på lovartsidan.

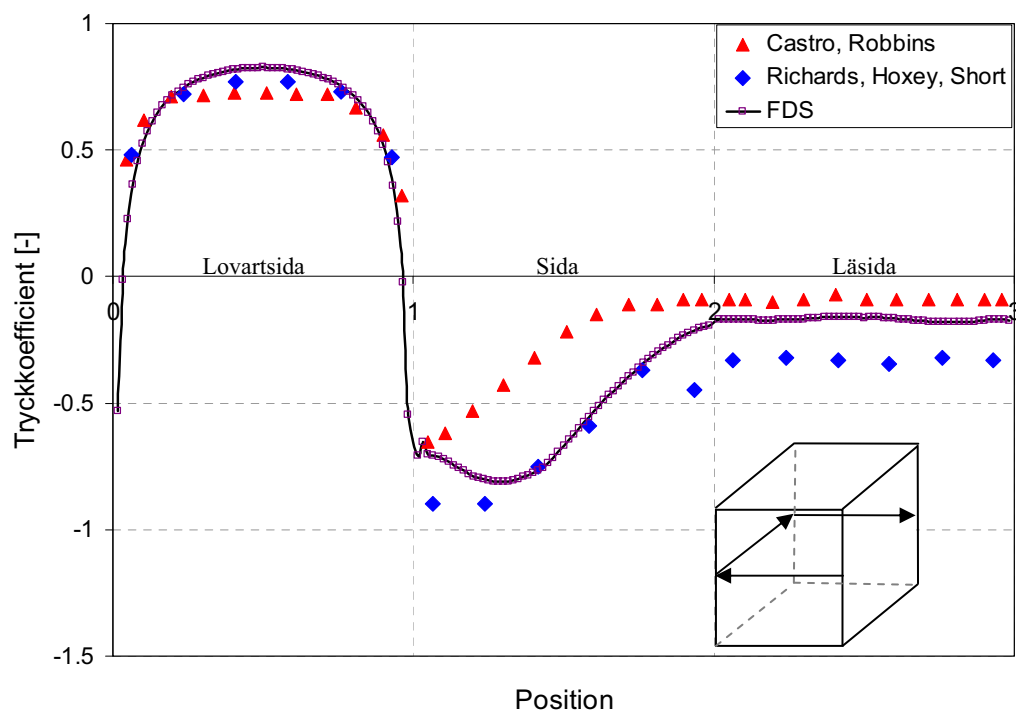
Att utöka domänen utöver vad som tidigare rekommenderats av exempelvis Oliveira och Younis (2000), d.v.s. 5H åt sidorna och 4H uppåt, ger för beräkning med FDS en mycket marginell inverkan på slutresultatet.

Figur 5 redovisar beräknade resultat av tryckkoefficienten i kubens symmetriplan längs vindriktningen. Beräkningarna som är utförda med olika nätstorlek jämförs med data från fullskaleförsöken av Richards, Hoxey och Short (2001) men även Castro och Robins (1976) försök med en skalmodell tas med som referens då dessa varit vanliga referensdata vid validering av olika CFD applikationer.

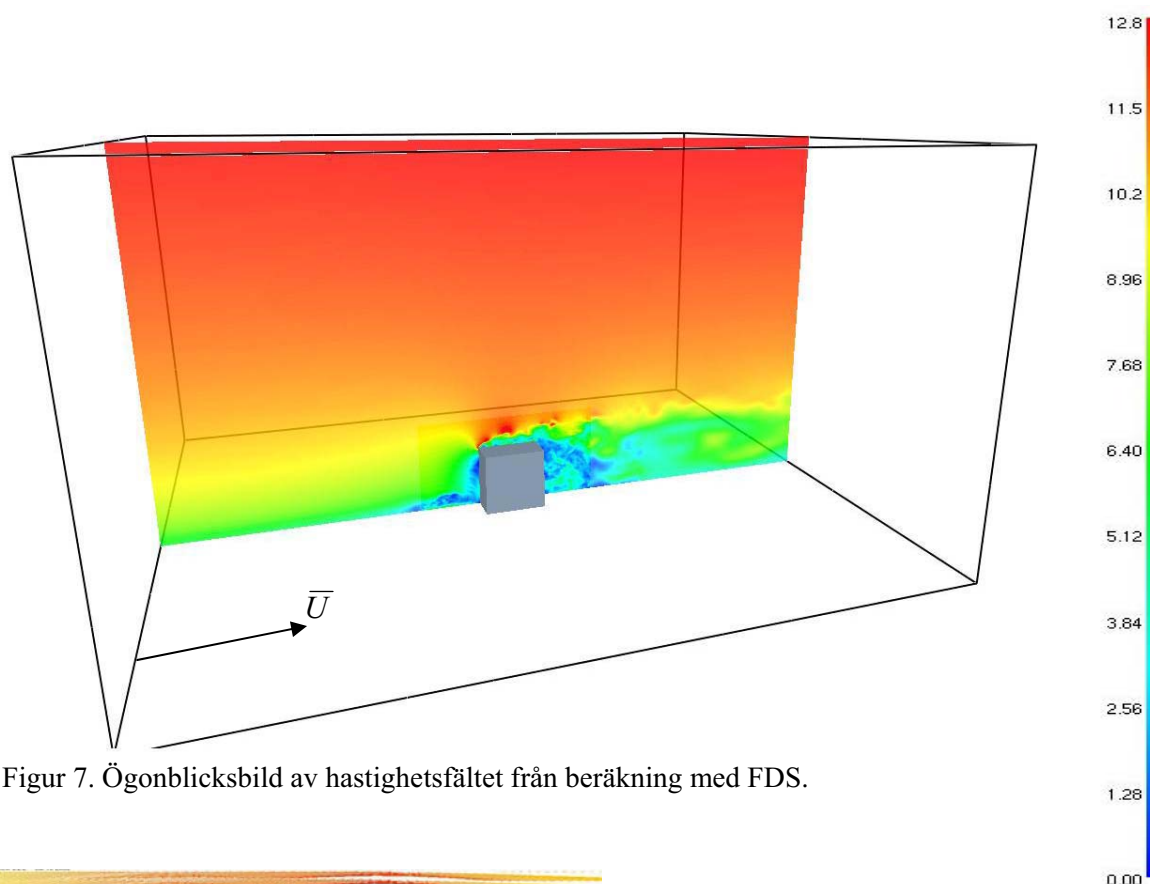


Figur 5. FDS beräkningar med olika nät. Plotten redovisar tryckkoefficienten i kubens symmetriplan parallellt vindriktningen.

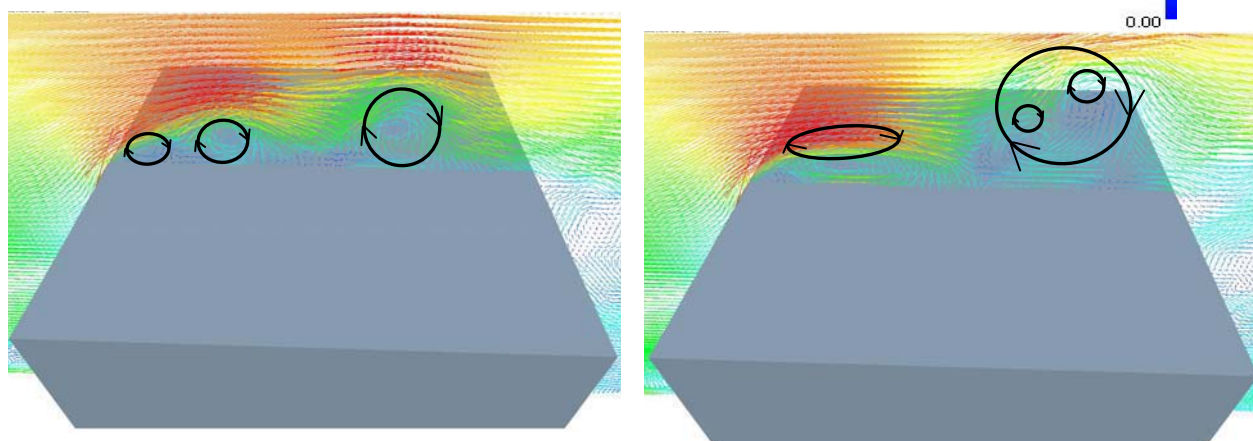
Samtliga beräkningsfall ger likvärdiga resultat på lovart och läsidan. Effekten av ett förfinat nät syns istället på kubens tak, alltså där man kan förvänta sig brandgasventilatorer.



Figur 6. FDS beräkning dx = 0.10 meter. Plotten redovisar tryckkoefficienten i kubens vertikala symmetriplan.



Figur 7. Ögonblicksbild av hastighetsfältet från beräkning med FDS.



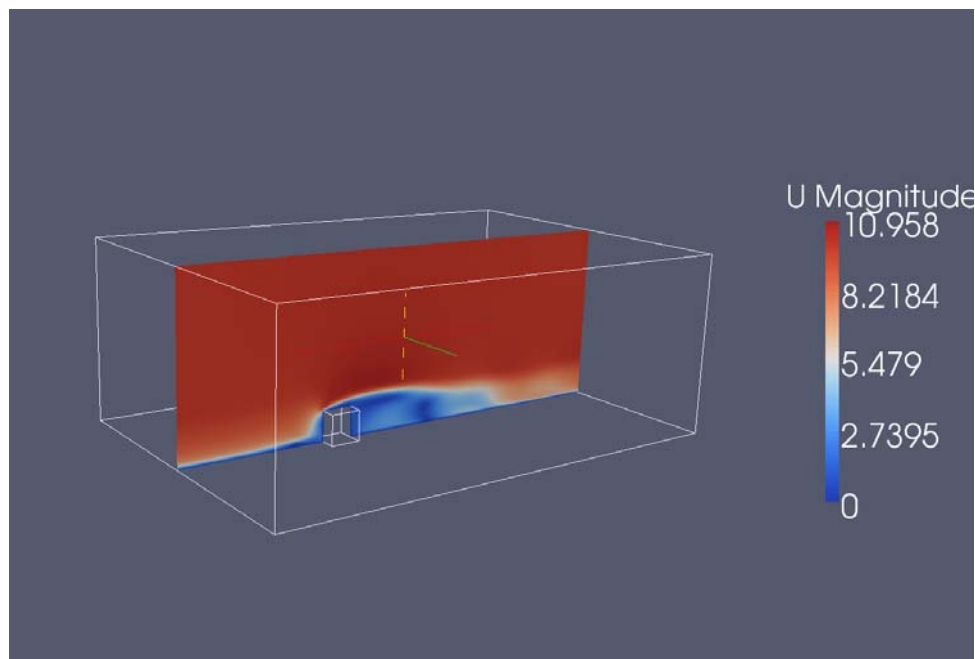
Figur 8. Illustration av flödesvariationen över kubens tak, två ögonblicksbilder av flödet.

LES ger väsentligt mycket mer information än beräkningar med medelvärdesbildade flödesekvationer, se Figur 8. På så sätt kan lokalt förekommande trycktoppar identifieras. För den ingenjörsmässiga bedömningen är dock ögonblicksvariationerna normalt av begränsat intresse i förhållande till resultatet över tid och resultatet medelvärdesbildas därför vid plottning.

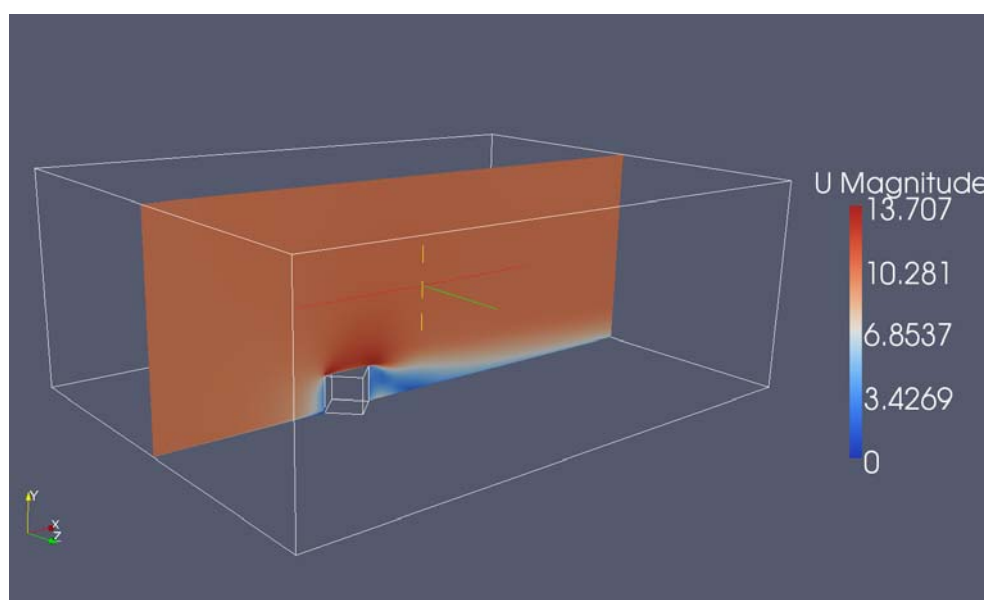
Även ett antal simuleringar i 2D har genomförts. Dessa ger ett betydligt sämre resultat och visar på en väsentligt större känslighet avseende de flesta vanliga parametrar, såsom nätets och domänens storlek. Medan 2D LES kan ge fina färgbilder bör denna metod inte användas för dimensionering.

4.1.2 SimpleFoam

I figurerna nedan redovisas hastighetsfältet visuellt för de beräknade testfallen med SimpleFoam. Trots den massiva separationen predikterar RANS-modellen tryckkoefficienten relativt väl.

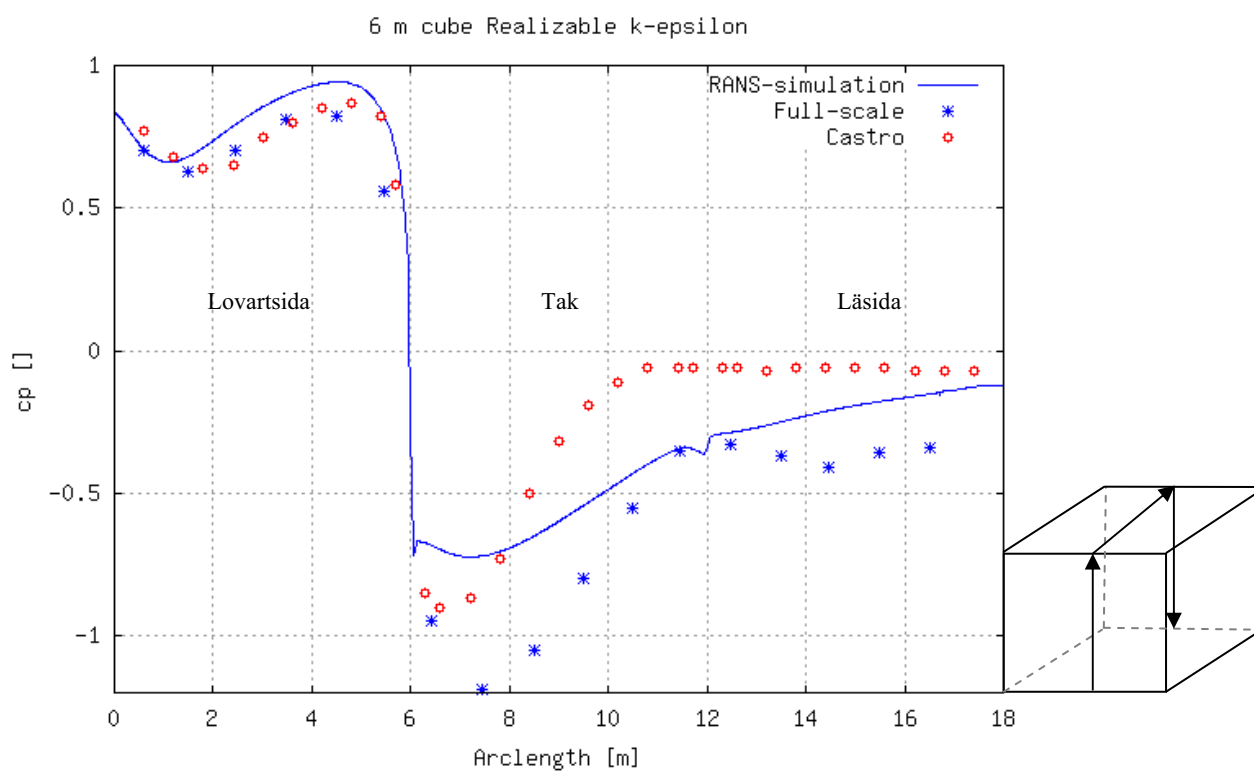


Figur 9. Hastighetsfältet över kuben, RANS simulering med SimpleFoam.

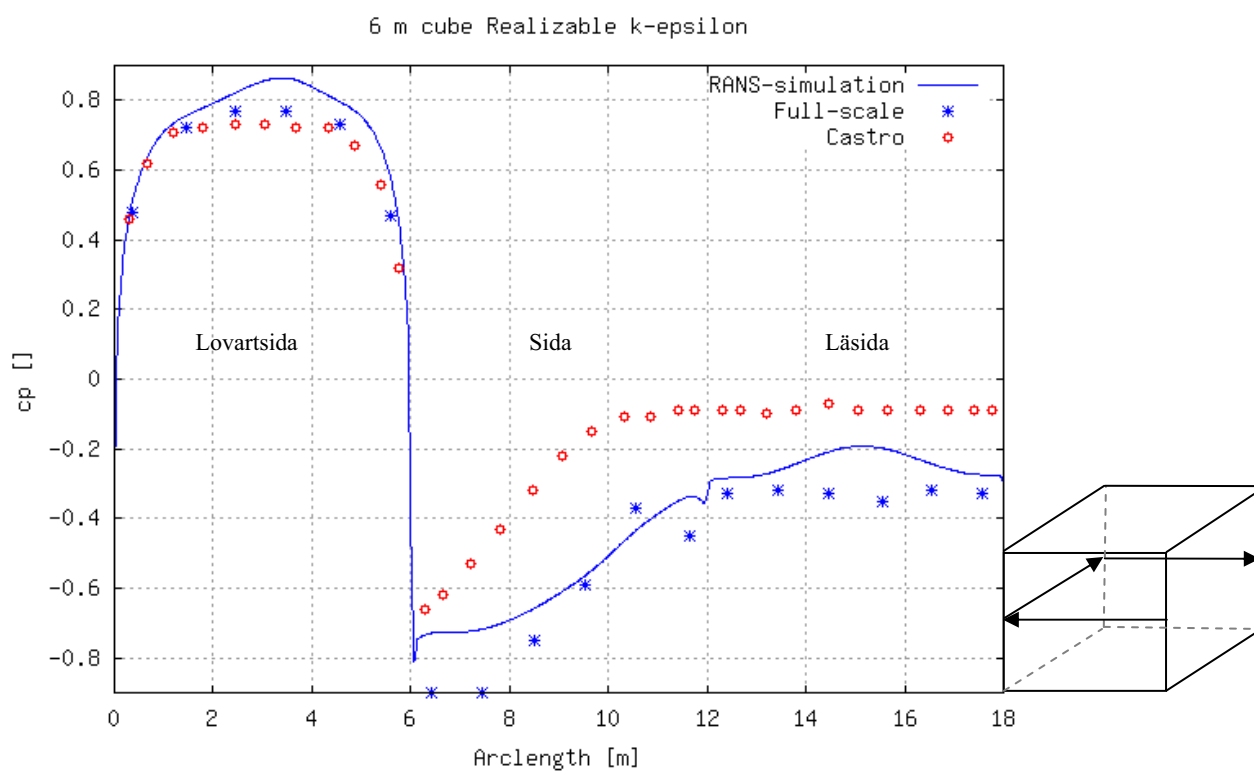


Figur 10. Hastighetsfältet över kuben då denna vridits 45 grader RANS simulering med SimpleFoam.

En numerisk jämförelse mellan beräknade och uppmätta tryckkoefficienter i kubens symmetriplan, x-y planet respektive x-z planet ges i Figur 11 och i Figur 12. Vinden träffar här kuben rakt framifrån.



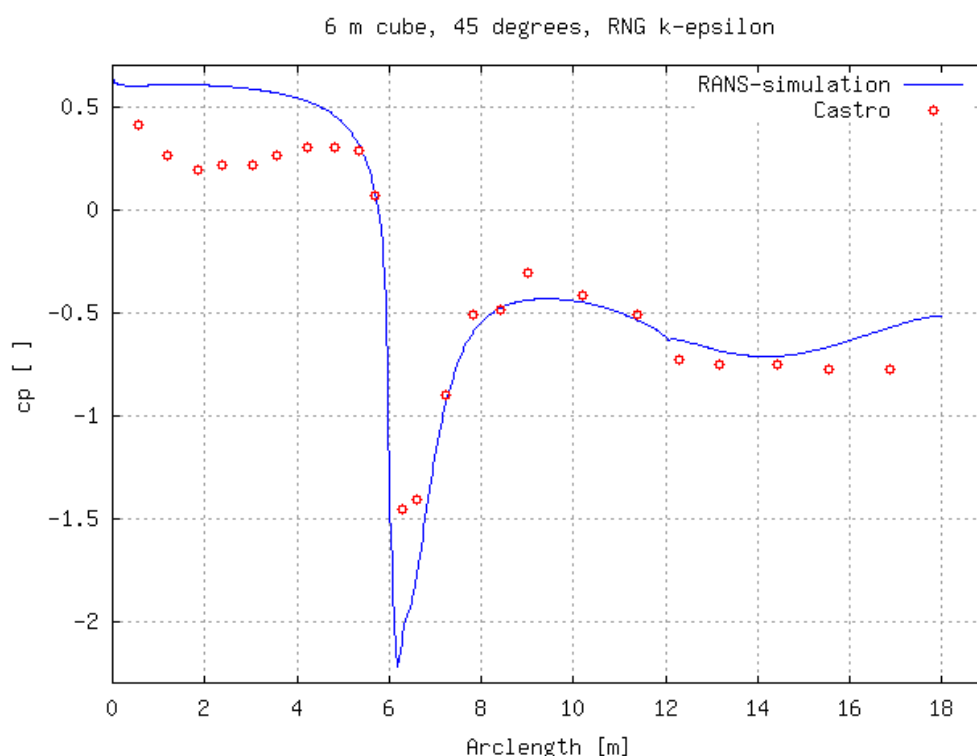
Figur 11. Tryckkurvan på skärningen mellan kuben och symmetriplanet i x-y, RANS-simulering.



Figur 12. Tryckkurvan på skärningen mellan kuben och symmetriplanet i x-z, RANS-simulering

Uppströms kuben matchas det experimentella resultat mycket bra, nedströms är skillnaderna mellan turbulenta längdskalor och medelströmmen mindre distinkta men resultaten är ändå relativt bra.

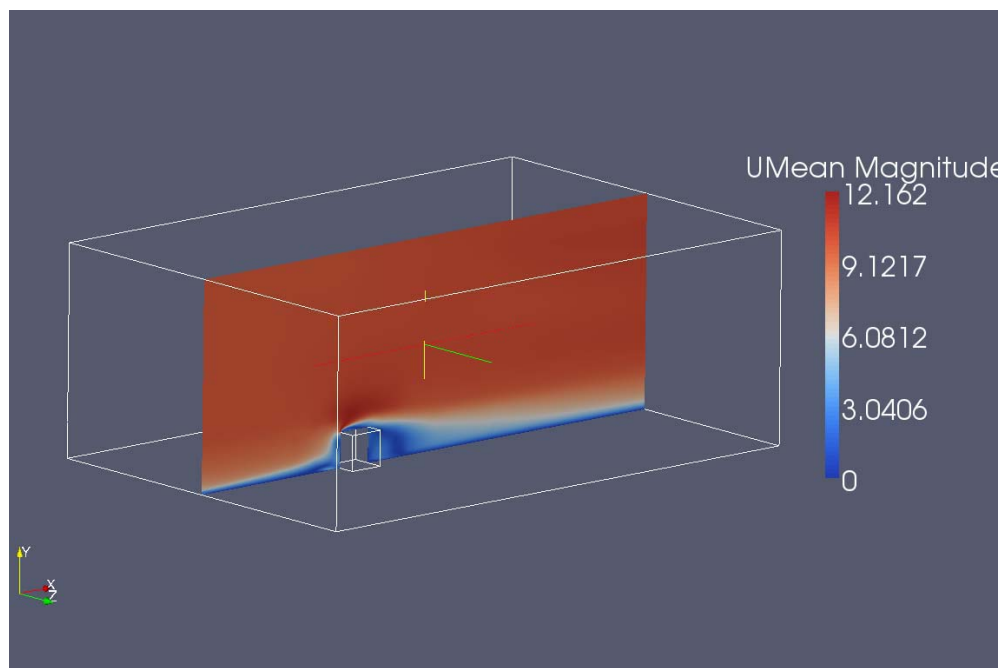
I fallet där kuben har vridits 45 grader konstateras att vaken blivit mindre bakom kuben, se Figur 10. Detta skulle kunna indikera att turbulensen är svagare här. Mindre turbulent energi implicerar mindre turbulenta strukturer och en större skalseparation och därmed bör RANS modellen prestera bättre här. Som Figur 13 visar följer tryckkurvan predikerad av RANS simuleringen den experimentella datan väl. Nätet är här uppbyggt av 295000 celler, kraftigt sträckt med y^+ runt kuben generellt <100 .



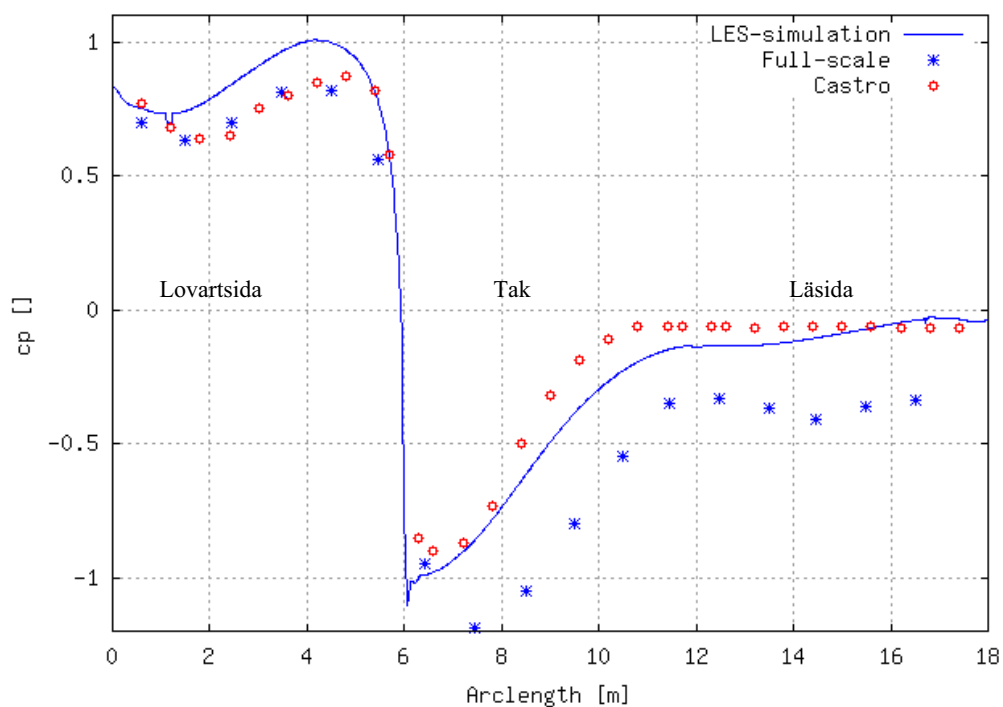
Figur 13. Tryckkurvan på skärningen mellan kuben och symmetriplanet i x-y, RANS-simulering

4.1.3 Oodles

Som en jämförelse har även en LES simulering gjorts på fallet med vindpåverkan i kubväggens normalriktning. För en korrekt LES simulering skall nätet vara utformat så att strömningen är ordentligt upplöst men eftersom metoden i projektet är mer på det ingenjörsmässiga planet användes samma nät som i RANS simuleringen. Detta förväntas begränsa noggrannheten i resultatet men kraftigt att hålla nere lösningstiderna. Simuleringen kördes för 600s, resultaten nedan är baserade på medelhastighet och tryck.

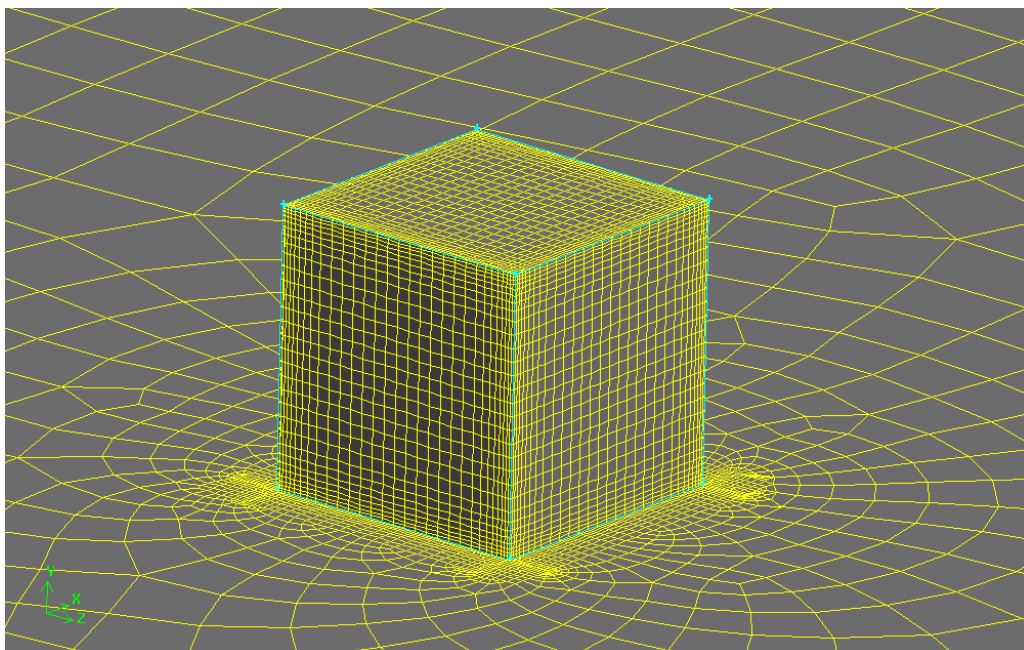


Figur 14. Medelhastighetsfältet över kuben, LES simulering.



Figur 15. Tryckkurvan på skärningen mellan kuben och symmetriplanet i x-y, LES-simulering med OpenFOAM applikationen Oodles.

LES simuleringarna visar en klar förbättring i prediktionen av tryckförändringarna på taket och i vaken efter kuben.

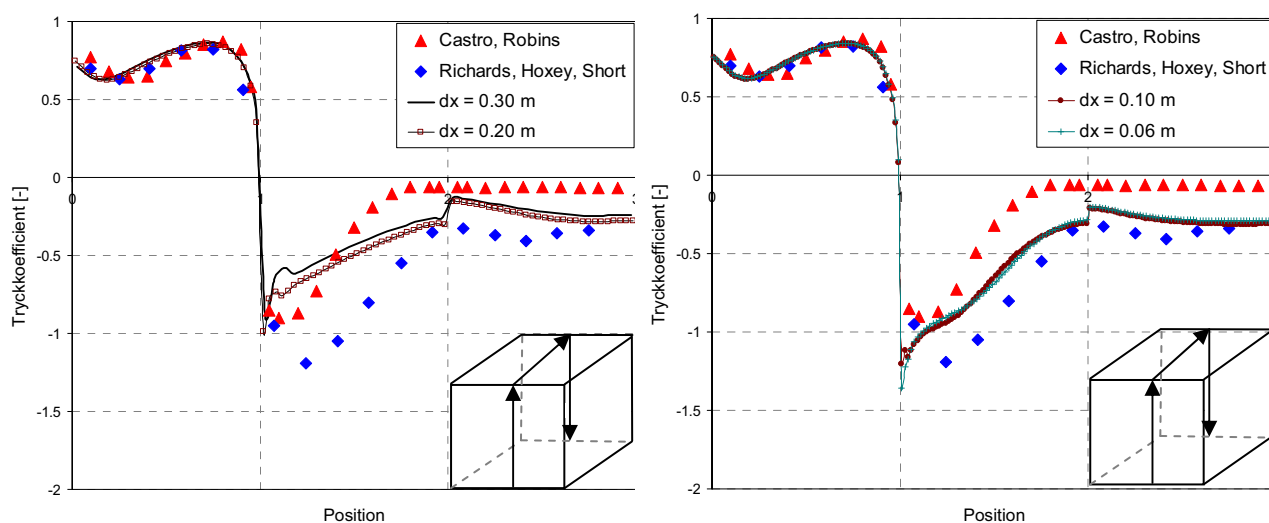


Figur 16. Inzoomning på ytnätet på kuben och bottenplanet.

4.1.4 SOFIE

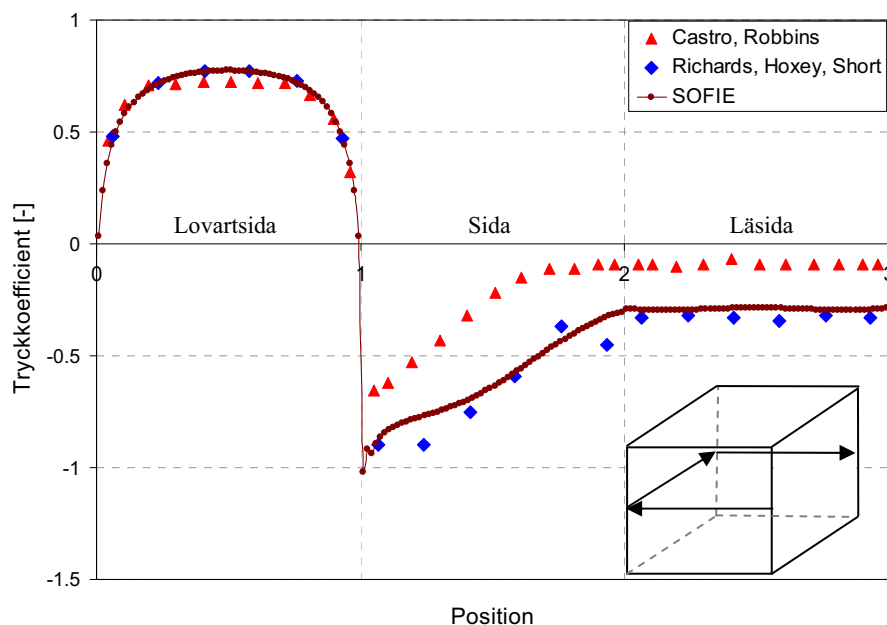
Det finns ett stort antal alternativa lösningsmodeller att välja mellan vid användning av SOFIE, olika turbulensmodeller, olika väggfunktioner och så vidare. I de genomförda beräkningarna har dock robusta och ingenjörsmässiga modeller och lösare använts.

Gränsskiktets hela utsträckning behöver inte lösas upp då turbulensmodellen kompletteras med en väggfunktion, ”law of the wall”. För denna modell är det som regel inte rimligt att förvänta sig goda resultat för gränsskiktet vid användning av nät som resulterar i y^+ överstigande 500, en tillfredsställande upplösning ges av $50 < y^+ < 500$. Detta innebär dock ett avsevärt finare nät än vad som brukar hanteras i storskaliga brandtekniska beräkningar. Figur 17 visar en jämförelse med angivna faktiska dimensioner på nätet.

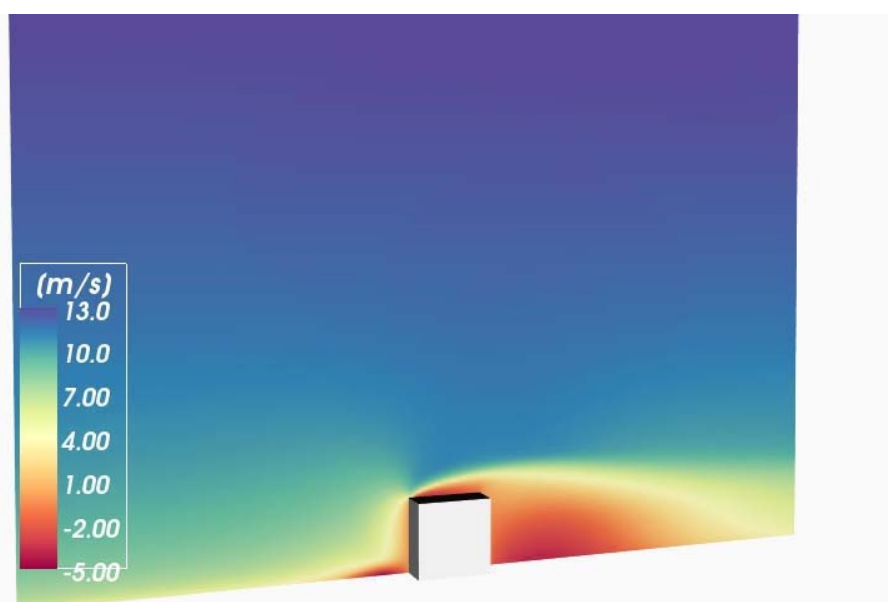


Figur 17. Beräkningsresultat med olika upplösning, dx är nätets storlek i meter.

På kubens sidor, såväl lovart som läsida, spelar nätets finhet nästan ingen roll alls. På taket, där flödet är mer komplicerat kan ett gridoberoende skönjas redan vid y^+ värden mellan 1000-2000 att döma av de jämförande simuleringarna.



Figur 18. Beräkningsresultat på kubens centrumlinje med beräkningsnät 0.1 m över kubens.



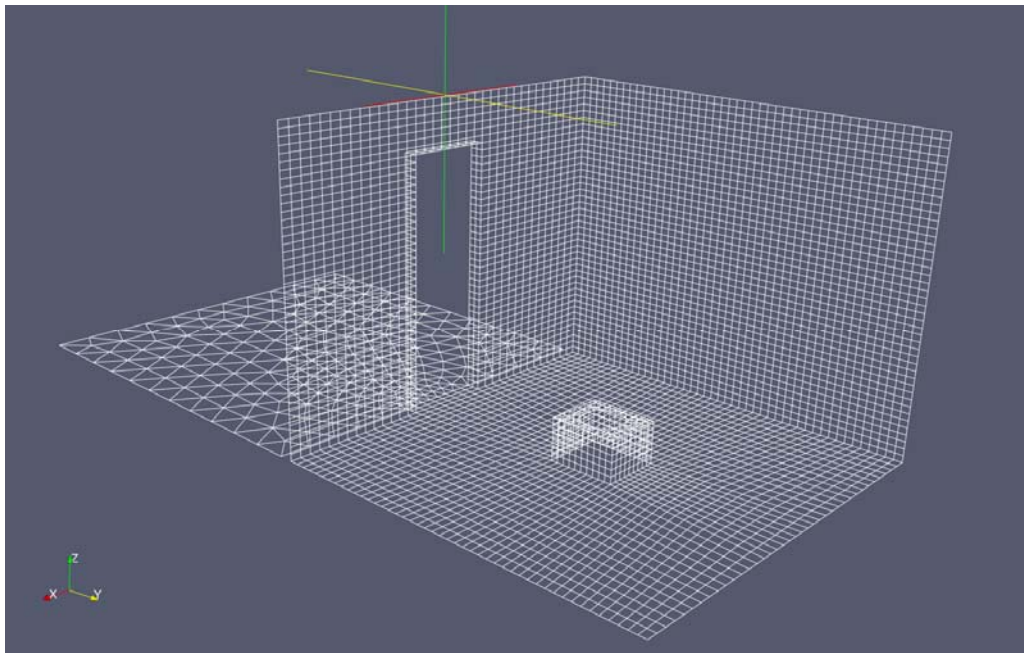
Figur 19. Visualisering av vindhastigheten utförd med ParaView. På bilden syns tydligt var återanslutning av flödet bakom kubens sker.

Liksom för övriga CFD applikationer ger SOFIE kvalitativt korrekta resultat även för väldigt lågupplösta beräkningar. För nät som utformats för att uppfylla kriterierna för den använda väggfunktionen ges även mycket bra numeriska resultat. Även separation och återanslutning predikteras mycket tillfredsställande.

4.2 Brandrum enligt Steckler, Quintiere och Rinkinen

Denna simulering visar hur respektive CFD-applikation fungerar vid beräkning av turbulent förbränning och turbulent, tyngdkraftsstyrd strömning vid innesluten men välventilerad brand. Såväl FDS som SOFIE kan redan på förhand förväntas prediktera detta fall utan problem. Av större intresse är hur modulerna från OpenFoam presterar.

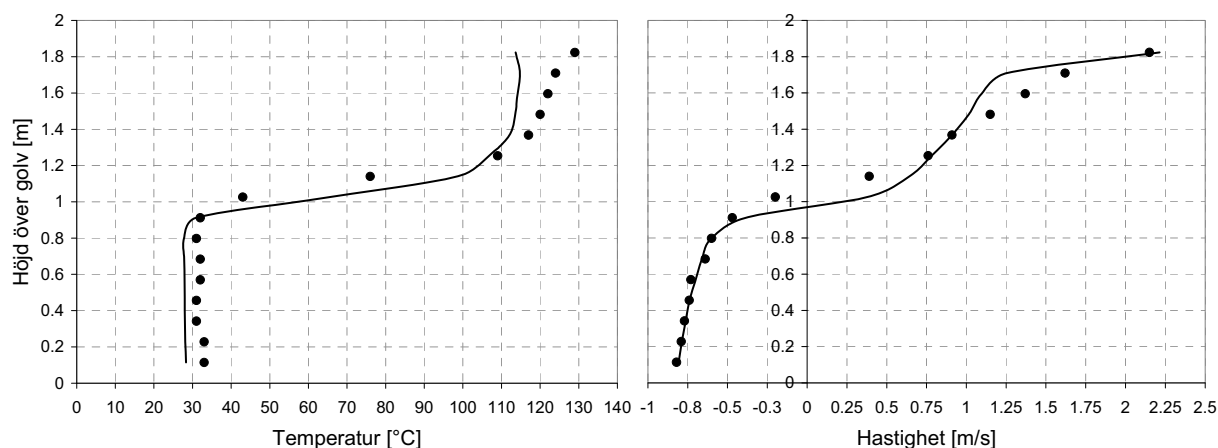
Rummet har dimensionerna $2.8 \text{ m} \times 2.8 \text{ m} \times 2.18 \text{ m}$, med en dörr, 1.83 m hög, som leder in till rummet. I rummet finns en cirkulär brännare för insläpp av metan, 0.3 m i diameter. Brännarens effekt är 62.9 kW.



Figur 20. En illustration av brandrummet i form av ett typexempel av nätets utformning som använt i simuleringarna med OpenFoam.

4.2.1 FDS

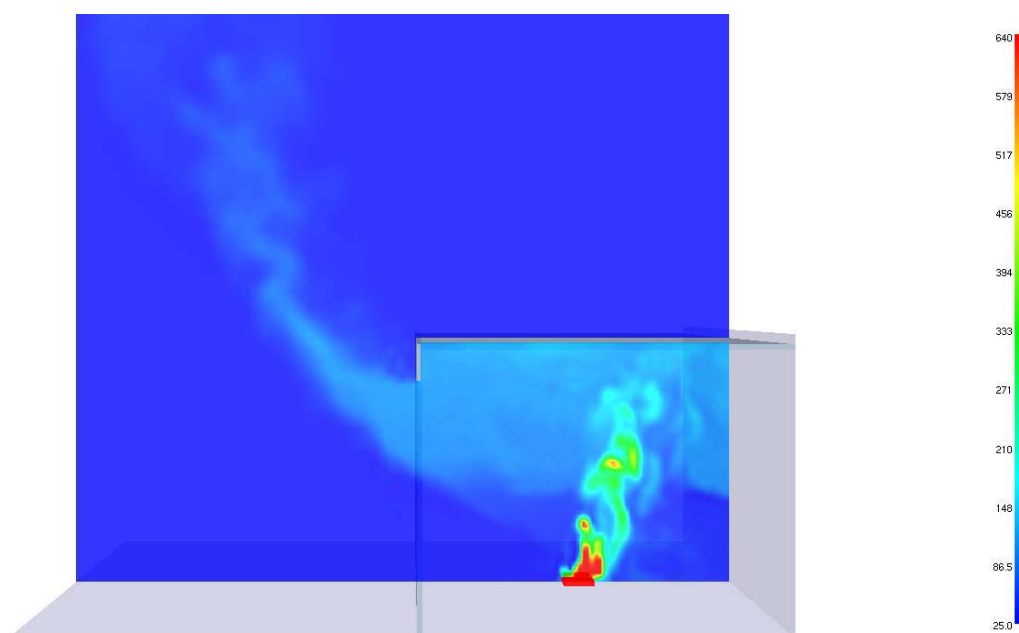
FDS kan prediktera utfallet av detta scenario med stor noggrannhet. Såväl temperatur- som hastighetsprofil från öppningens centrumlinje stämmer mycket bra överens med uppmätta data. Det finns få fallgropar då indatafilen skrivs, strålningsfraktionen kan behöva justeras beroende på valet av strålningsmodell.



Figur 21. Testdata och FDS-resultat av hastighets- och temperaturprofil i dörröppningens centrum.

Strömningen inom domänen framgår tydligt då scenariot färgplottas, se Figur 22.

Temperaturen är plottad enligt en färgskala från omgivningstemperatur till max $> 640^{\circ}\text{C}$ vilket kan antas vara lägsta temperatur för synlig flamma.



Figur 22. Visualisering av ett enkelt brandrum med Smokeview.

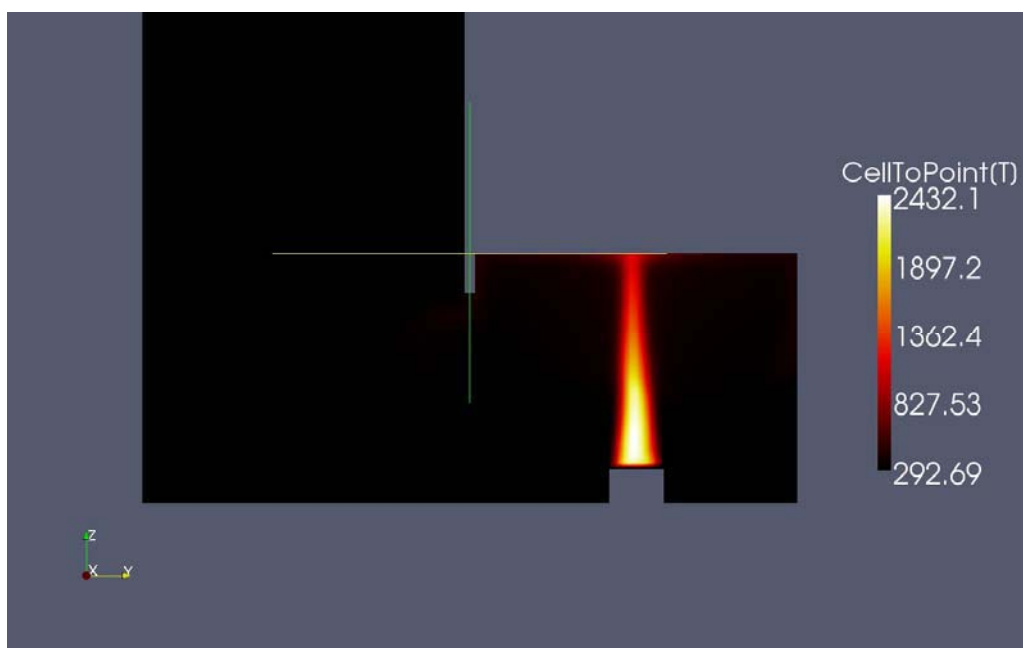
4.2.2 ReactingFoam

Inom ramen för OpenFOAM finns flera förbränningsmodeller. Här undersöks ReactingFoam, en generell kod för modellering av kemiska reaktioner. För att få en uppfattning av randvillkor och nödvändig täthet på beräkningsnätet sattes scenariot först upp en model i 2D. Resultaten användes sen för att konstruera en 3D model.

Förbränningsmodellen förenklas genom att reducera reaktionsmekanismen och ansätta en enstegsreaktion för metan, $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \Rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

Simuleringarna visade generellt på dålig överensstämmelse med de experimentella resultaten. En temperaturplott ges i Figur 23 nedan. Temperaturen i flamman och i plymen blir alldeles för hög och förefaller alldeles för laminär. Påverkan från inströmmande luft genom öppningen syns inte.

De dåliga resultaten antas delvis bero på avsaknaden av strålning gör temperaturen i flamman alltför hög.



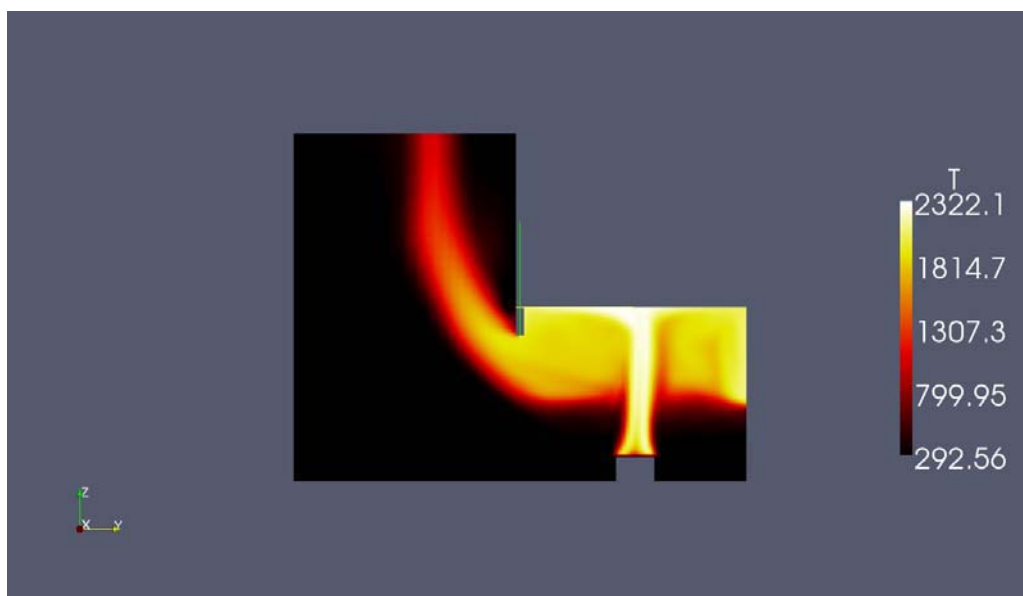
Figur 23. Visualisering av temperaturfältet, enligt ReactingFoam, 1 min efter antändning. Energibalansen är inte uppfylld.

På grund av styvheten hos ekvationerna, begränsningarna hos turbulensmodellen och avsaknaden av strålning kan denna modul, för närvarande, inte kan rekommenderas för brandsimuleringar.

4.2.3 Xoodles

Den LES-baserade koden, Xoodles, ger ett flödes- och temperaturfält som ser rimligare ut än de som kom ifrån ReactingFoam men då även denna applikation saknar strålningsmodell, värmetransport genom omgivande väggar, mm blir temperaturerna alltför höga. Det stora felet från denna applikation är att reaktionerna skenar omotiverat och ger en alldeles för stor brand.

Det ska tilläggas att flameletmodellerna styrs av en rad parametrar som inte är tydligt dokumenterade. Detta gör applikationen svåränvänd även för vana användare. LES kräver i regel ett finare nät och väsentligt mindre tidssteg än RANS. Slutresultatet kan förväntas ha en högre noggrannhet men samtidigt är detta en noggrannhet som ligger över vad som är nödvändigt för den ingenjörsmässiga beräkningen. Dessa faktorer gör att det i nuläget inte går att rekommendera Xoodles för brandsimuleringar.

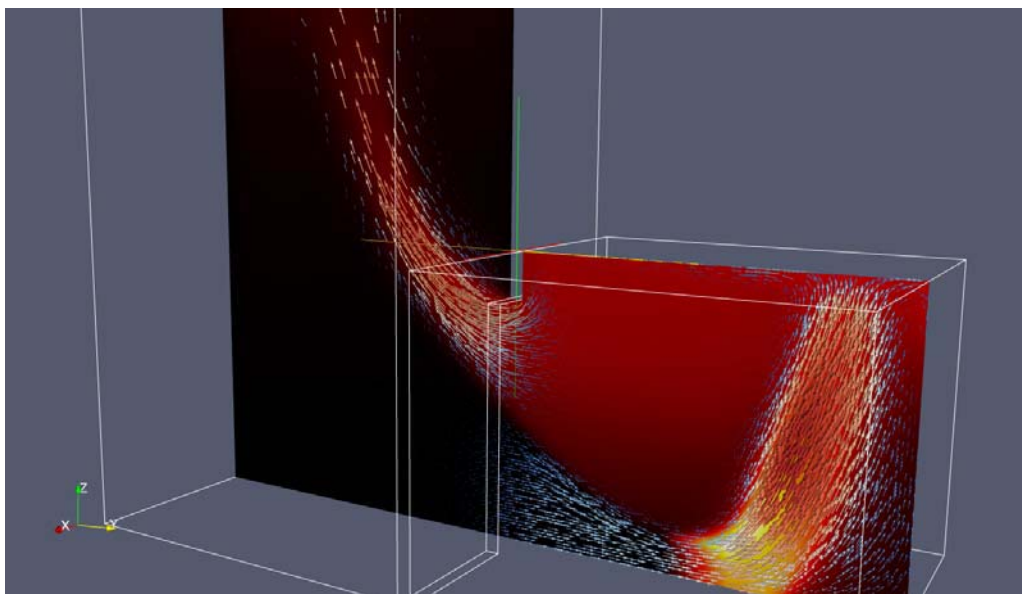


Figur 24. Temperaturfältet efter några minuters brand, enligt Xoodles.

4.2.4 BuoyantSimpleSourceRadiantFoam

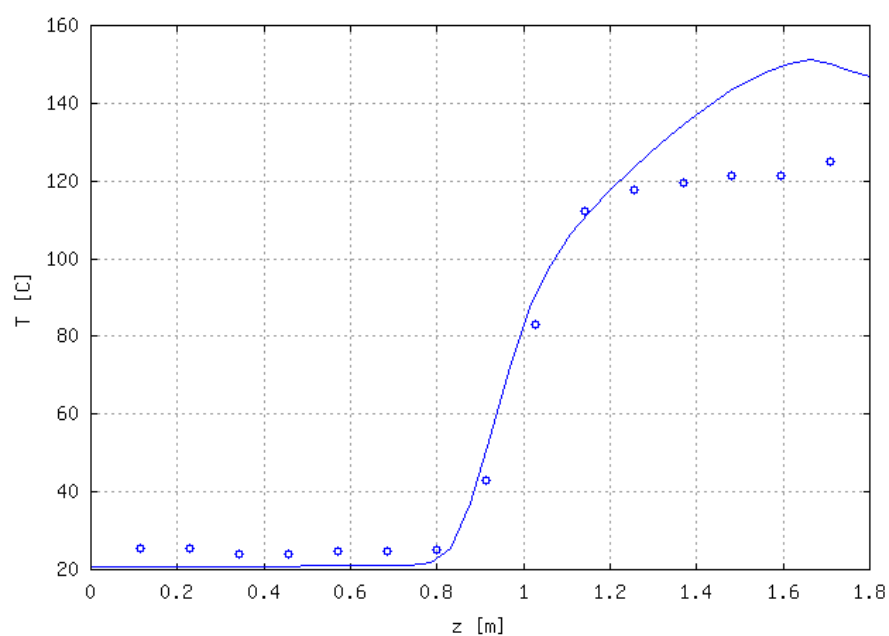
Detta är en stationär RANS kod vilket innebär betydligt kortare simuleringsstider än föregående applikationer. Istället för en förbränningsmodell används här en volumetrisk energikälla med en i förväg definierad form och storlek. Just i denna volym användes en energikälla på 62.9 kW och höjden bestämdes enligt en korrelation för flamhöjd.

Simuleringarna resulterade i ett flödes- och temperaturfält med god överensstämmelse med den experimentella data, se nedan.

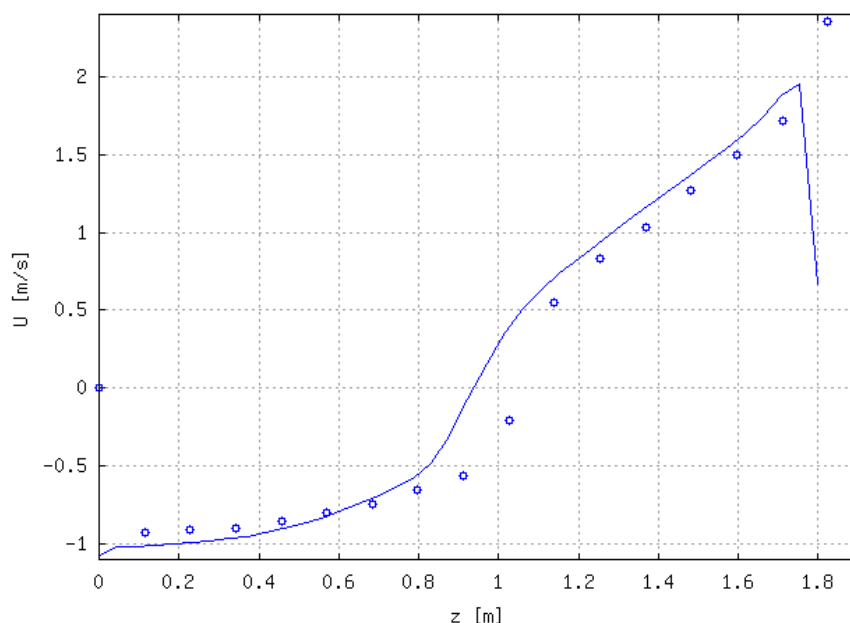


Figur 25. Snitt av temperaturfältet och flödesvektorer.

För att kontrollera resultaten mot den experiment samplades CFD-lösningen på centrumlinjen i dörren, resultatet visas i Figur 26 och Figur 27.



Figur 26. Jämförelse mellan experiment och CFD, temperaturprofil.

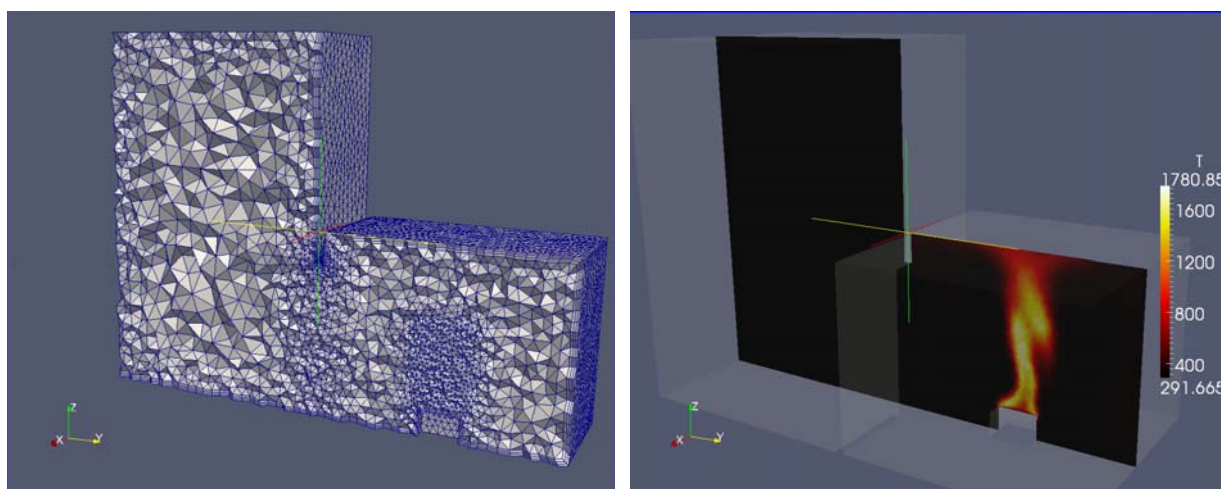


Figur 27. Testdata (punkter) och CFD (heldragen linje), hastighetsprofil i öppning.

Resultaten visar en god överensstämmelse trots modellens enkelhet. En viss överprediktion av temperaturen i övre delen av dörröppningen noteras. Trots detta måste modellen anses fånga trenderna väl och man kan dra slutsatsen att detta kan vara ett potentiellt verktyg för enklare brandtekniska simuleringar. Applikationen förlorar precision och användbarhet genom avsaknaden av förbränningsmodell och energiförluster till följd av värmeledning.

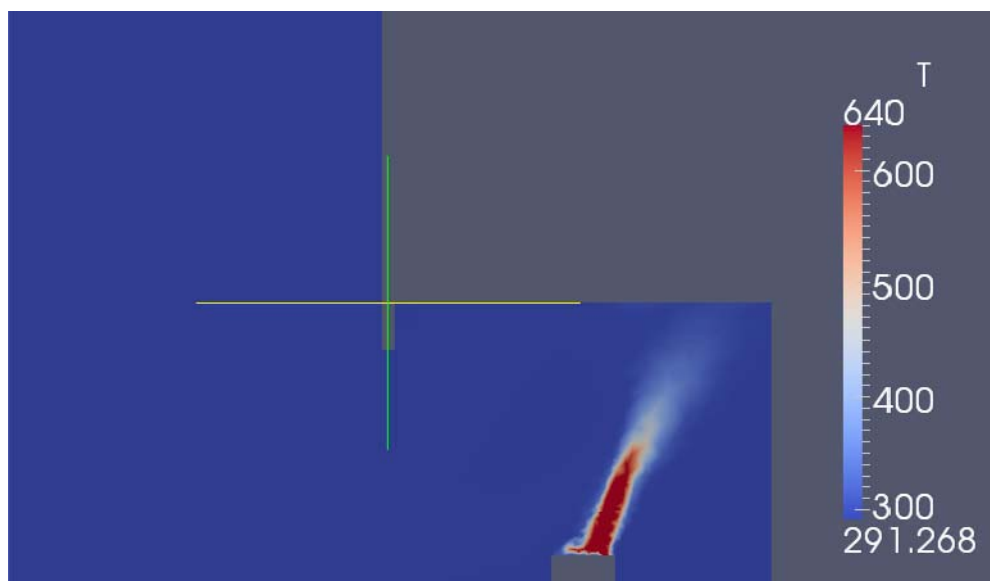
4.2.5 FireFoam

FireFOAM är i skrivande stund en intressant men svåränvänd applikation. I sitt ursprung är modellen baserad på den vanliga PISO-stegaren vilket innebär att tidssteget måste hållas mycket lågt med långa beräkningstider som följd. Beräkningsresultaten som erhållits här är tveksamma.



Figur 28. Illustration av beräkningsnätet och ett ögonblicksresultat av temperaturfördelning genom flammen från beräkning med FireFOAM.

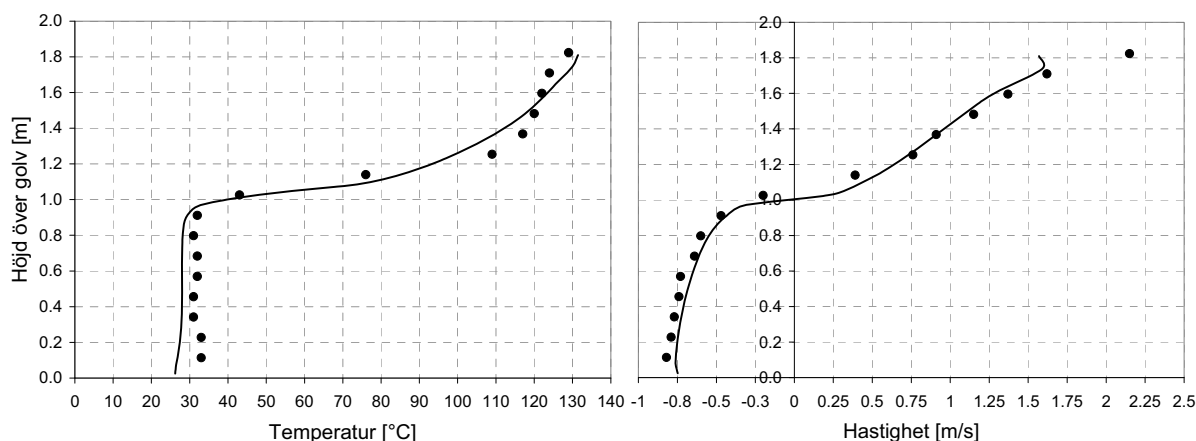
I OpenFOAM version 1.6 finns det en ny tidstegare PIMPLE som är en kombinerad PISO/SIMPLE lösare. Denna inkluderades i FireFOAM och en kort simulering genomfördes med nedanstående resultat.



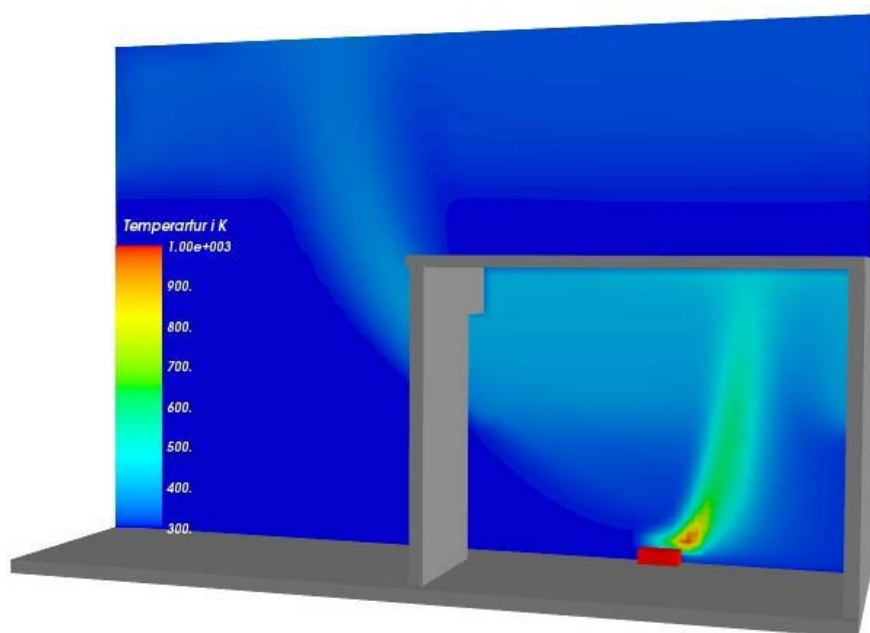
Figur 29. Inledande beräkning med FireFOAM med användande av PIMPLE-lösaren.

4.2.6 SOFIE

Liksom FDS ger en beräkning med SOFIE resultat som stämmer mycket väl överens med uppmätt data från försöket. Följderna av att försumma grundläggande parametrar såsom värmetransport i väggar, strålning och liknande är välkänd och kan inte rekommenderas för annat än kvalitativa screeningberäkningar.



Figur 30. Testdata (punkter) och beräkningsresultat (heldragen linje) av hastighets- och temperaturprofil i dörröppningens centrum.



Figur 31. Visualisering av beräkningsresultat med SOFIE, temperaturfördelning i rummets symmetriplan.

4.3 Medelskalförsök av brandgasventilation med sidvind

Ovanstående simuleringsfall har utgjorts av relativt väldefinierade scenarier med ett renodlat enkelt brandfall och ett renodlat enkelt strömningsfall. Det riktiga problemet karakteriseras av det komplexa samspelet mellan:

- Icke-stationär strömning
- Laminär/Turbulent strömning
- Naturlig/forcerad konvektion
- Förbränning
- Strålning

Detta samspel illustreras i en försökserie av Ghosh (1993). Den parameter som plottats är utströmningskoefficienten vilken förenklat ges av relationen:

$$C_v = \frac{\dot{m} T_{\max}}{A_v \rho_0 \sqrt{2(T_{\max} - T_0) g d_b T_0}}$$

där $\dot{m}$ är massflödet genom ventilatorn och d_b är brandgasskiktets djup i anslutning till ventilatorn. Denna ekvation förutsätter i princip ett homogent brandgasskikt vilket dock inte alltid kan förväntas. Ekvationen försummar vindinducerade effekter.

Data för uppmätt massflöde genom ventilatorn har inte presenterats av Ghosh. Detta har beräknats utifrån uppmätt CO_2 -koncentration i anslutning till ventilatorn och bör betraktas

som en källa till osäkerhet i försöksdatan. Till detta kommer det linjära beroendet och osäkerheten vid uppskattning av brandgasskiktets djup för beräkning av utströmningkoefficienten. I beräkningarna används ett medelvärde av primärt temperatur och koncentrationen av en passiv skalär i anslutning till öppningen.

Det framgår av försöksuppställningen att försöken inte är helt representativa för ett verkligt scenario med vindlast på byggnad med brandventilatorer. Vindlasten representeras av en konstant luftström från ett 1m×1m utblås. Detta ansluter direkt till taknivå på testriggens kortsida vilket innebär att det strömningsinducerade tryckfältet på riggens tak inte blir detsamma som för fallet med brandventilator på byggnad utan i princip brandventilator på mark.

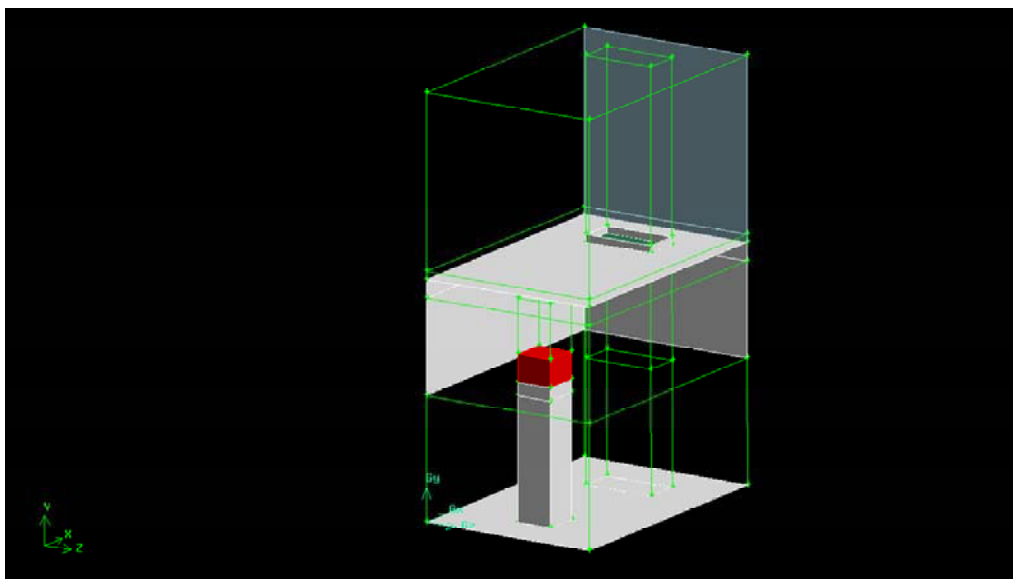
Vid försöken varierar inflödet av bränsle för att motsvara en viss brandgastemperatur. Avgiven effekt från brandkällan finns inte registrerad utan kan förväntas variera beroende på scenario och vindhastighet.

Osäkerheten i mätdatan och i de parametrar som härleds ut denna måste betraktas som uppenbar. Det är rimligt att betrakta resultaten från ett kvalitativt perspektiv.

4.3.1 BuoyantSimpleSourceRadiantFoam

De tidigare beräkningarna har antytt att tillgängliga applikationer i OpenFOAM har begränsad användning vid simulering av tyngdkraftsdominerade brandförlopp, undantaget den nya applikationen FireFOAM. Här redovisas endast en beräkning med ÅFs applikation BuoyantSimpleSourceRadiantFoam.

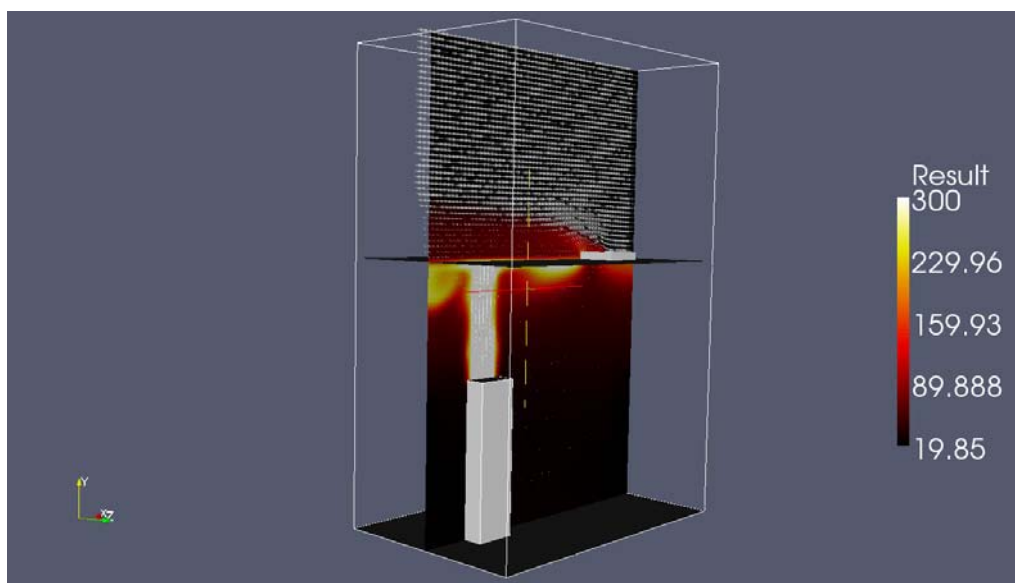
Beräkningsdomänen illustreras översiktligt i Figur 32. Luft släpps in med 5 m/s genom den gröna ytan. Den passerar den lilla brandventilatorn som kan ses som en upphöjning i ytan. Ventilationsöppningen har i beräkningen försetts med en ”vindskyddande” sarg. Branden simuleras som en volymkälla här markerat med rött. Källstyrkan sattes till 13.6 kW.



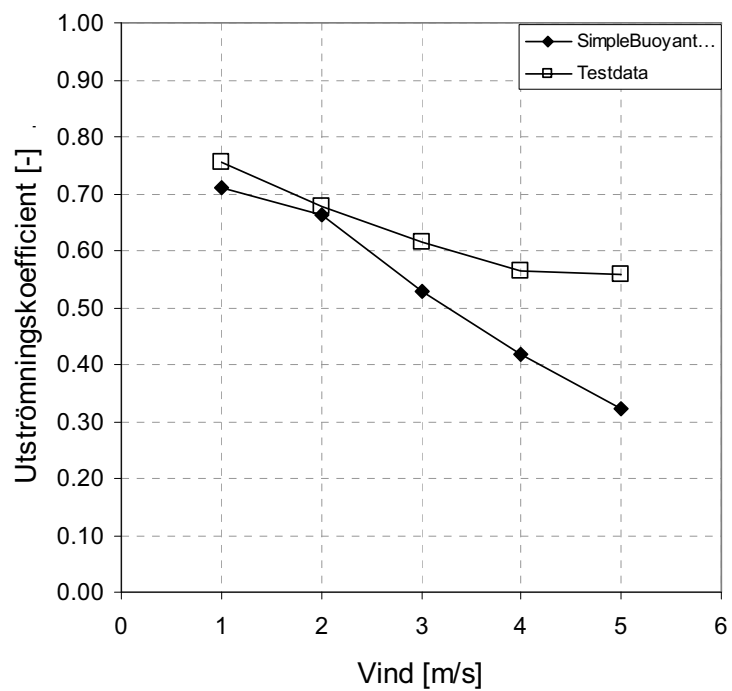
Figur 32. En illustration av beräkningsdomänen, några av väggarna är borttagna här för visualiseringens syfte.

Det resulterande temperaturfältet och flödesfältet kan ses i Figur 33.

För vindhastigheten 1 m/s med skiktjockleken 0.3 m, massflödet genom öppningen 0.09 kg/s samt en temperaturskillnad mellan brandgaserna och omgivningen om 161°C fås ett $C_v = 0.71$ vilket stämmer relativt väl överens med det experimentella resultatet.



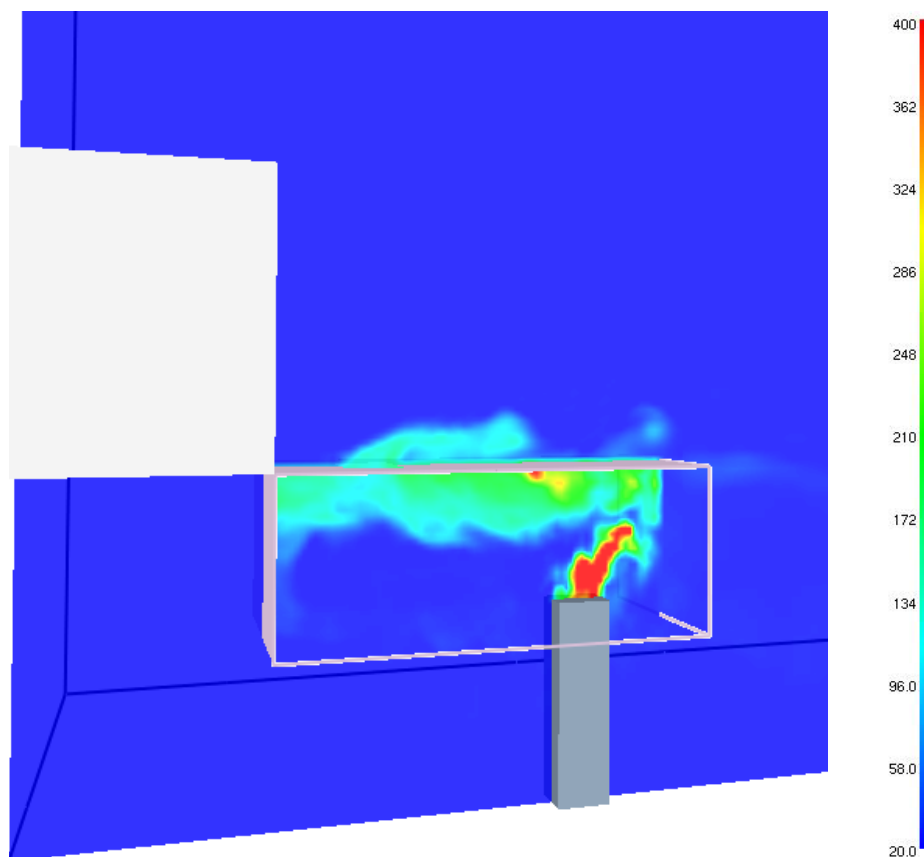
Figur 33. Temperatur och hastighetsfält. Temperaturplotten är trunkerad för att illustrera rökgasskiktet.



Figur 34. Utströmningskoefficient härledd utifrån beräknad (BuoyantSimpleSourceRadiantFoam) respektive experimentell data.

4.3.2 FDS

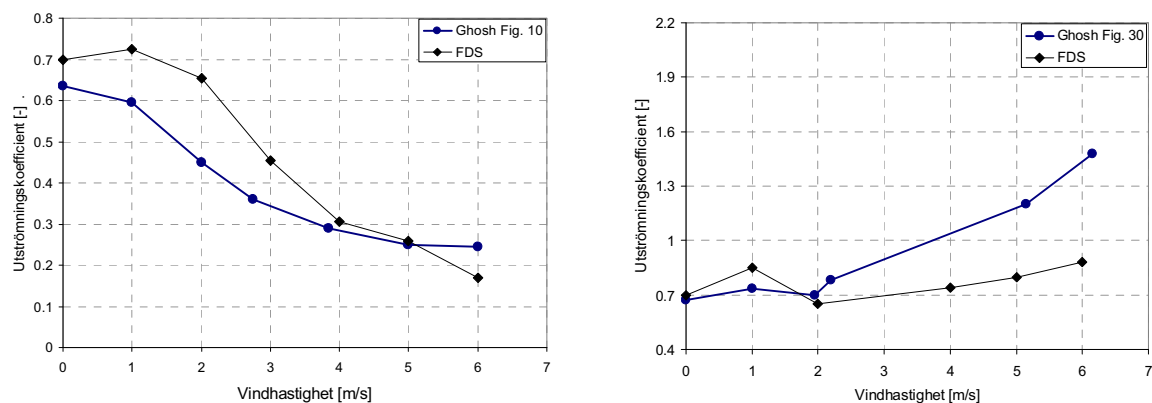
Figur 35 visar en ögonblicksbild från testriggen vid simulering med FDS. Här finns ingen skyddande sarg runt ventilatorsöppningen. Gastemperaturen under riggens tak är omkring 200°C-250°C



Figur 35. Temperaturfördelningen för ett scenario utan sarg runt ventilatoröppning, 3 m/s. Endast en del av domänen visas för en tydligare illustration.

Utan en skyddande sarg runt ventilatorsöppningen minskar det utventilerade massflödet vid ökad vindhastighet. Med hänsyn till osäkerheterna kring försöksserien ska de numeriska resultaten inte ges alltför hög vikt, vad som är betydelsefullt är att trenden i mätdata och beräkning stämmer överens. Brandgastemperaturen hålls i försöken konstant vilket innebär att brandeffekten varierar då massflödet genom öppningen ändras. Detta har inte kunna hållas till fullo vilket kan bidra till avvikelser.

Figur 36 visar en jämförelse mellan beräkningar med FDS och data presenterade av Ghosh (1993). Ghosh fig. 10 är ett test utan sarg runt öppningen och med en brandgastemperatur om ca 250°C. Försöksserien presenterad i Ghosh fig. 30 har en 8 cm hög sarg runt om öppningen, brandgastemperaturen är ca 200°C.

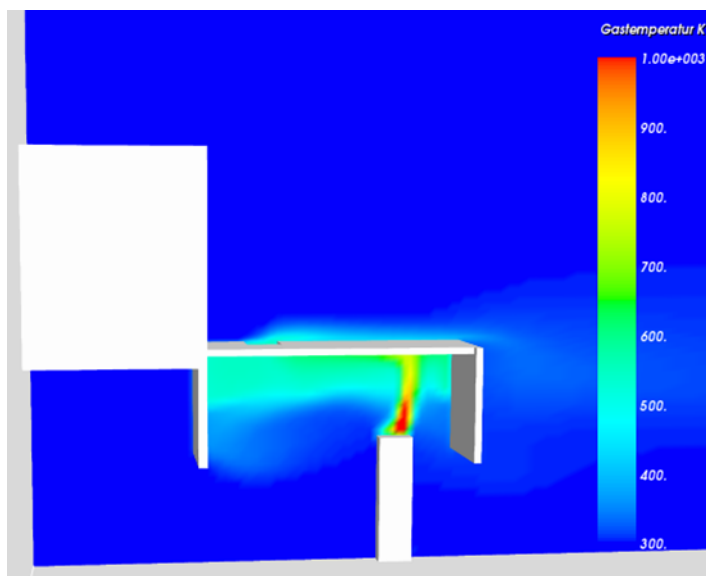


Figur 36. Jämförelse mellan strömningskoefficient härledd från testdata och från beräkning med FDS.

4.3.3 SOFIE

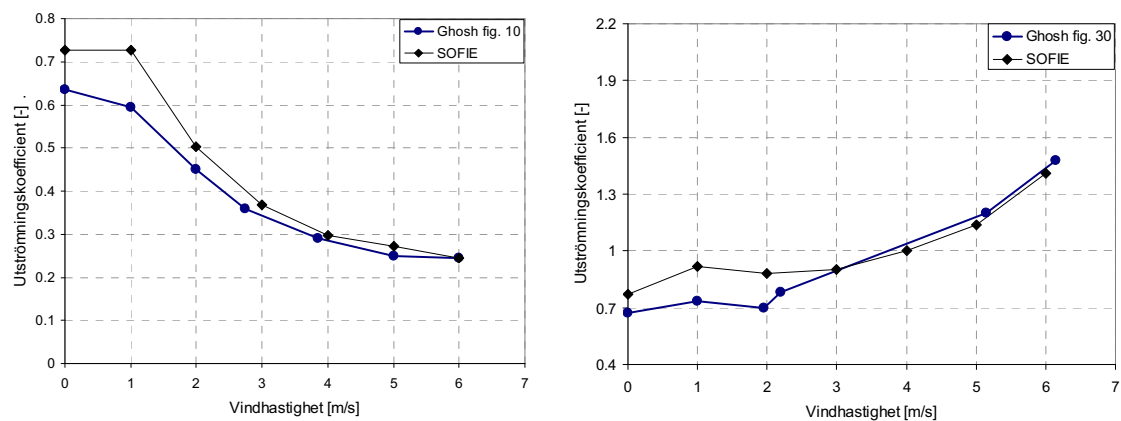
Figur 37 visar resultatet från en typisk beräkning med SOFIE, bilden visar det medelvärdesbildade resultatet vilket kan jämföras med ögonblicksresultat från FDS-beräkning i

Figur 35. Lutningen av plymen ovanför ventilatorn skiljer sig åt mellan beräkningarna vilket till viss del beror av vilken ögonblicksbild från FDS som väljs.



Figur 37. Temperaturfördelningen för ett scenario utan sarg runt ventilatoröppning, 3 m/s vindlast. Jämför FDS beräkning; Figur 35.

Figur 38 visar numeriska jämförelser mellan beräknad utströmningskoefficient utifrån testdata och beräkning. Det numeriska värdet ska tolkas med försiktighet, det som är behållningen är att trenden predikteras helt korrekt i båda scenarierna. Det beräknade djupet på brandgasskiktet är större än rapporterat i testdata vilket antyder att massflödet inte är helt överensstämmande mellan simulering och uppmätt resultat.



Figur 38. Strömningsskoefficient härledd från testdata och från beräkning med SOFIE. Resultatet är väldigt bra men det poängteras att utvärderingen innehåller flera osäkerheter och att det väsentliga är att trenden predikteras korrekt.

5 Diskussion

Installation av termisk brandgasventilation syftar till att upprätthålla ett, rimligt stort, undertryck utanför brandventilatorerna. Med en sarg som vindskydd kan effektiviteten förväntas öka med pålagd vind. Detta framgår av tillgänglig experimentell data men även av genomförda beräkningar.

Kriteriet för en fungerande brandgasventilator ges av olikheten:

$$C_{piT} + C_{piw} - C_{por} > 0$$

eller, uttryckt i ord:

internt tryck (brandgenererat) + internt tryck (vindberoende) - vindtryck vid ventilatorn > 0

Varje övertryck vid ventilatorn begränsar eller hindrar utflödet. Detta är i synnerhet ett problem vid användning av enklare typer av vägghängda ventilatorer. Om det interna trycket som skapas av extern vind för enkelhets skull försummas kan den kritiska vindhastigheten uppskattas genom sambandet:

$$U_{kritisk} = \sqrt{\frac{2P_{brand}}{\rho_0 C_p}}$$

För ett brandtryck i en byggnad om 10 Pa och med tryckkoefficienten för vägghängd ventilator om 0.5 innebär detta en kritisk vindhastighet om ca 6 m/s. Effekten av vind mot en vägghängd ventilator simuleras som ett tillämpningsexempel i avsnitt 5.2.

Det finns även farhågor om att en alltför stark vind kan leda till att undertrycket vid ventilatorn blir så stort att luft sugas från volymen under brandgasskiktet. Detta har inte studerats vidare i denna rapport men fenomenet torde i sådana fall utan problem kunna simuleras kvalitativt med valfri CFD-applikation.

Utförda simuleringar har visat att de fritt tillgängliga CFD applikationerna som används för brandtekniska beräkningar; FDS och SOFIE, ger bra resultat avseende såväl vindtryck som kombinationen vindtryck och tyngdkraftsdominerad turbulent strömning. Åtminstone för någorlunda enkla geometrier. För mer komplicerade geometrier behövs mer avancerade nät än de kubiska nät som används av dessa program. Det är här som alternativa applikationer, bland annat i form av OpenFOAM kommer in.

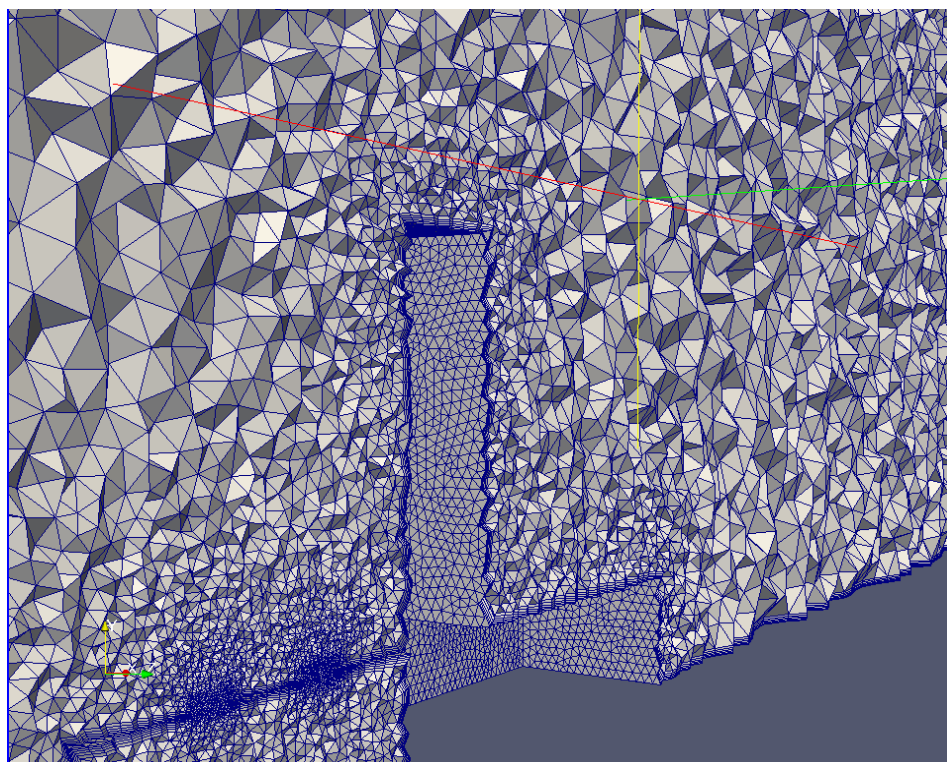
Även om den externa vinden ger en förstärkt effekt på strömningen genom enskilda brandgasventilatorer kan vinden motverka brandgasventilationens syfte genom att förstöra brandgaslagret. Effekten blir en rökfylld byggnad och i vissa fall ett sämre utflöde av brandgaser. Snålt tilltagna tilluftsöppningar kan ge hög hastighet på inflödande ersättningsluft

vilket ytterligare kan försämrå förhållandena i en brandutsatt lokal. Detta är dock fenomen som kan hanteras inom ramen för CFD-beräkningen.

5.1 Tillämpningsexempel - extern vind runt en storskalig byggnad

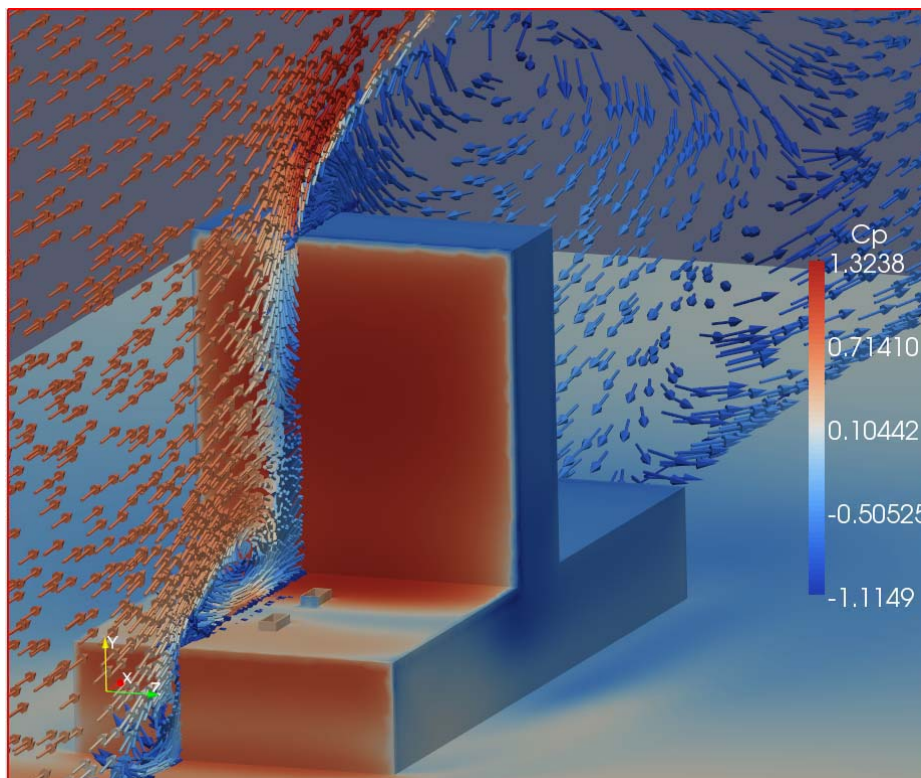
Om en byggnad är uppförd med olika höga byggnadsdelar eller om det finns närliggande störande objekt finns risk för att lokala övertryck uppstår på taket. Exemplet nedan illustrerar ett fall där en eventuell utvädring av brandgaser kan bli problematisk. Fallet utgörs av en byggnad uppbyggd med olika höga byggnadsdelar, lågdelen är 6 meter hög och arean $18\text{ m} \times 42\text{ m}$. I mitten reser sig ett "höghus" som är, mätt från marken 24 m högt. Två brandgasventilatorer sitter på ovansidan av lågdelen, dessa har dimensionen 2 m^2 och har en sarg 0.5 m hög runt omkring dem. För enkelhets skull och för jämförelsen med försöken som återges i Kandola (1990), se Figur 1, har antagits att inga andra byggnader finns i närheten. Eftersom tryckkoefficienten i Figur 1 beräknats från en okänd referenshastighet kan dock en direkt jämförelse inte göras.

Ett nät bestående av 1.7 miljoner celler konstruerades, vilket för applikationen är ett relativt grovt nät, ett y^+ på i medeltal 800 erhöles över byggnaden. Enligt tidigare innebär detta att ett kvalitativt korrekt resultat bör erhållas samtidigt som det exakta numeriska resultatet kan innehålla ett visst fel.



Figur 39. Illustration av nätet för beräkning av fiktiv byggnad med två brandventilatorer framför en högre byggnadsdel.

Nedan illustreras flödesfältet i ett plan över huskroppen. Som väntat erhålls en storskalig separation bakom huset och så även i framkant. Det kolliderande flödet skapar en stor stagnationszon på högdelens framsida. Denna inverkar tydligt på tryckfördelningen på takets ovansida med övertryck utanför brandgasluckorna som resultat.



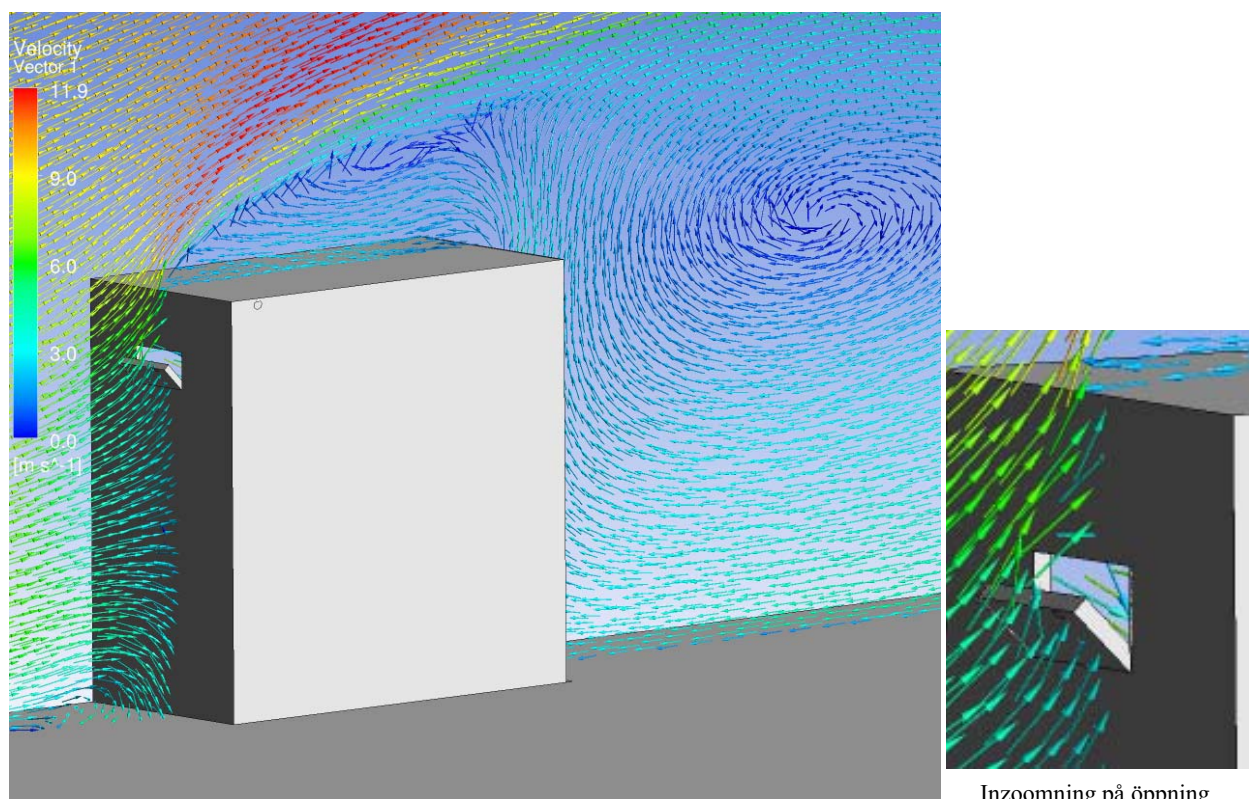
Figur 40. Illustration av flöde och tryckkoefficient.

5.2 Tillämpningsexempel - extern vind mot vägghängda ventilatorer

Den friliggande kubiska konstruktionen, 6m×6m×6m, som simulerades i avsnitt 4.1 används här för att simulera ett fiktivt scenario där ett brandrum brandgasventileras med hjälp av underhängda fönster, två stycken på vardera sidan. Ersättningsluft tas från en öppning centralt placerad på konstruktionens läsida. Brandkällan utgörs av ett dieselskär, 250 kW, placerat centralt i rummet.

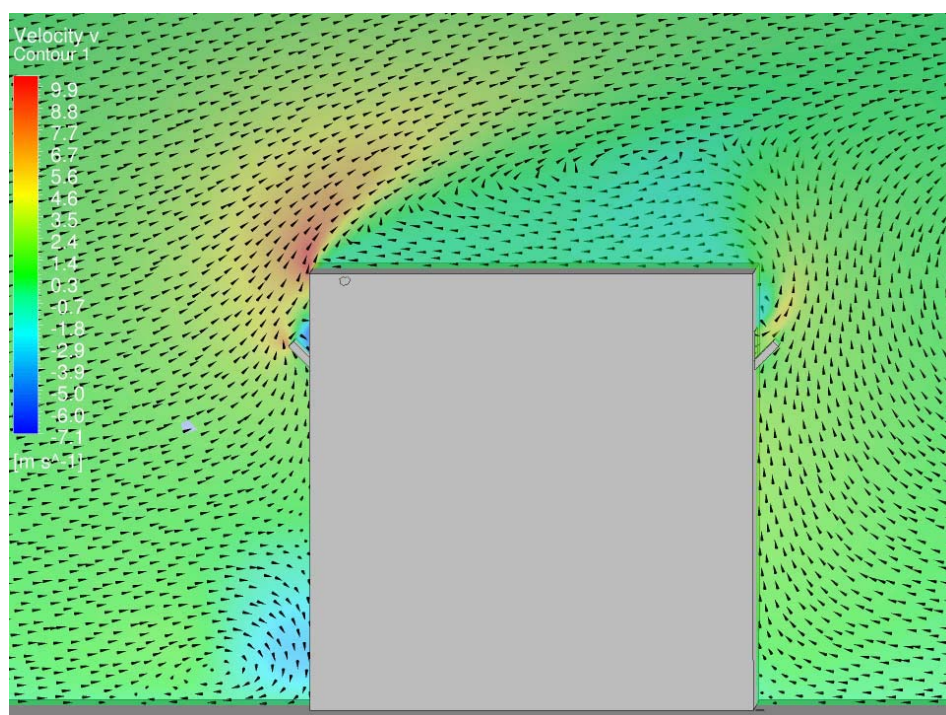
Figurerna nedan visar resultatet från simulering med BuoyantSimpleSourceRadiantFoam. Figur 41 visar en vektorplot där luftströmmen in genom fönsteröppningen på lovartsidan tydligt framgår. Att ha fönster på denna sida öppna motverkar sannolikt brandgasventilationens syfte.

Notera även separationen på taket som medför att medelflödet går emot vindriktningen.



Figur 41. Vektorplot av hastighetsfältet, färgad efter totala hastigheten. Vinden kommer från vänster på bilden.

Samma scenario redovisas, med en vektorplott samt konturlinjer av hastigheten i vertikal riktning, i Figur 42. Inflöde in i brandrummet syns på lovartsidan till vänster medan utflöde framgår som ett lokalt fält med högre hastighets vid det högra fönstret.



Figur 42. Vektor- samt konturplot av strömingshastigheten i ett snitt genom fönsterventilatorerna. Vinden kommer från vänster i bild, inflödet genom ventilatorn på vindsidan är tydligt.

5.3 Rekommendationer

Är det rimligt att alltid inkludera vindlaster vid dimensionering av brandgasventilation?

Svaret måste relateras till syftet med att installera brandgasventilation. Klart är att vindeffekter kan ha en avsevärd inverkan på brandgasventilation men att dessa i stor utsträckning kan beräknas med CFD eller med enklare semi-empiriska modeller (Kandola, 1990).

Ett alltför starkt inflöde genom tilluftsöppningar eller läckage kan störa brandgasskiktningen. Detta är känt från fullskaliga experiment och är heller inte svårt att simulera.

För en byggnad som ligger fritt, utan närliggande hus eller med hus i samma höjd innebär vind att massflödet genom ventilatorn förstärks. Så länge den ovan nämnda omblandningen inte är ett problem behöver vind alltså inte beaktas.

Baserat på den genomförda litteraturstudien och den stora mängd simuleringar som utförts kan följande rekommendationer ges för dimensionering av brandgasventilation:

- För dimensionering av takventilatorer på en fristående byggnad med ett relativt platt tak ($<20^\circ$ lutning) behöver knappast vindpåverkan inkluderas som en del av den effektiva utströmningskoefficienten. Eftersom vinden i medeltal kan förväntas skapa ett undertryck på taket, vilket förstärker utflödet, representerar vindstilla förhållanden det "sämsta" fallet avseende utströmningskoefficienten.
- Även om en extern vind medger en förbättrad utströmningskoefficient innebär öppningar i fasadskalet, bland annat för ersättningsluft och andra byggnadsläckage, en intern strömning inom byggnaden som i många fall är tillräckliga för att störa brandgasskiktet och leda till en rökfylld lokal. Om brandgasventilationen har som avsikt att ge god sikt i lokalen måste detta beaktas och åtgärder vidtas för att begränsa effekterna av vindpåverkan.
- Om byggnaden inte är fristående och framför allt om den är omgiven av högre byggnader eller högre byggnadsdelar kan övertryck uppstå på taket vilket begränsar eller, i extrema fall, helt motverkar utströmning genom ventilatorn. Samtliga av de utvärderade CFD applikationer har visat sig kunna prediktera tryckfördelning till följd av vind och kan användas för att utvärdera dess effekter. För att undvika långa exekveringstider utelämnas rimligen förbränningsmodellen i detta skede. På så sätt kan även en viss optimering av ventilatorernas placering göras innan den brandtekniska beräkningen.
- Vid beräkning är det av stor vikt att beräkningsdomänen är förlängd runt det studerade objektet. Minst 5 gånger objektets storlek åt sidorna och minst 4 gånger objektets höjd uppåt rekommenderas.
- Randvillkoren uppåt och på modellens sidor väljs med fördel som free-slip eller symmetri.

- Vid användning av vägghängda ventilatorer, fönsterband och liknande finns en överhängande risk för inflöde genom ventilatorer på lovartsidan vilket kan göra brandventilationen kontraproduktiv. CFD simuleringar är tillämpliga för att utvärdera detta. Beräkningsnätet har stor betydelse för såväl det kvalitativa som det kvantitativa resultatet. Användning av kubiska nät är tveksam men bör kunna användas för kvalitativa beräkningar.
- LES har fördelen att ge mer realistisk utdata men ger i normalfallet avsevärt längre exekveringstider. Bortsett från FDS som baseras på en mycket effektiv LES-lösare finns inget skäl att använda denna metod.
- RANS-applikationer har fördelen av att kunna utelämna tidsstegningen och simulera ett stationärt förhållande vilket sparar mycket tid. Finns möjlighet bör detta användas i första hand.

Referenser

Castro I. P., Robins A. G., “The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams, *Journal of Fluid Mech.*, vol 79, pp 307-335, 1977.

Hägglund B., Nireus K., Werling P., “Effects of inlets on natural fire vents, An experimental study”, FOA-R—96-00246-2.4—SE, 1996.

Ghosh B.K., “Some effects of crosswind on ventilators”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol 45, pp 247-270, 1993.

Ingasson H., Persson B., “Effects of wind on natural fire vents”, Brandforsk project 055-921, SP Rapport 1995:04, 1995.

Jiang Y., Chen Q., “Study of natural ventilation in buildings by large eddy simulation”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol 89, pp 1155-1178, 2001.

Kandola B. S., “Effects of atmospheric wind on flows through natural convection roof vents”, *Fire Technology*, pp 106-120, 1999.

Kramer C., Gebhart H.J., ”Wind effects on heat and smoke control in industrial buildings in case of fire”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol 36, pp 499-508, 1990.

Lakehal D., Rodi W., “Calculation of the flow past a surface-mounted cube with a two-layer turbulence model, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol 67&68, pp 65-78, 1997.

McGrattan K., mfl., “FDS - Fire Dynamics Simulator”, <http://fire.nist.gov/fds/> , 2009.

Morgan J., Marchant E. W., “Some effects of natural wind on vent operation in shopping malls”, CIB Symposium on the control of smoke movement in building fires, BRE, 1975.

Natalini B., Marighetti J. O., Natalini M. B., “Wind tunnel modelling of mean pressures on planar canopy roof”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol 90, pp 427-439, 2002.

Oliviera P. J., Younis B. A., ”On the prediction of turbulent flows around full-scale buildings”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol 86, pp 203-220, 2000.

OpenFOAM, <http://www.opencfd.co.uk/openfoam/> , 2009.

Richards P. J., Hoxey R. P., Short L.J., “Wind pressures on a 6m cube”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol 89, pp 1553-1564, 2001.

Rubini P. A., “SOFIE - Simulation Of Fires In Enclosures”,
<http://www.hull.ac.uk/php/331346/sofie.htm> , 2009.

Sanderson V., Rubini P. A., Moss J. B., ”The effect of vent size of a compartment fire: Numerical simulation and validation”, *Proceedings of the Eight International Conferences - INTERFLAM’99*, Interscience Communications Ltd., pp 1189-1194, 1999.

Sanquer S., “Full size, model and numerical evaluations of the smoke ventilator aerodynamic efficiency: development and qualification”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol 90, pp 491-502, 2001.

Spehl P., “Détermination de l’action du vent et de la résistance au vent des exutoires de fumée et de chaleurs naturel”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol 45, pp 275-288, 1993.

Steckler K. D., Quintiere J. G., Rinkinen W. J., “Flow induced by a fire in a compartment“, *NBSIR 82-2520*, 1982.