



CHALMERS



Visualiseringsmetoder för luftrörelser

En jämförelse mellan rökvisualisering och CFD-simulering

Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet för samhällsbyggnad

Daniel Eisenberg

Axel Granberg

Ebba Engeblad

Jonathan Nilsson Lill

Tilde Felde

Oskar Stierna

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2026

www.chalmers.se

Sammanfattning

En god ventilation är nödvändig för att skapa välfungerande byggnader och utrymmen för människor att vistas i. Oavsett hur noggrann dimensioneringen är så kan det uppstå situationer där systemets funktionalitet behöver utvärderas. För att göra detta finns det verktyg och metoder som kan mäta lufthastigheter och föroreningshalter i specifika punkter, något som inte alltid ger en tydlig bild av helheten. Ett annat sätt att utvärdera hur väl ventilationen i ett utrymme fungerar är att göra det visuellt, vilket är fördelaktigt då det är intuitivt att kunna följa luftens rörelser med blicken.

I det här arbetet testades och utvärderades två metoder för att visualisera luftrörelser. Den första är rökvisualisering, ett fysiskt test där rök släpps ut i ett utrymme och synliggör luftens egna rörelser. Den andra metoden är med CFD-programmet Ansys, vilket är ett datorbaserat verktyg som kan simulera luftrörelser och sedan visualisera dem med animationer.

Syftet med arbetet är att jämföra dessa visualiseringsmetoder och avgöra när och var de är lämpliga att använda – utifrån kostnad, användarvänlighet och tillförlitlighet.

Rökvisualiseringarna genomfördes i ett laborationsrum, där det var möjligt att kontrollera de ingående parametrarna som har en påverkan på hur luften rör sig. Genom att variera luftflöde, tilluftstemperatur och intern värmeeffekt i rummet, kunde olika fall testas. Experimenten dokumenterades med filmer och bilder.

I CFD-programmet modellerades samma laborationsrum. Även de ingående parametrarna återskapades för att genomföra en rättvis och verklighetstrogen jämförelse mellan metoderna. Simuleringar av luftrörelser gjordes för varje fall och kunde därefter jämföras med resultaten från rökvisualiseringen.

Efter de två metoderna hade jämförts var det möjligt att dra slutsatser. Gällande användarvänlighet var rökvisualisering det bättre alternativet. Metoden kräver inte några större förkunskaper och det var lätt att få en överblick av luftrörelserna i ett rum, då de kunde observeras direkt på plats. CFD-programmet förutsätter däremot att användaren är påläst och har erfarenhet av programvaran för att kunna skapa en modell och utföra visualiseringar.

Rökvisualisering lämpar sig bra för snabba och kostnadseffektiva utvärderingar av ventilationssystem - då den enda utrustningen som krävs är en rökmaskin och eventuellt en kamera för dokumentation. CFD kräver licens och en kraftfull dator, vilket innebär betydligt högre kostnader. Däremot är det med CFD lätt att ändra parametrar, något som inte alltid är möjligt vid ett fysiskt visualiseringstest. Datorgenererade visualiseringar medför dessutom flexibilitet och kan möjliggöra undersökningar av luftrörelser i svåråtkomliga utrymmen eller för lokaler i projekteringsstadiet.

Rökvisualiseringar kan endast genomföras i redan existerande rum.

Abstract

A good ventilation system is essential for creating well-functioning buildings and spaces where people can comfortably spend time. Even with careful system design, there can still be situations where the system's functionality needs to be tested. To do this, there are tools and methods designed to measure air velocity and the concentration of pollutants in specific points – which is something that doesn't always produce a clear picture of the situation. Another way to evaluate the functionality of ventilations systems is to do it visually, which is beneficial since it is intuitive to be able to follow the movements of the air with the eye.

In this thesis, two methods for visualizing airflow were tested and evaluated. The first is smoke visualization, where smoke is released into a space which makes the movements of the air visible. The other is with a CFD-program, a computer-based tool capable of simulating airflows and visualizing them through animations.

The purpose of the thesis is to compare these methods for airflow visualization and determine when they are most suitable - based on cost, user friendliness and reliability.

The smoke visualizations were carried out in laboratory rooms, with the ability to control the parameters affecting the movements of the air. By altering airflow, the temperature of the supply air and the internal heat generation in the room, it was possible to study different cases. The experiments were documented with videos and pictures.

The same laboratory room was modelled in the CFD-program. The different parameters were recreated to enable a fair and true-to-life comparison between the methods. Simulations of airflow were carried out for each case and were then compared to the results of the smoke visualizations.

After the comparisons, some conclusions were able to be drawn. When it comes to user friendliness, smoke visualisation is the better alternative. It does not require much experience, and it was easy to get an overview of the air-movements in a room, since they could be directly observed. To make use of the CFD-program, the user needs experience and knowledge of the program – to create a model and run the calculations.

Smoke visualisation is suitable for quick and cost-effective evaluations of ventilation systems, since the only equipment needed is a source of smoke and a camera for documentation. The CFD-program requires a licence and a powerful computer, which drives up the cost substantially. It is however easy to change parameters in the CFD-program, something which is not always possible in a physical test. Computer-generated visualizations also have the benefit of being flexible and making it possible to evaluate airflows in inaccessible places and spaces that are in the design-phase. Smoke visualization is only possible in already existing spaces.

Innehållsförteckning

I	BEGREPP OCH DEFINITIONER	I
1	INLEDNING	1
1.1	VENTILATIONENS FRAMVÄXT	1
1.2	VENTILATIONSKRAV	2
1.3	LUFTRÖRELSER	3
1.3.1	Drivkrafter för lufrörelser	3
1.3.2	Visualisering av lufrörelser	3
1.4	LUFTFÖRINGSPRINCIPER	4
1.4.1	Deplacerande ventilation	4
1.4.2	Omblandande ventilation	5
1.5	COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)	6
1.5.1	Grundläggande principer för CFD	6
1.6	PRINCIPER FÖR HUR CFD FUNGERAR	7
1.6.1	Programvaror för CFD	8
2	SYFTE OCH MÅL	9
2.1	RÖKVISUALISERING	9
2.2	CFD	9
2.3	MÅL	9
3	UTFÖRANDE	10
3.1	RÖKVISUALISERING I LABBMILJÖ	10
3.1.1	Förberedelse av laborationsrummen	10
3.1.2	Utrustning	13
3.1.3	Inställning av parametrar	18
3.1.4	Dokumentation	19
3.1.5	Genomförande experiment 1 (rök tillsätts via tilluften)	20
3.1.6	Genomförande experiment 2 (rök tillsätts via mannekängen)	20
3.2	VISUALISERING MED CFD-PROGRAM	20
3.2.1	Val av programvara	20
3.2.2	Förstudie	21
3.2.3	Geometri	21
3.2.4	Beräkningsnät	22
3.2.5	Setup	23
3.2.6	Lösning	25
3.2.7	Resultat	26
3.2.8	Skapa filmmaterial	27
4	RESULTAT	28
4.1	VÄRMEEFFEKT 150W, TILLUFT $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, FLÖDE 10 L/S	28
4.2	VÄRMEEFFEKT 150W, TILLUFT $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, FLÖDE 15 L/S	32
4.3	VÄRMEEFFEKT 150W, TILLUFT $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$, FLÖDE 15 L/S	36
5	TOLKNING AV RESULTAT OCH DISKUSSION	40
5.1	JÄMFÖRELSE AV OLIKA FLÖDEN	40
5.1.1	Diskussion: 75W, $\Delta T = 1,2-1,7^{\circ}\text{C}$ kallare tilluft, 10 l/s & 15 l/s	40
5.1.2	Diskussion: 150W, $\Delta T = 1,2-1,7^{\circ}\text{C}$ kallare tilluft, 10 l/s & 15 l/s	40

5.1.3	<i>Diskussion: 225W, $\Delta T = 1,2-1,7^{\circ}\text{C}$ kallare tilluft, 10 l/s & 15 l/s</i>	41
5.2	JÄMFÖRELSE AV TEMPERATURSKILLNAD	41
5.2.1	<i>Diskussion: 75W, 15 l/s, $\Delta T = 0^{\circ}\text{C}$ & $\Delta T = 1,2-1,7^{\circ}\text{C}$ kallare tilluft.</i>	41
5.2.2	<i>Diskussion: 150W, 15 l/s, $\Delta T = 0^{\circ}\text{C}$ & $\Delta T = 1,2-1,7^{\circ}\text{C}$ kallare tilluft.</i>	42
5.2.3	<i>Diskussion: 225W, 15 l/s, $\Delta T = 0^{\circ}\text{C}$ & $\Delta T = 1,2-1,7^{\circ}\text{C}$ kallare tilluft.</i>	42
5.3	SAMMANFATTANDE DISKUSSION	43
5.4	FELKÄLLOR	43
5.4.1	<i>Begränsningar i CFD-modellen</i>	43
5.4.2	<i>Begränsningar i Streamline-visualisering</i>	44
5.4.3	<i>Begränsningar och osäkerheter vid rökförsök</i>	45
5.5	FÖR- OCH NACKDELAR MED METODERNA	46
5.5.1	<i>Rökvisualisering</i>	46
5.5.2	<i>CFD-simulering</i>	47
5.5.3	<i>Tillämpning i verklig miljö</i>	47
6	SLUTSATS	48
7	REFERENSER	49
8	BILAGOR	52
	<i>Inspelat filmmaterial från laborationer:</i>	52
	<i>Skärmklipp från rökförsök:</i>	54

I Begrepp och definitioner

I syfte att göra den här rapporten tillgänglig för en bredare målgrupp, listas återkommande begrepp och definitioner nedan:

Beräkningsnät (mesh)	Uppdelning av en geometri i volymer/areor vid numeriska beräkningar.
Buoyancy-effekt	Varm luft stiger och kall luft sjunker på grund av densitetsskillnader.
CFD	Förkortning från engelskans Computational Fluid Dynamics. Översätts till beräkningsströmningsdynamik, beskriver med differentialekvationer strömningstillstånd, med hjälp av datorberäkningar. Består ofta av en simulering med tillhörande animationer för ökad förståelse av resultaten.
Coandå-effekten	Ett fenomen som beskriver luftströmmars tendens att följa en yta.
CADR	Förkortning från engelskans Clean Air Delivery Rate. Är ett mått på en luftrenares kapacitet, mäts i l/s eller m ³ /h. Efter tre luftomsättningar brukar luften i ett utrymme vara renad.
DV	Deplacerande ventilation.
Döda zoner / stagnationszoner	Zoner i rum där ingen omblandning av luften sker.
Finita volymmetoden	Beräkningsmetoden i CFD, används för att lösa fysikaliska ekvationer (luftflöden) med hjälp av beräkningsnät.
Iteration	Ett beräkningssteg där flertalet lösningar successivt konvergerar mot ett mer exakt resultat.
Konvektionsströmning	Den rörelse som uppstår i en fluid när värme överförs.
Kontrollvolym	De mindre volymerna som beräkningsnätet består av.
Skiktning	Tydlig separation av luft med olika fysikaliska egenskaper.
Strömningslära	Förståelsen om hur fluider (vätskor och gaser) rör sig och interagerar med omgivningen.
Luftföringsprincip	Ett samlingsbegrepp för tekniker som tillför luft till ett rum.
Luftomsättning	Luftflöde per rumsvolym. Anger antal omsättningar av rumsluften per timme.
Omblandade ventilation	Luft tillförs rummet i hög hastighet i syfte att blanda om och späda ut föroreningar.
Randvillkor	Bestämda egenskaper för modellens gränssytor.

Termisk drivkraft	Värmens påverkan på luftens egenskaper och rörelse.
Tidssteg	Bestämda tidsintervall i simuleringen.
Tilluft	Luft som tillförs ett rum.
Turbulens	Oregelbundet strömningstillstånd som uppkommer vid störningar.
Vistelsezon	Området där människor befinner sig i ett rum.

1 Inledning

Ventilationen utgör en central roll i byggnader i syfte att upprätthålla ett hälsosamt och behagligt inneklimat. Genom att avlägsna föroreningar samt reglera temperaturer blir byggnaden mer trivsamt för dess brukare. Utvecklingen av ventilationssystem har skett successivt och drivits fram av samhällets tekniska utvecklingar och samhällsutmaningar. För att kunna analysera och utvärdera ventilationssystem är det viktigt att förstå hur luften rör sig i ett rum. Luftrörelser kan ge upphov till obehag och döda zoner. Förståelse och visualisering av luftrörelser utgör därmed en fundamental del för att skapa optimerade luftflöden och ventilationssystem.

1.1 Ventilationens framväxt

Behovet av ventilation har existerat sedan människan började bygga täta konstruktioner. Redan under forntidens Egypten användes enkel ventilation genom självdragsmetodiken (D’Cruz & Hart, 2024). Det utvecklades senare till skorstenar i samband med att eldstäder flyttades innanför klimatskalet.

Under den industriella revolutionen på 1700- och 1800-talet blev konsekvenserna av dålig ventilation uppmärksammade (Luftsson, 2024). Gruv- och industriarbetarna drabbades i stor utsträckning av arbetsrelaterade lungsjukdomar till följd av dålig luftkvalité, vilket ofta resulterade i dödsfall. I takt med att arbetarrörelsen växte fram så ställdes krav på förbättrade arbetsförhållanden. Som en konsekvens av detta började det användas fläktar för att transportera bort den förorenade luften från gruvor och fabriker. Det var under denna period ventilationssystemen alltmer började efterlikna dagens system, som tillämpar mekaniska fläktsystem för att skapa tryckskillnad och således kontrollerade luftflöden (D’Cruz & Hart, 2024).

Urbaniseringen under 1900-talet medförde en högre boendetäthet som resulterade i att ventilation även fick en större betydelse i kontors- och husbyggnader (Elbadri m.fl., 2023). I takt med människans ökande förståelse för luftrörelser och beräkningsförmåga, utvecklades möjligheterna att dimensionera och anpassa ventilationen utifrån utrymmets specifika krav och funktion (Anderson, 1995).

Strömningsläran är viktig för utformningen av ventilationssystem och möjliggör för djupare förståelse för hur tilluften påverkas av hastighet och tryckskillnad, samt hur luften rör sig i rummet. Den grundläggande principen baseras på Navier-Stokes-ekvationen (Navier-Stokes Equation | Glenn Research Center | NASA, u.å.).

Idéer om exempelvis massa, rörelsemängd (impulsbevarelse) och energibevarelse skulle utvecklas till grundläggande principer som skulle utgöra grunden för utvecklingen av CFD.

1.2 Ventilationskrav

Inom ventilationsområdet varierar krav och rekommendationer beroende på byggnadstyp och verksamhet. För hygienflöde angav Boverket tidigare ett minimikrav på 0,10 l/s/m² golvarea för utrymmen utan personbelastning och 0,35 l/s/m² golvarea när lokalerna användes (Boverket, 2024b). I de nya föreskrifterna har kravet ändrats till 0,35 l/s/m² + 4 l/s/person (Boverket, 2024a). Det tidigare regelverket gäller dock fortfarande under övergångsperioden fram till den 30 juni 2026.

För lokaler tillämpar Arbetsmiljöverket ett strängare krav på 7 l/s/person + 0,35 l/s/m² för skolor och kontor (Arbetsmiljöverket, 2025). Folkhälsomyndigheten hänvisar till Boverkets äldre krav som ett allmänt råd, samt ger rekommendationer på ett ytterligare riktvärde på 0,5 omsättningar/timme (Folkhälsomyndigheten, 2014). Eftersom det här är ett råd och inte ett krav är det inte obligatoriskt att följa, men det bör beaktas vid dimensionering. Sammantaget innebär det att hygienflödet i praktiken ofta hamnar omkring 10 l/s/person för kontor och skolor. Det flödet är normalt tillräckligt för att upprätthålla god luftkvalitet.

Utöver hygienflöde används komfortluftflöde vid dimensionering av ventilationssystem, främst för att tillgodose byggnadens kylbehov. Om komfortkyla ska tillgodoses med ventilation krävs i allmänhet betydligt större luftflöden. Komfortflödet beräknas enligt ekvation [1] (Catarina Warfvinge & Mats Dahlblom, 2010). Dimensioneringen av ventilationssystemet baseras därför på det största av hygien- respektive komfortluftflödet.

$$Q = \rho \cdot c_p \cdot V \cdot (T_2 - T_1) \quad [1]$$

Där:

- Q: värmeeffekt, [W]
- ρ : densitet, [kg/m³]
- c_p : specifik värmekapacitet, [J/kg*K]
- V: luftflöde, [m³/s]
- T₁: rumsluftens temperatur, [°C]
- T₂: tilluftens temperatur, [°C]

1.3 Luftrörelser

Luftrörelser har länge varit ett svårbegripligt kunskapsområde, främst på grund av svårigheten att observera dem visuellt (Lindab, 2021). Därför har olika metoder utvecklats för att studera och förstå luftrörelser och dess påverkan. I takt med den tekniska utvecklingen, förändras metoderna i syfte att lättare och mer effektivt beskriva luftens rörelsemönster. Det möjliggör för större förståelse av eventuella död-zoner och drag.

1.3.1 Drivkrafter för luftrörelser

Luftrörelser uppstår till följd av tryckskillnader i luftmassan. Tryckskillnaderna kan skapas både av naturliga och mekaniska drivkrafter. Naturliga drivkrafter utgörs främst av vindtryck och termisk drivkraft (Stocks & Lundquist, 2025). Den termiska drivkraften, även kallad skorstenseffekt, uppkommer genom temperaturskillnader mellan inne- och uteluft. Detta ger upphov till densitetsskillnader och därmed luftflöden i byggnaden. Principen utnyttjas vid självdragsventilation, där luftflöden uppkommer utan fläktar och i stället drivs av termiska krafter och vindpåverkan (Faraguna, 2012).

Mekaniska tryckskillnader uppkommer exempelvis genom användning av fläktar som skapar kontrollerade luftflöden genom byggnaden. I moderna ventilationssystem är mekaniska drivkrafter vanligtvis dominerande, men även naturliga drivkrafter kan påverka byggnadens tryckförhållanden och luftflöden.

1.3.2 Visualisering av luftrörelser

För att optimera och dimensionera olika tekniska lösningar korrekt så behöver människan förstå hur luften beter sig under olika förhållanden.

Rökvisualisering har länge använts för att studera luftens rörelsemönster. Ett av de tidigaste dokumenterade experimenten utfördes av vetenskapsmannen Leonardo Da Vinci, som mot slutet på 1400-talet studerade rökens rörelsemönster kring fasta objekt (Macagno, 1991).

I tidigare studier har rök använts för att visualisera lufttillförsel ifrån ett ventilationsdon med riktad luftstråle (Karimipannah & Awbi, 2002). Genom att följa rökens rörelse kan luftens inträngning och agerande med rummets luft tydligt studeras. Rök kan användas för att simulera ren luft som i den tidigare nämnda studien, men även för att illustrera spridning och bortförsl av förorenad luft.

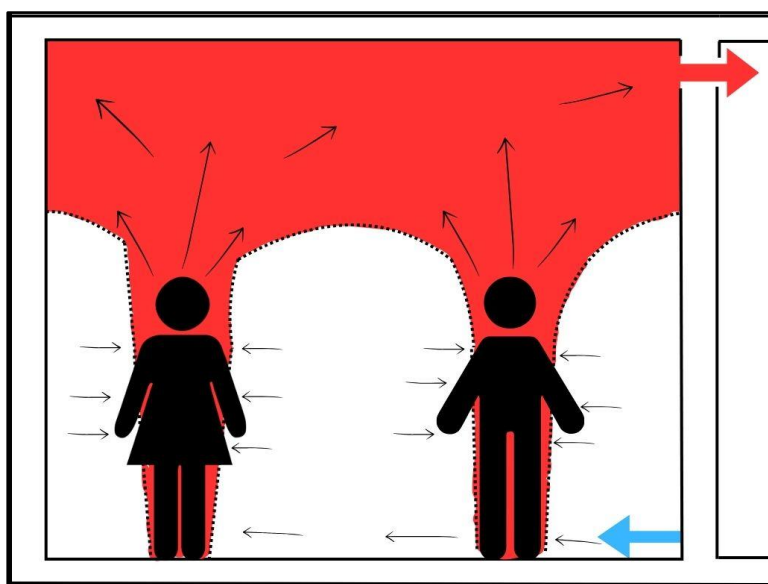
I takt med utvecklingen av simuleringsverktyg, exempelvis CFD (Computational Fluid Dynamics), har det blivit möjligt att studera luftrörelser med hjälp av datorprogram.

1.4 Luftföringsprinciper

För att tillgodose god luftkvalitet och termisk komfort kan ventilationen utformas enligt olika principer för tillförsel och bortförsel av luft. Valet av ventilationsprincip påverkar luftfördelning, förorenings-spridning och draguppkomst. Två vanligt förekommande luftföringsprinciper i Sverige är deplacerande ventilation och omblandad ventilation, vilket beskrivs i följande avsnitt.

1.4.1 Deplacerande ventilation

Deplacerande ventilation (DV) är ett ventilationssystem särskilt lämpat för ett rum med stillasittande människor, exempelvis i en kontorsmiljö. DV fungerar genom att undertempererad tilluft sprids längs golvet i relativt låg hastighet (Catarina Warfvinge & Mats Dahlblom, 2010). När tilluften värms upp av rummets värmekällor, exempelvis människor och utrustning, stiger den på grund av densitetsskillnader. Den uppvärmda, förorenade luften transporteras därmed upp mot taket där den avlägsnas av frånluftsdon. I figur 1 visas en enkel bild av hela processen.

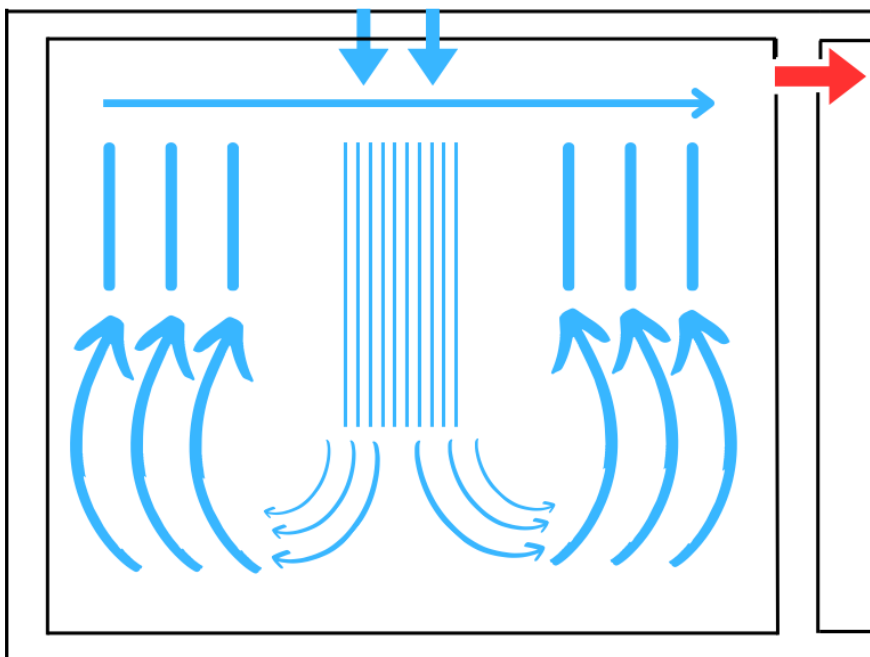


Figur 1. Illustration av luftrörelserna vid deplacerande ventilation.

En stor anledning att DV anses fördelaktigt är att den utnyttjar luftens densitetsskillnader för att separera den förorenade, varma luften från den rena, svalare luften. I ett idealt fall befinner sig den förorenade luften ovanför människornas vistelsezon utan någon omblandning med den rena luften. En potentiell nackdel med DV är risken för drag i vistelsezonerna om tilluften tillförs med för hög hastighet. För att minimera risken av obehag är det viktigt att kontrollera både tilluftsdonens placering och lufthastighet.

1.4.2 Omblandande ventilation

Vid omblandande ventilation tillförs tilluften vanligtvis i takhöjd med hög hastighet och blandas med den befintliga luften. Genom utspädningsprincipen reduceras koncentrationen av partiklar och andra föroreningar i rummet (Catarina Warfvinge & Mats Dahlblom, 2010). Frånluftsdon placeras i taket eftersom luftföroreningar och varm luft transporteras uppåt genom termisk uppdrift. Till skillnad från DV syftar omblandade ventilation till att skapa en jämnare fördelning av temperatur och föroreningshalter, vilket schematiskt illustreras i figur 2. Omblandande ventilation drivs delvis av Coandå-effekten som får luften att röra sig längs väggar, tak och andra ytor i rummet för att spridas och blanda om luften.



Figur 2. Illustrerar luftrörelserna vid omblandande ventilation.

En fördel med omblandande ventilation är att systemet är robust och inte påverkas av mänsklig rörelse. En nackdel är att föroreningarna blandas ut i hela rummet och inte hålls separerade som vid DV.

1.5 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Den första storskaliga tillämpningen av CFD var av meteorologen Lewis Fry Richardson som beskrev vädret med hjälp av Navier-Stokes-sambandet. Fry Richardson försökte att manuellt beräkna hur väderförhållanden skulle bli, en process som krävde enormt mycket tid för att uppnå ett väldigt litet resultat. Fry Richardson försök misslyckades delvis på grund av bristande beräkningsförmåga och numerisk instabilitet i ekvationerna. Trots misslyckandets lades grunden för mycket väsentliga idéer som exempelvis numerisk diskretisering, rutnät (grid-based methods) samt tidsstegning.

När beräkningsförmågan ökade så utvecklades datorprogram gradvis till vad som kallas CFD. Datorprogrammen använde beräkningskraften av datorer för att simulera strömningsförhållanden. CFD började vid 1990-talet användas storskaligt som ingenjörsmetodik, då datorer blev drastiskt mer tillgängliga för företag. Det utvecklades i grund för flygindustrin men har under 2000 talet fått en större användning inom andra ingenjörsmetodiker. CFD kan användas för att dimensionera ventilationssystem och analysera temperaturfördelning, energiförbrukning samt lufthastighet utan behov av fysiska prototyper, vilket bidrar till en mer kostnads- och tidseffektiv utvecklingsprocess.

1.5.1 Grundläggande principer för CFD

För att kunna använda CFD krävs en förståelse av de fysikaliska sambanden som ligger till grund för de beräkningar och begynnelsevillkor som simuleringen kräver. Relevanta, fysikaliska samband förklaras i avsnitten nedan.

Energiprincipen

Energiprincipen utgör termodynamikens första huvudsats och anses vara den mest grundläggande principen i fysiken. Den förklarar att energi inte kan skapas eller förstöras, bara transformeras.

Massbevarselagen

Massbevarselagen är den grundläggande fysikaliska lagen om att massa inte kan skapas eller förstöras utan bara ändras i form eller plats, se ekvation [2]. Sambandet formulerades 1756 av den ryska vetenskapsmannen Lomonosov Mikhail Vasilievich. Massbevarselagen är en central del av Eulers samband.

$$\partial\rho/\partial t + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}) = 0 \quad [2]$$

Där:

- $\partial\rho/\partial t$: förändringen av den lokala densiteten med avseende på tid
- $\nabla \cdot (\rho\mathbf{u})$: nettoutflödet av en massa för en (liten) volym, $[\text{kg}/\text{m}^3\text{s}]$

Euler

Vetenskapsmannen Leonard Euler beskriver år 1755 fluidrörelser med hjälp av differentialekvationer, med begränsningen att den bara är tillämpbar hos friktionslösa fluider, se ekvation [3]. Eulers ekvationer utgör grunden för senare utveckling av Navier-Stokes-ekvationerna, där viskösa effekter (friktion) inkluderas (*Euler Equations*, u.å.).

$$\rho \cdot (\partial u / \partial t + u \cdot \nabla u) = -\nabla p + \rho f \quad [3]$$

Där:

- $\partial u / \partial t$: hur hastigheten ändras vid en specifik punkt till följd av tid
- $u \cdot \nabla u$: hur hastigheten ändras på grund av rörelser, exempelvis vid volymändringar
- $-\nabla p$: tryckskillnaden som driver luftrörelserna
- ρf : densitet multiplicerat med kraft, kraft per volymenhet

Navier-Stokes

Människans nutida förståelse för strömningsläran och fluidrörelser baseras till stor del på Navier-Stokes-ekvationerna som härledes av den franska ingenjören Claude-Louis Navier, år 1822. Till skillnad från Eulers samband så har en term för friktionsförluster uppkommit, se ekvation [4]:

$$\rho (\partial u / \partial t + u \cdot \nabla u) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho f \quad [4]$$

Där:

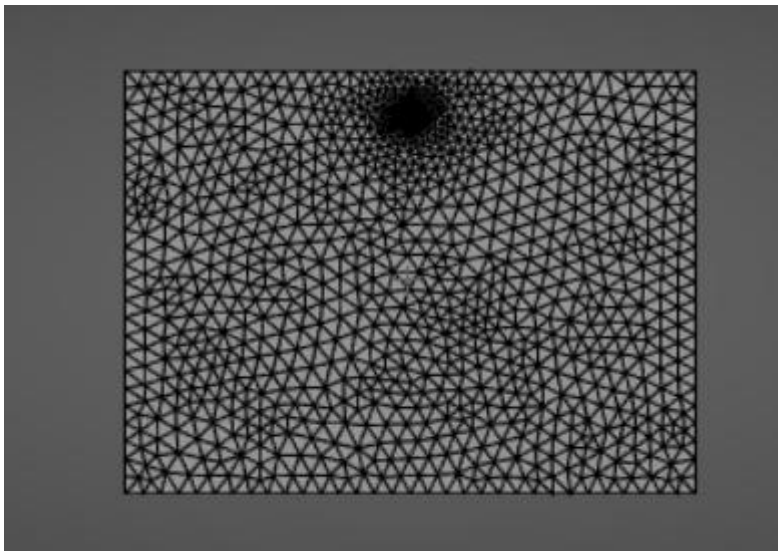
- $\mu \nabla^2 u$: beskriver förluster i form av friktion
- μ : dynamisk viskositet
- $\nabla^2 u$: beskriver skillnaden i hastighet mellan olika lager av fluiden

1.6 Principer för hur CFD fungerar

CFD bygger på principerna av massa, energi och rörelsemängdsbevarelse och tillämpningen av dessa principer i Navier-Stokes utgör kärnan av beräkningarna (Anderson, 1995).

CFD kräver CAD-modellering och framtagning av flertalet parametrar för att få ett resultat som reflekterar verkligheten. Det tillämpningsområde där CFD oftast används är vid simulering av luftflöden. Det används främst under projekterings- och planeringsfasen där olika lösningar kan testa och simuleras innan de konstrueras. Ett exempel presenteras i följande rapport (Liu m.fl., 2025), där två olika lösningar på arkitektonisk utformning och ventilationssystem i bostadshus analyserades med hjälp av CFD. I detta projekt testas ett annat appliceringsområde som är mer riktat mot underhållnings- och förvaltningsfasen.

CFD-programvaror använder finita volymmetoden (FVM) som delar upp beräkningsdomänen i ett flertal mindre kontrollvolymmer. Uppdelningen visas i figur 3 nedan. Syftet att använda FVM är att säkerställa att bevarandelagar för massa, rörelsemängd och energi är uppfyllda (Stenmark, u.å.). Dessa kontrollvolymmer bildar tillsammans ett beräkningsnät. Storleken på kontrollvolymerna påverkar hur exakt lösningen är, där mindre volymer kräver fler beräkningar men ger ett mer noggrant resultat (Anderson, 1995).



Figur 3. Ett beräkningsnät (Mesh) med beräkningsnäts-storleken 0,1 cm³.

Med förutsatta randvillkor så beräknas flödet med hjälp av Navier Stokes-ekvationen som integreras över volymen. Resultatet av alla beräkningar för samtliga kontrollvolymmer resulterar i en helhetsbild. Resultatets noggrannhet beror primärt på hur stora kontrollvolymerna är och hur många iterationer som datorprogrammet gör i varje tidssteg (Stenmark, u.å.).

1.6.1 Programvaror för CFD

Det finns flera aktörer inom CFD som erbjuder programvaror för simulering och analys av luft rörelser. Beräkningarna baseras på samma grundläggande fysik men har olika specialiseringar. Vissa program är anpassade för byggnadsventilation medan andra är för aerodynamik.

I detta arbete valdes Ansys Fluent eftersom programmet är tillgängligt för studenter vid Chalmers Tekniska Högskola. Ytterligare en anledning är att programmet möjliggör detaljerade analyser av luftens rörelser, exempelvis hur luftflöden påverkas av rummets geometri och interna värmekällor. Ansys Fluent erbjuder även avancerade visualiserings- och animeringsfunktioner, vilket underlättar analys och presentation av resultaten. Detta kan vara särskilt fördelaktigt för människor som saknar erfarenhet inom installationsteknik och ventilation.

2 Syfte och mål

Projektets syfte är att utvärdera två metoder för visualisering av luftrörelser med målet att jämföra och bedöma metodernas lämplighet utifrån kostnad, användarvänlighet och resultatens noggrannhet.

2.1 Rökvisualisering

Rökvisualisering är en metod för att studera ventilationens funktionalitet i en lokal och rapportens syfte är att utforska metoden genom experiment i en kontrollerad laboratoriemiljö.

2.2 CFD

Syftet med CFD-analysen är att undersöka möjligheterna för att producera en modell som kan skapa ett användbart resultat. Denna process ska jämföras med fysisk rökvisualisering för att bedöma om CFD är ett tillförlitligt alternativ för visualisering av luftflöden.

2.3 Mål

Målet med rapporten är att studera de olika metodernas likheter och skillnader och se hur väl de överensstämmer med varandra. Rapporten ska möjliggöra förståelse av metoderna och deras tillämpning i praktiken. Arbetet avser att presentera resultaten från CFD- och rökvisualisering och genomföra en jämförelse av metoderna som kan ligga till grund för bedömningar av metodernas relevans.

3 Utförande

Studien genomfördes genom att utföra experiment med rökvisualisering och CFD-simuleringar.

3.1 Rökvisualisering i labbmiljö

I det här arbete utfördes de fysiska experimenten av rökvisualisering i labbmiljö under relativt kontrollerade förhållanden. Försöken genomfördes i laborationsrum på Avdelningen för installationsteknik vid Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnad, Chalmers. Labbrummen anpassades för att efterlikna ett rum med deplacerande ventilation. Rök tillsattes i rummet och eftersom dess väggar var i glas, kunde rökens rörelser enkelt studeras utifrån.

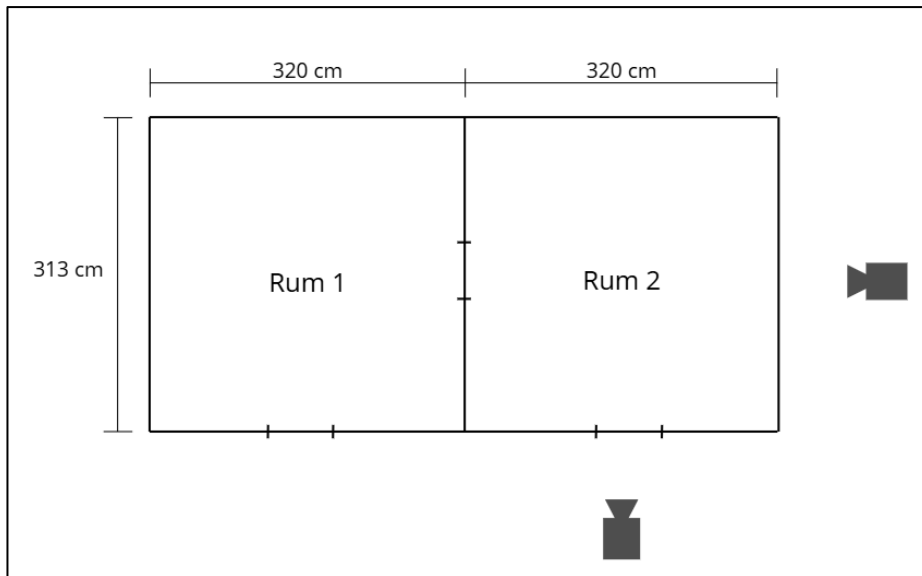
Röken kan antingen representera ren tilluft som ska nå ut i rummet eller förorenad rumsluft som ska ventileras ut – beroende på var den tillsätts. Därför utfördes två parallella experiment där båda fallen kunde testas. I det första experimentet tillsattes röken via tilluftskanalerna och symboliserade den nya, rena luften som når ut i rummet. I det andra testet tillsattes röken via en mannekäng (en värmekälla som ska representera en människa) och motsvarade den förorenade utandningsluften.

Parametrar för luftflöde, rumstemperaturer samt värmeeffekt justerades för att se hur luftströrelserna påverkades. Dokumentation i form av filmer och bilder samlades in för att senare kunna jämföras och utvärderas.

3.1.1 Förberedelse av laborationsrummen

Laborationsrummen som användes var utformade enligt följande:

Två rum med samma dimensioner är placerade intill varandra och är sammankopplade med en gemensam dörr, se figur 4 och 5. Rummen har väggar av glas vilket gör det möjligt att dokumentera experimenten utifrån. I taket av respektive rum finns ett tilluftsdon som är anslutet via kanaler till ventilationsaggregat med både uppvärmnings- och nedkylningsförmåga. Det gör det möjligt att välja temperatur och flöde på tilluften i respektive rum. Frånluftsdonen är även de placerade i taket.



Figur 4. Skiss av laborationsrummens utformning.



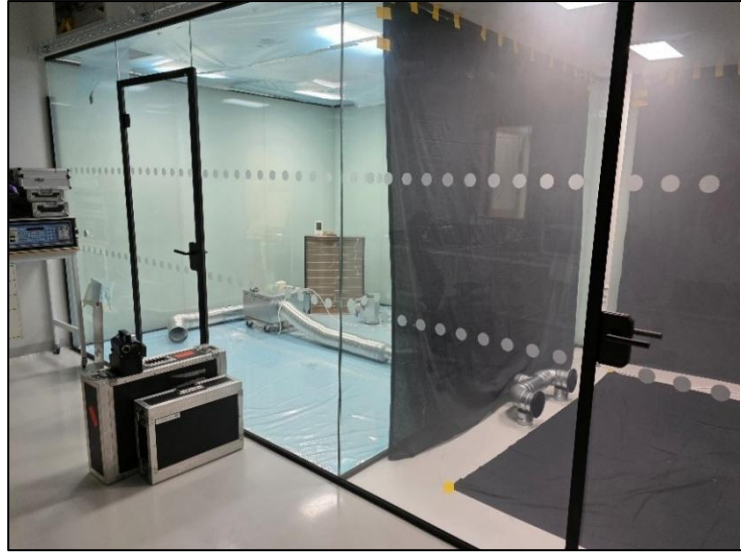
Figur 5. Laborationsrummet innan förberedelser.

Eftersom tilluftsdonen är placerade i taket gick det inte att efterlikna deplacerande ventilation med rummets ursprungliga utformning. Det var alltså nödvändigt att genomföra några modifikationer på labbrummen innan experimenten kunde påbörjas.

Dörren mellan rummen ersattes av en spånskiva som höll utrymmena separerade, se figur 6. En öppning för en ventilationskanal sågades ut i botten av skivan vilket gjorde det möjligt att föra över luft från det ena rummet till det andra. Tanken med det var att luften i det första rummet skulle kunna kylas ned eller värmas upp och sedan skickas ut i det andra rummet, se figur 7.



Figur 6. Spånskivan som fästes i dörröppningen.



Figur 7. Färdigställda laborationsrum inför experimenten.

För att reglera luftflödet mellan rummen användes en fläkt och ett injusteringspjäll, se figur 10 och 16. De var placerade i det första rummet och anslutna till kanalen i spånskivan. Två deplacerande tilluftsdon kopplades på kanalen i det andra rummet, se figur 8. Efter det var systemet färdigt - och i rum 2 var det nu möjligt att tillsätta kall tilluft vid golvnivå samtidigt som frånluften satt i taket, vilket motsvarar deplacerande ventilation.

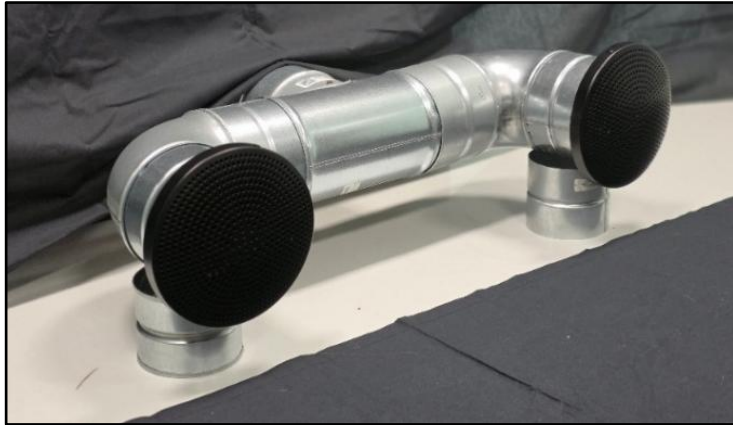
Röken som användes var mycket ljus och för att bättre fånga den på film sattes svarta skycken upp i laborationsrummet.

3.1.2 Utrustning

Till rökförsöken har följande utrustning använts:

Deplacerande tilluftsdon:

Tilluftsdon (SWEGON, modell DPGa 2-125) som är utformade för att sprida ut luften i donens riktning, se figur 8 nedan. I experimenten som genomförts skickas tilluften ut längs golvet.



Figur 8. Deplacerande tilluftsdon.

Digitala termometrar:

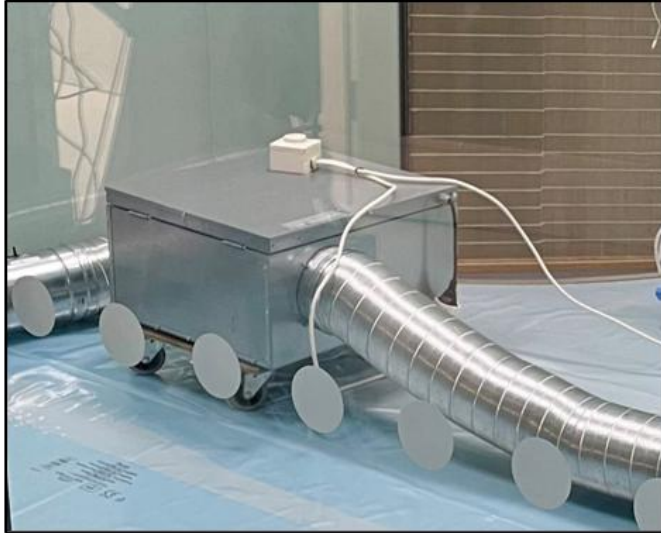
Användes för att bestämma temperaturen på luften i respektive rum, se figur 9 nedan. Användes också för att bestämma temperaturen på tilluften som tillsattes genom de deplacerande donen. Termometern har en mätosäkerhet på 1°C.



Figur 9. Digitala termometrar.

Fläkt:

Användes för att trycka luft genom kanalsystemet från rummet där luften kyldes till rummet där experimenten utfördes, se figur 10 nedan. Fläkten är placerad inuti en metallåda och dess varvtal regleras med ett vridreglage.



Figur 10. Fläkt.

Luftbehandlingsaggregat:

Användes för att ställa in temperaturen på luften i det första rummet. I det andra rummet där experimenten utfördes var det avstängt, se figur 11 nedan.



Figur 11. Luftaggregat som förser laborationsrummen med tilluft.

Rumsluftrenare:

Användes för att rena luften från rök mellan varje utfört experiment, se figur 12 nedan. Luftrenarens kapacitet (Clean Air Delivery Rate) är 1100 m³/h vilket innebär i att rummen kunde renas på ungefär fem minuter.



Figur 12. Rumsluftrenare.

Mannekäng (värmekälla):

Ett spirorör (d-400mm, h-1110mm) med en alstrad värmeeffekt som ska motsvara en eller flera människor, se figur 13. Värmen kommer från glödlampor med effekten 75W som kan fästas inuti tunnan, se figur 14. Användes för att simulera effekten av människor i rummet.



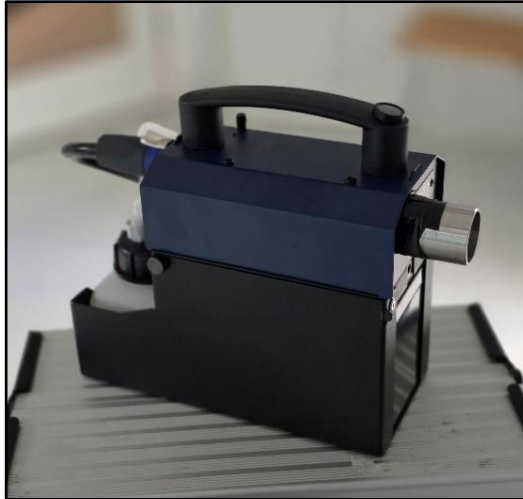
Figur 13. Mannekäng (värmekälla).



Figur 14. Insida av mannekäng (värmekälla).

Rökmaskin:

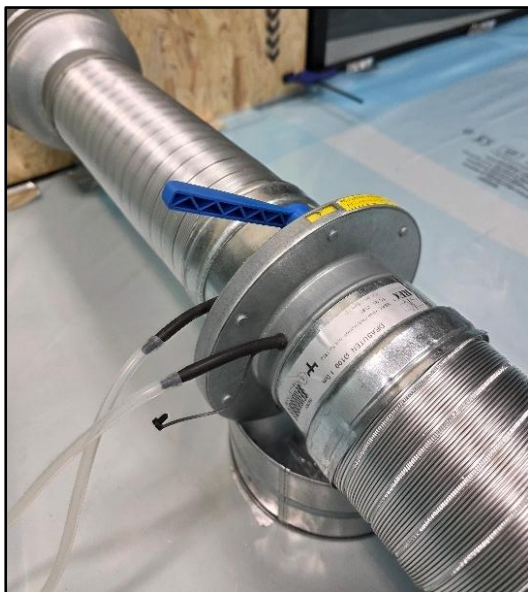
En handhållen, batteridrivna maskin (Look Solutions, modellen POWER-TINY) som skapar en synlig dimma genom att hetta upp en alkoholbaserad vätska, se figur 15 nedan. Dimman (röken) stannar i luften en längre tid och baserat på försök i labbet verkar den inte ha en påverkan på lufttemperaturen. Det är möjligt att tillsätta röken direkt i testrummet eller via en slang in i kanalsystemet.



Figur 15. Rökmaskin.

Injusteringsspjäll:

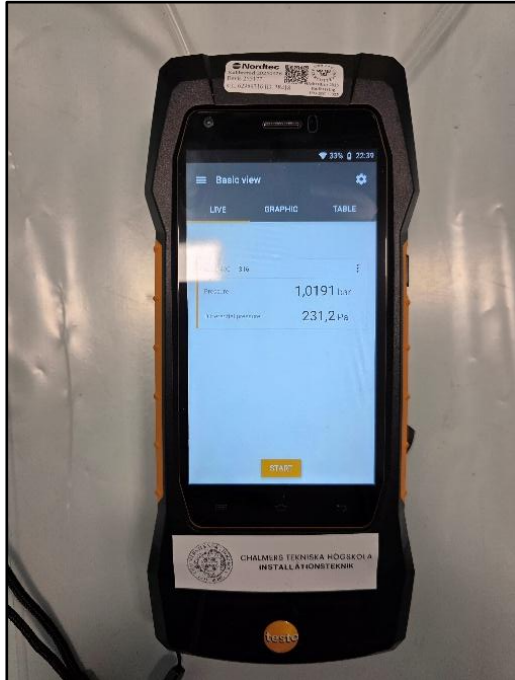
Användes för att justera luftflödet i ventilationskanalen genom att skapa ett motstånd för luftströmmen, se figur 16 nedan. Beräkning av luftflöde möjliggjordes genom att mäta tryckdifferensen över spjället och använda ekvation [5].



Figur 16. Injusteringsspjäll.

Differenstryckmätare:

Användes tillsammans med injusteringspjället för att mäta luftflödet i kanalen mellan rummen, se figur 17 nedan. Differenstryckmätaren har en felmarginal på $\pm 1,3$ Pa, vilket är så litet att det inte påverkar resultatet.



Figur 17. Differenstryckmätare.

Ventilationskanal:

Kopplade samman fläkten med tilluftsdonen för att leda in luften i försöksrummet, se figur 18 nedan.



Figur 18. Ventilationskanal.

Värmekamera:

Användes för att bestämma yttemperaturen på mannekängen vilket krävdes för CFD-modelleringen, se figur 19 och 20. Mätvärdena från värmekameran har en felmarginal på +/- 2°C. De uppmätta värdena för de tre olika effekterna var: 33°C vid 75W, 37°C vid 150W och 39°C vid 225W.



Figur 19: Värmekamera.



Figur 20: Värmekamera vid mätning.

3.1.3 Inställning av parametrar

För att undersöka hur olika parametrar påverkar luftströmmarna i rummet, delades experimenten upp i olika fall. Totalt nio fall testades och genom att justera en parameter åt gången kunde de olika fallen sedan jämföras med varandra. De parametrar som varierades var tilluftsflödet, den interna värmeeffekten från mannekängen samt temperaturdifferensen mellan mottagarrummets tilluft och rumsluft, se tabell 1.

Tabell 1. Illustrerar de fall som studerades med rökvisualisering.

Kall tilluft (1-2°C temperaturskillnad)				
		Värmeeffekt:		
		75 W	150 W	225 W
Tilluftsflöde:	10 l/s	Lågt flöde, en lampa	Lågt flöde, två lampor	Lågt flöde, tre lampor
	15 l/s	Medelflöde, en lampa	Medelflöde, två lampor	Medelflöde, tre lampor
Rumstempererad tilluft (0°C temperaturskillnad)				
		Värmeeffekt:		
		75 W	150 W	225 W
Tilluftsflöde:	15 l/s	Medelflöde, en lampa	Medelflöde, två lampor	Medelflöde, tre lampor

Tilluftsflödet styrdes både genom att ändra varvtalet på fläkten samt att öppna eller strypa luftkanalen med hjälp av injusteringspjället. För att mäta och finjustera flödet till det önskade värdet, användes den ovan beskrivna differenstryckmätaren. Tryckmätaren anslöts till injusteringspjället och mätte tryckdifferensen i luften innan och efter den passerat spjället. Luftflödet beräknades därefter enligt ekvation [5].

$$q_v = k \cdot \sqrt{\Delta P_m} \quad [5]$$

Där:

- q_v : luftflöde, [l/s]
- k : faktor som varierar beroende på hur injusteringspjället ställs in, [enhetlös]
- ΔP_m : tryckdifferens, [Pa]

Värmeeffekten reglerades genom att ändra antalet glödlampor i mannekängen. Som framgår av Tabell 1 fanns det tre glödlampor tillgängliga och varje glödlampa hade en effekt på 75W. På så sätt kunde värmeeffekterna varieras mellan 75W, 150W samt 225W - vilket motsvarar en, två och tre stillasittande personer (ASHRAE, 2013).

Temperaturerna i de två laborationsrummen reglerades med luftbehandlingsaggregaten. Där valdes en önskad temperatur för varje rum. Eftersom det tog lång tid för aggregaten att ställa om mellan olika temperaturer, var det nödvändigt att ha dem i gång över natten mellan experimenten för att temperaturerna i rummen skulle stabiliseras.

I experimenten testades två olika temperaturdifferenser. För försöken med kall tilluft var temperaturskillnaden 1–2 °C mellan tilluft och mottagarummets luft, medan det inte var någon temperaturdifferens i det andra fallet.

3.1.4 Dokumentation

Varje försök av rökvisualisering som genomfördes dokumenterades genom att filma händelseförloppen i experimenten. För att filma användes kamerorna på två mobiltelefoner. Kamerorna placerades utanför glasrummet (se figur 4) där experimenten genomfördes och filmade från två olika vinklar: parallellt och vinkelrätt tilluftens flödesriktning. Varje film blev två till tre minuter lång, då experimenten avslutades när röken stagnerat eller blivit helt omblandad i rummet.

3.1.5 Genomförande experiment 1 (rök tillsätts via tilluften)

I den första rökvisualiseringen som genomfördes tillsattes röken via tilluften. Röken symboliserade på så sätt den nya, rena luften som tillförs rummet. Genom att följa rökens väg är det möjligt att upptäcka vilka delar av rummet som ventileras först – och vilka delar av rummet det tar längre tid för den att nå.

Rökmaskinen placerades vid inloppet till ventilationskanalen i det första, förberedande rummet. Röken tillsattes direkt in i kanalen under fem sekunder och flödade sedan vidare ut i det andra rummet, där dess rörelser och strömningsvägar studerades. Efter färdigt experiment renades luften från rök med hjälp av rumsluftrenaren.

3.1.6 Genomförande experiment 2 (rök tillsätts via mannekängen)

I den andra rökvisualiseringen tillsattes röken till rummet via mannekängen. Röken symboliserade då förorenad utandningsluft från människor som vistas i rummet. Genom att följa rökens rörelser går det att bedöma hur väl ventilationen är utformad – förbrukad luft bör ventileras bort och inte stanna kvar i människornas vistelsezon.

Rökmaskinen placerades på golvet och rök tillsattes in i mannekängen underifrån, via ett krökt rör. Locket på mannekängens ovansida som i det tidigare experimentet varit stängt, öppnades - så att röken kunde strömma ut med ett jämt flöde. Därefter kunde rökens rörelser följas och dokumenteras utifrån.

Eftersom röken tillsattes direkt i rummet där experimenten ägde rum, behövde personen som ansvarade för rökmaskinen vara närvarande i utrymmet under experimentets gång. Det kan påverka resultatet då en människas rörelser samt den sensibla värmeavgivningen på 75W kan ha stor påverkan på luftrörelserna i ett rum – så en viss försiktighet krävdes under experimentets genomförande för att undvika omblandning av luften. Efter färdigt experiment renades luften från rök med hjälp av rumsluftrenaren.

3.2 Visualisering med CFD-program

Utöver de fysiska experimenten utfördes det parallellt CFD-simuleringar för att jämföra de olika metoderna. Det gjordes genom att efterlikna försöket med hjälp av uppmätta begynnelsevillkor från rökförsök och återskapa samma försök med hjälp av CFD.

3.2.1 Val av programvara

Programvaran väljs utifrån olika parametrar beroende på syfte och tillgänglighet. För det här arbete valdes Ansys Fluent.

3.2.2 Förstudie

För att skapa en korrekt modell krävs en förstudie där ett flertal parametrar behöver tas fram. Det inkluderar dimensioner på rummet som ska studeras, mått på tilluft- och frånluftsdon samt storlek på mannekängen och andra element som påverkar luftens rörelse i rummet. Detta steg kräver även att en förståelse för tilluftsdonets prestanda erhålls för att kunna återskapa ett passande don för simulering. Inför simulering så rekommenderas det att använda Youtube för att införskaffa den information och kunskap som krävs till simuleringen.

3.2.3 Geometri

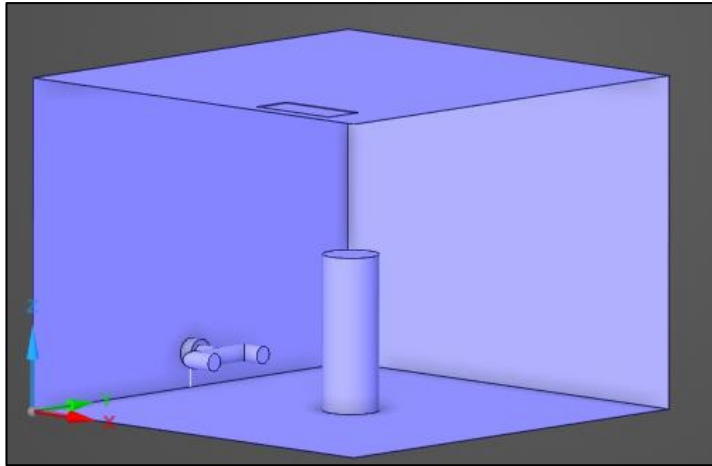
Det första steget i Ansys Fluent är Geometri och innebär att en tredimensionell CAD-modell skapas för att representera det rum där simuleringen utförs. Geometrin kan antingen modelleras direkt i Ansys eller importeras från externa CAD-program, exempelvis SolidWorks. I det här arbetet skapades CAD-modellerna direkt i Ansys med hjälp av verktyget Discovery, vilket lämpar sig väl för enklare modeller.

Ansys innehåller även andra CAD-verktyg, såsom SpaceClaim och DesignModeler, vilket erbjuder olika grafiska och tekniska funktioner men i grunden fyller samma syfte som traditionella CAD-program.

Discovery valdes främst på grund av programmets användarvänlighet samt möjligheten att arbeta helt inom Ansys-miljön utan behov av filöverföringar och hänsyn till olika filformat. Vid större projekt med högre krav på detaljnivån kan det dock vara fördelaktigt att använda mer avancerade CAD-program, exempelvis SolidWorks eller Ansys DesignModeler.

I projektet skapades en tredimensionell modell av ett rum vars dimensioner baserades på laboratorierummet där rökförsöken genomfördes. Rummet modellerades med dimensionerna 3,2 x 2,37 x 3,13 m (L x H x B). Tilluftsdonen modellerades med en diameter på 16 cm, mannekängen med en diameter på 40 cm och en höjd på 111 cm samt frånluftsdonet med dimensionerna 30 x 70 cm. Rummets utformning visas i figur 21.

De små hålen i tilluftsdonen modellerades inte i geometrin. I stället justerades lufthastigheten så att luftflödet överensstämde med resultaten från rökförsöken och därmed gav så likvärdiga förhållanden som möjligt.

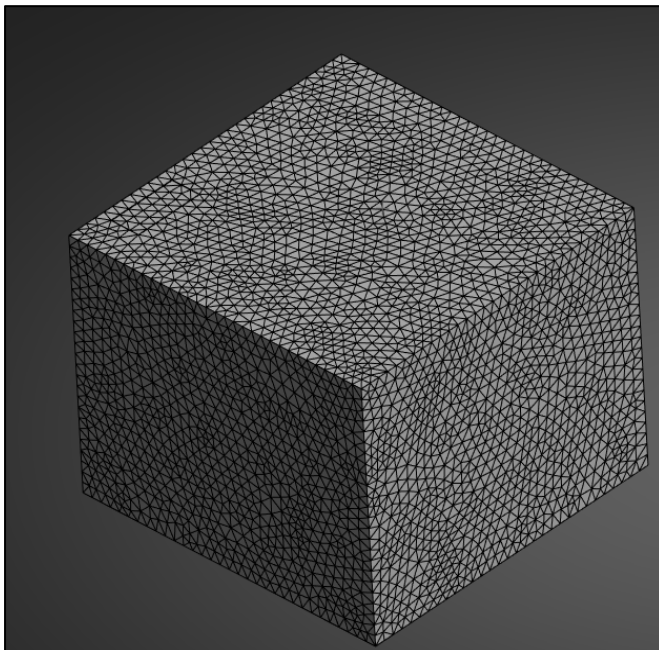


Figur 21. CFD-simuleringens geometri, skapad i Ansys Discovery.

Under arbetet identifierades flertalet krav som är viktiga för att skapa en geometri som möjliggör en välfungerande simulering. För att modellen ska fungera krävs det att geometrin endast består av begränsande ytor utan fysisk tjocklek. Om väggarna behöver en tjocklek för att modellen ska motsvara verkliga förhållanden kan detta anges i materialdefinitionen.

3.2.4 Beräkningsnät

Det andra steget i Ansys Fluent är att utforma beräkningsnätet (Mesh), vilket används för att dela upp den konstruerade geometrin i flertalet kontrollvolymmer. Den uppdelade kontrollvolymen visas tydligt i figur 22.



Figur 22. Ett beräkningsnät (Mesh) med beräkningsnäts-storleken $0,1 \text{ cm}^3$.

Upplösningen av beräkningsnätet bestäms av användaren, där mindre kontrollvolym ger ökad noggrannhet men samtidigt kräver mer beräkningsresurser. De datorer som användes hade begränsad kapacitet, vilket ledde till att ett beräkningsnät med delvolymstorlek på $0,1 \text{ cm}^3$ valdes. Vid områden med komplex geometri minskas elementstorleken ytterligare för att bibehålla noggrannheten. Valet av $0,1 \text{ cm}^3$ gjordes i syfte att begränsa simuleringstiden till cirka två timmar.

I beräkningsnätet namnges även de detaljer som är relevanta för experimentet, vilket görs för att säkerställa korrekta klassificeringar i Ansys. Klassificeringar omfattar följande detaljer:

Tilluftsdon

Tilluftsdonet benämns som "inlet" i syfte att klassificera det korrekt. Detta möjliggör tilldelning av egenskaper till ytan som är relevanta för ett tilluftsdon, exempelvis lufthastighet och temperatur på luften.

Frånluftsdon

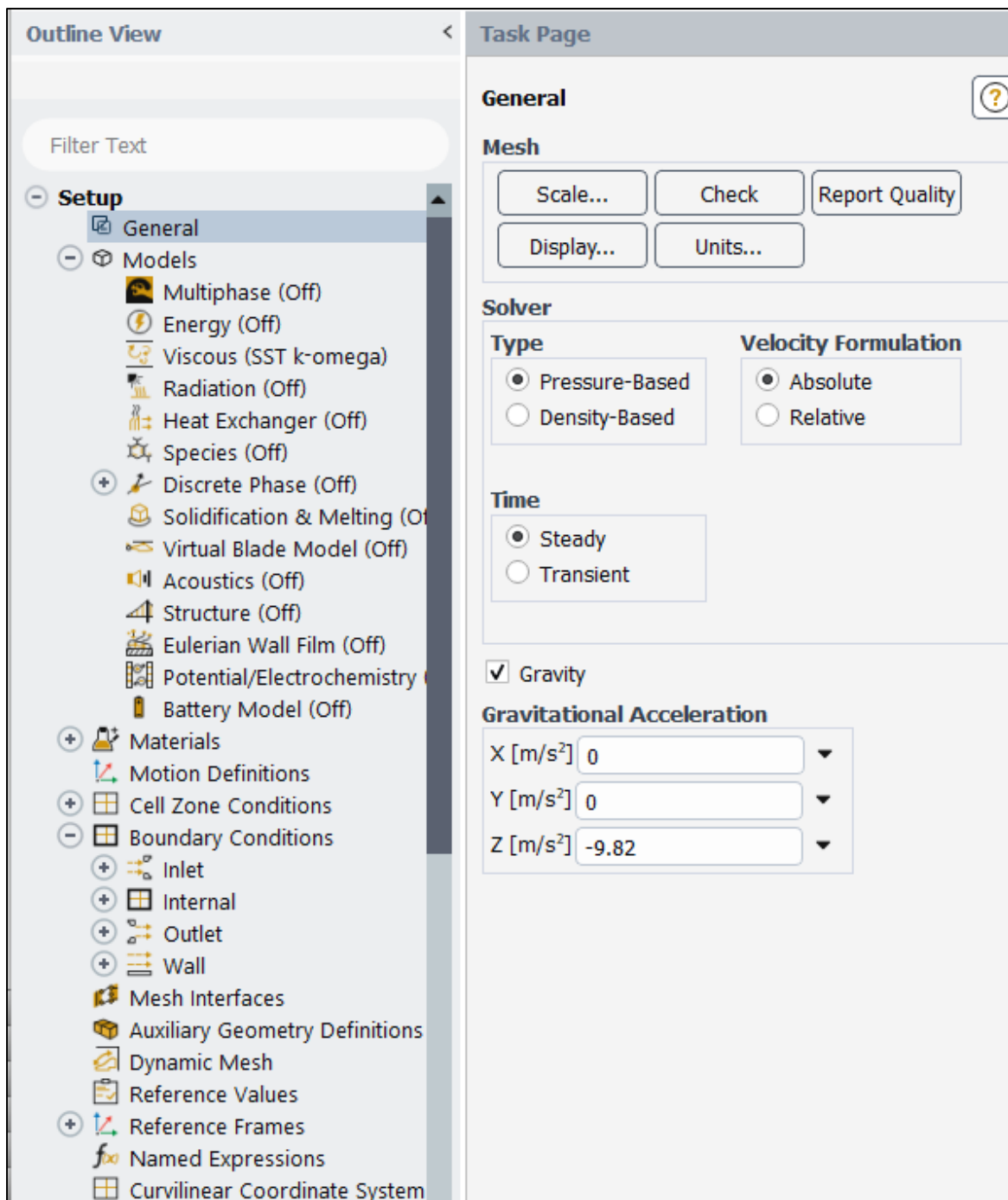
Frånluftsdonet benämns som "outlet" för att klassificera det korrekt. Detta möjliggör tilldelning av egenskaper till ytan som är relevanta för ett frånluftsdon, exempelvis om det är tryckskillnad över frånluftsdonet som leder ut luften.

Värmekälla

Mannekängen eller värmekällan benämns "Wall_Heat". Att modellera värmekällan som en vägg resulterar i att programmet klassificerar värmekällan som en separat vägg, som kan få egna egenskaper som skiljer sig från övriga väggar. Dessa egenskaper ställs in i nästa skede, "Setup". Värmekällan kan modelleras som energiöverförande och kan ställas in som W/m^2 , alternativt som en volym med en temperatur.

3.2.5 Setup

Det tredje steget i Ansys Fluent är Setup. I det steget bestäms förhållandena för modellen innan simuleringen körs och det innehåller ett flertal olika parametrar som kan justeras för att skapa rätt förutsättningar. Setup är uppdelat i General, Models, Materials, Cell Zone Conditions, Boundary Conditions och Reference Frames, se figur 23.



Figur 23. Inställningsmeny för begynnelsevillkor och fysikaliska modeller, benämns "Setup".

De inställningar som använts i detta arbete och bedöms vara mest relevanta för projektet är: General, Models och Boundary Conditions.

General

I General bestäms det om simuleringen ska vara tidsberoende eller stationär. Här aktiveras även gravitationsaccelerationen, vilket gör det möjligt att inkludera naturlig konvektion i modellen.

Models

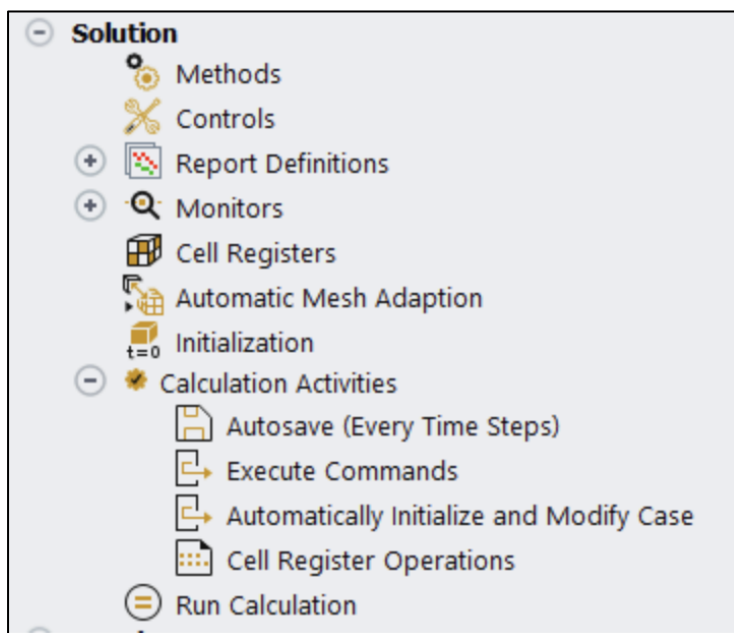
I Models specificeras vilka fysikaliska modeller som beaktas i simuleringen, såsom energi, luftflöden och värmetransport. I beräkningarna i rapporten har modellerna Energy, Viscous och Radiation använts. Dessa gör att simuleringen tar hänsyn till energibalans, viskösa effekter i luftflödet samt strålningsvärme.

Boundary Conditions

I Boundary Conditions definieras randvillkor för modellens olika ytor. Här anges bland annat tilluftens hastighet vid Inlet, frånluftens tryck- eller hastighetsvillkor vid Outlet samt värmeavgivningen från mannekängen vid Wall.

3.2.6 Lösning

När begynnelsevillkor har definierats i setup bestäms parametrarna för lösningen. Detta innefattar två huvudsakliga inställningar: "Initialization" och "Run Calculation", se figur 24.



Figur 24. Inställningsmeny för lösningsalternativ och beräkning av simulering.

För att kunna visualisera luftrörelser under specifika tidssteg, så bör "Autosave" vara inställd på "Every Time Step". Syfte att spara alla tidssteg för att sedan välja vilket som analyseras.

Initialization

Här bestäms alternativen för startvillkoren och ansätts till Hybrid Initialization. Detta görs eftersom det är stabilare än "Standard", vilket resulterar i färre problem under beräkningsgången.

Calculation

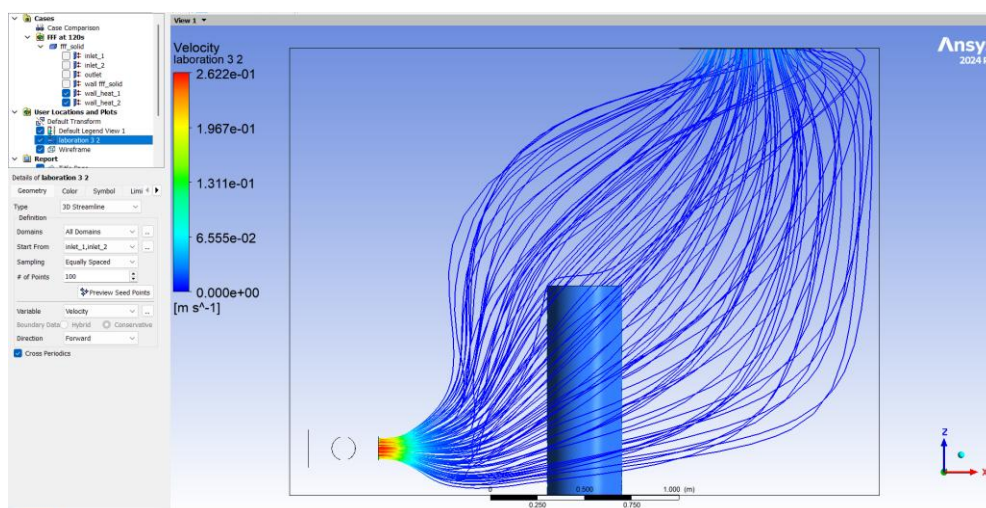
I detta steg görs själva uträkningen av simuleringen och resultaten presenteras i en graf. Här bestäms tidsintervallet som ska studeras, antalet tidssteg som beräknas och intervallet mellan dessa. Även hur många iterationer som beräknas för varje tidssteg bestäms, detta påverkar hur noggranna beräkningarna för resultatet blir, där fler iterationer ger ett bättre resultat.

3.2.7 Resultat

Efter programmet har genomfört beräkningarna så presenteras resultatet under "Results". Här kan olika presentationsalternativ väljas utifrån olika parametrar, exempelvis lufthastighet.

Streamline

Ett sätt att presentera resultatet är genom strömningslinjer (Streamlines), som visualiserar hur luften rör sig i rummet samt lufthastigheterna, se figur 25. Streamlines fungerar genom att ett förutbestämt antal partiklar initieras vid exempelvis tilluftsdonet. Därefter beräknas deras banor baserat på det momentana lufthastighetsfältet. Metoden ger därmed en ögonblicksbild av flödet, snarare än en representation av kvarvarande rök över tid.

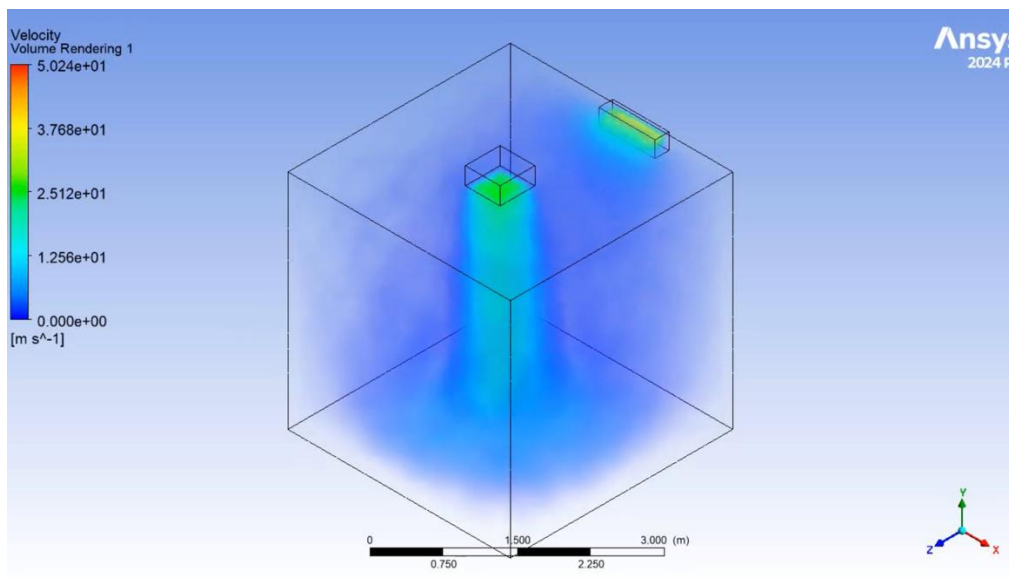


Figur 25: Visualisering av luftrörelser med strömningslinjer (Streamlines).

Linjerna i figur 25 symboliserar hur partiklarna rör sig medan färgen på linjerna förklarar i vilken hastighet. Antalet partiklar som simuleras kan väljas av användaren.

Volume Rendering

Ett annat sätt är genom volymåtergivning (Volume rendering). Visualiseringsmetoden representerar en vald parameter som en volym i färgskala, se figur 26. Färgskalan beror på magnituden av parametern som studeras. Genom att välja hastighet (velocity) som parameter för volymåtergivning fås ett resultat som till stor del liknar rökförsöken. För att få en tydlig uppfattning om hur röken rör sig med volymåtergivning, krävs det en animation, vilket är belastande för datorn.



Figur 26: Visualisering av luft rörelser med volymåtergivning (Volume Rendering).

3.2.8 Skapa filmmaterial

I rapporten presenteras huvudsakligen bilder från "Streamlines" men i Ansys finns det även möjlighet att skapa filmer som till stor del liknar rökförsöken. Detta görs genom resultatpresentationen "Volume Rendering" och sedan verktyget "timestep-animation". Då spelar programmet upp alla sparade tidssteg och har sedan möjlighet att spara detta som en film.

Filmskapandet är en väldigt krävande process då Ansys spelar in filmer i 24 bilder per sekund. Detta innebär att simuleringen sparar 24 tidssteg per sekund för att skapa en film i realtid. För en film på en minut krävs 1440 tidssteg och om uträkningen görs med fem iterationer per tidssteg så blir det totalt 7200 iterationer som sparas på datorn. Det krävs inte bara en högpresterande dator utan det krävs även stora mängder lagringsutrymme. I detta arbete låg en sparad iteration på ca 60 000 KB vilket gör att hela sparfilen på 7200 iterationer skulle ta upp 412 GB av lagringsutrymme, något som inte var möjligt för detta projekt med förutsättningar som fanns.

4 Resultat

Nedanför presenteras tre olika försök från rök och CFD-studier. Resultaten är indelade i kapitel baserat på uppställningen av försöken och ligger sedan i ordning efter tidpunkt vid tagen bild. Kapitlen börjar med rökförsöken och därefter kommer CFD-simuleringen. Totalt gjordes nio försök, men i detta kapitel presenteras de tre försöken med tydligast visualisering av resultatet. Resterande försök ligger under appendix.

4.1 Värmeeffekt 150W, tilluft $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, flöde 10 l/s

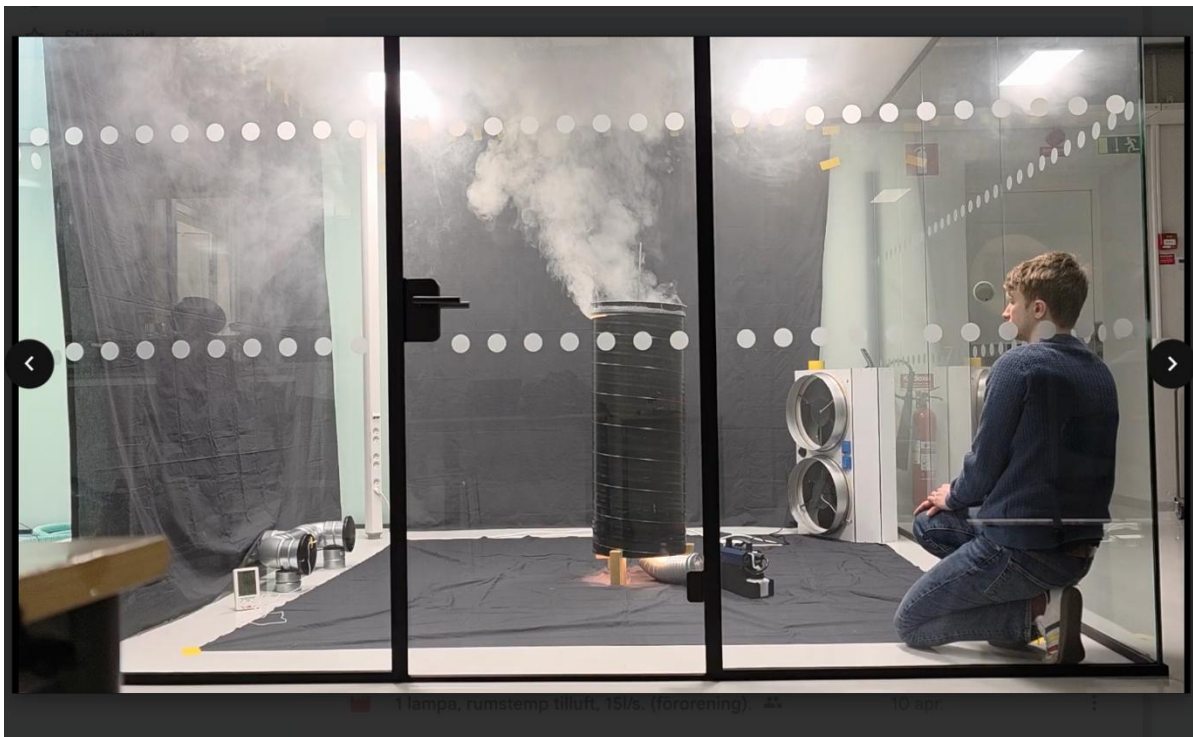
Resultaten från försöken visas nedan i figur 27–32. Detta försök ansågs relevant eftersom det visar på en tydlig skiktning av luften. Tilluften lägger sig längs med golvet och stiger sedan uppåt på grund av mannekängens värmeeffekt, vilket kan ses i figur 27 och 28. I figur 29 och 30 där röken i stället representerar föroreningar, pressas luften uppåt mot den övre delen av rummet. CFD-simuleringarna, se figur 31 och 32, visar på ett liknande resultat där luftströmmen från tilluften tar sig fram mot mannekängen och sedan stiger uppåt mot frånluftsdonet.



Figur 27: Rök som tilluft, 150W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 10 l/s efter 1 minut. https://youtu.be/eU8ayBcL_g4



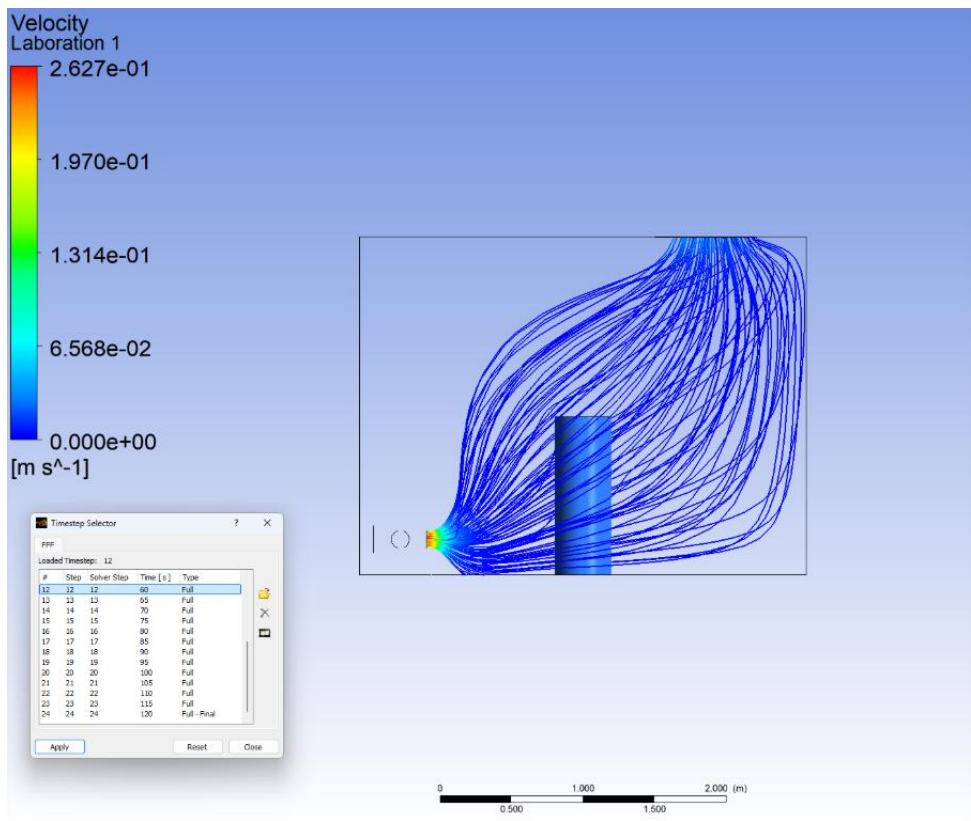
Figur 28: Rök som tilluft, 150W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 10 l/s efter 2 minuter. https://youtu.be/eU8ayBcL_g4



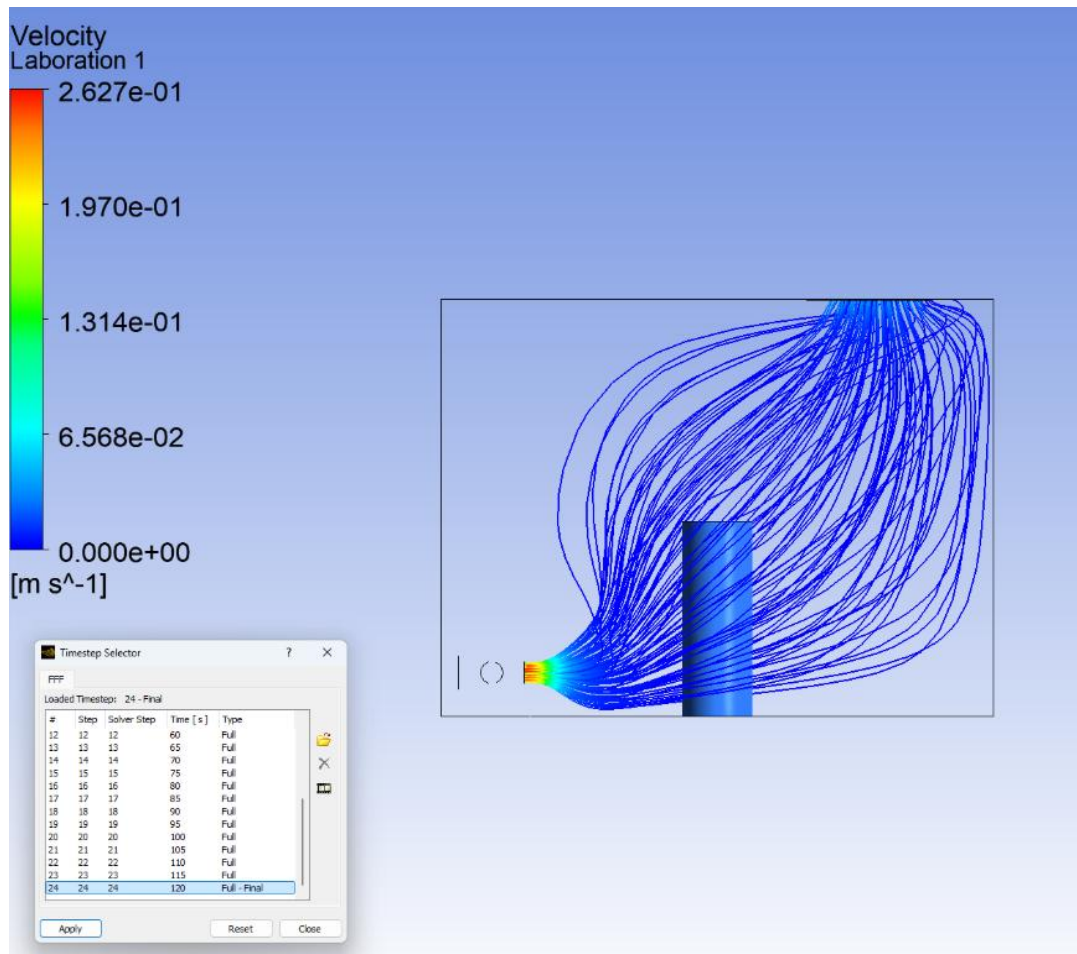
Figur 29: Rök som förorening, 150W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 10 l/s efter 1 minut. <https://youtu.be/GOV6xk629UA>



Figur 30: Rök som förorening, 150W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 10 l/s efter 2 minuter.
<https://youtu.be/GOV6xk629UA>



Figur 31: CFD-simulering, 150W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 10 l/s efter 1 minut.



Figur 32: CFD-simulering, 150W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 10 l/s efter 2 minutter.

4.2 Värmeeffekt 150W, tilluft $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, flöde 15 l/s

Resultaten från försöken visas nedan i figur 33–38. Likt föregående försök kan man se en tydlig deplacerande effekt och stigning av luften. Däremot syns en förskjutning åt höger, på grund av det högre luftflödet, se i figur 33 och 34. I figur 35 och 36 visas en tydlig skiktning av den förorenade luften. CFD-simuleringarna, figur 37 och 38, stämmer bra överens med rökförsökens resultat. Det syns även att den ökade hastigheten leder till en större omblandning av luften.



Figur 33: Rök som tilluft, 150W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 1 minut. https://youtu.be/dCX_k2mv77Q



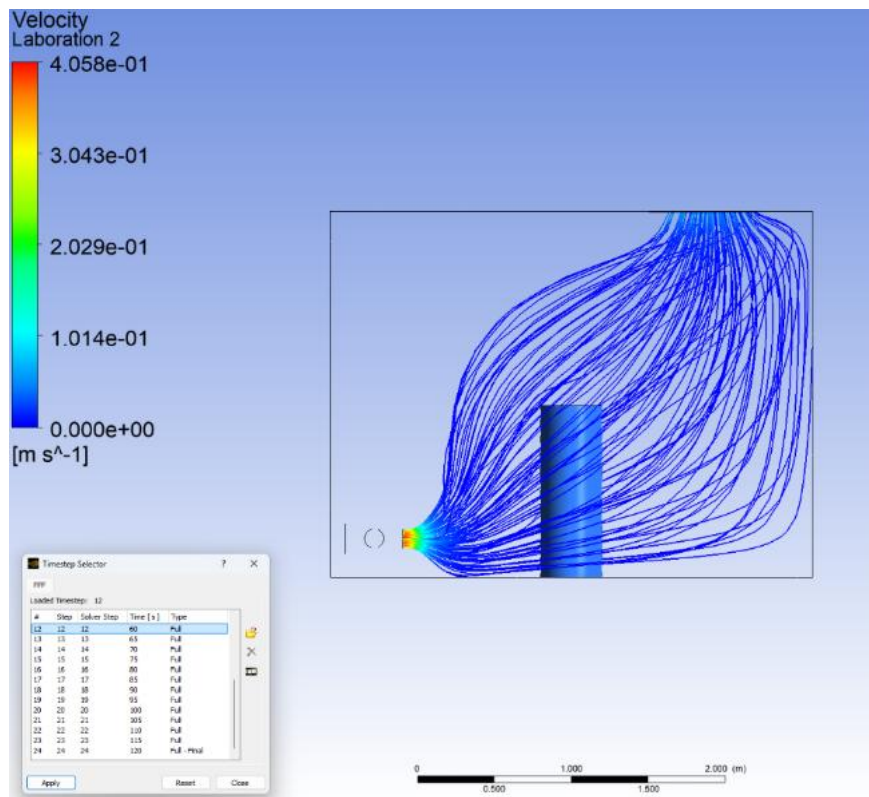
Figur 34: Rök som tilluft, 150W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 2 minuter. https://youtu.be/dCX_k2mv77Q



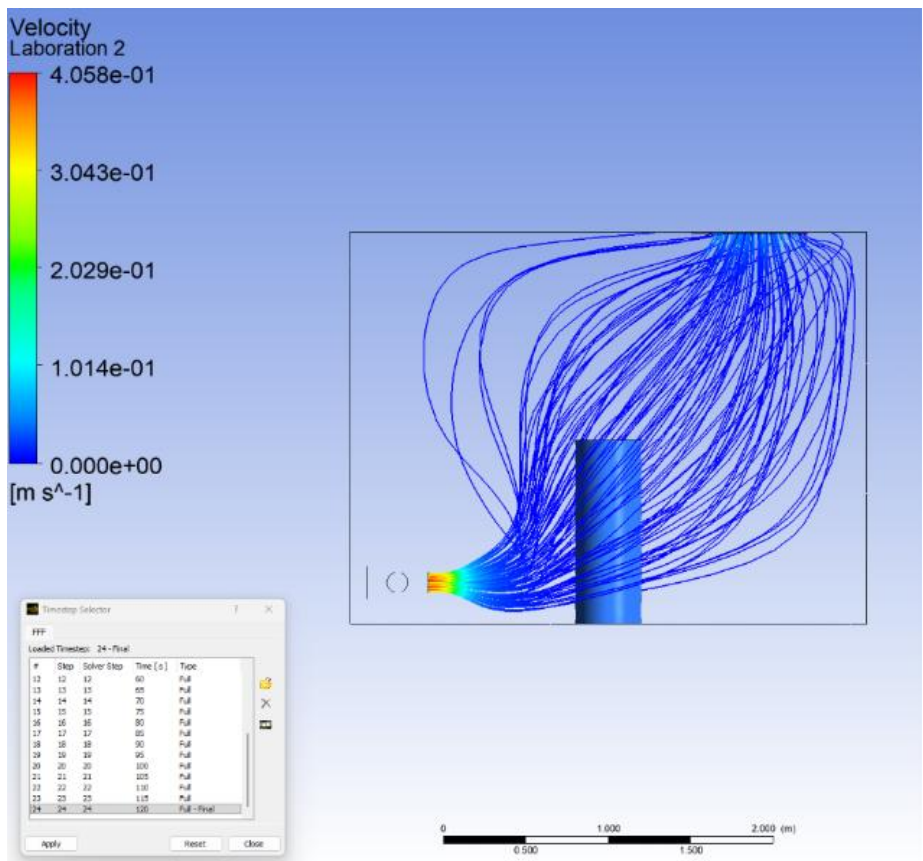
Figur 35: Rök som förorening, 150W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 1 minut. <https://youtu.be/l1IK3Adqsss>



Figur 36: Rök som förorening, 150W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 2 minuter.
<https://youtu.be/l1IK3Adqsss>



Figur 37: CFD-simulering, 150W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 1 minut.



Figur 38: CFD-simulering, 150W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 2 minutter.

4.3 Värmeeffekt 150W, tilluft $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$, flöde 15 l/s

Resultaten från försöken visas nedan i figur 39–44. I detta försök har tilluften samma temperatur som rummets luft. I figur 39 och 40 är den deplacerande effekten inte tydlig då ventilationens funktionalitet bygger på en undertempererad tilluft. I figur 41 och 42 syns inte samma tydliga skiktning - även detta beror på att den deplacerande effekten har avtagit. I CFD-simuleringarna presenteras en strömningsbild som i början liknar deplacerande ventilation, se figur 43, men över tid blir den omblandad, se figur 44.



Figur 39: Rök som tilluft, 150W, $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 1 minut. <https://youtu.be/7QxUAHH8RGw>



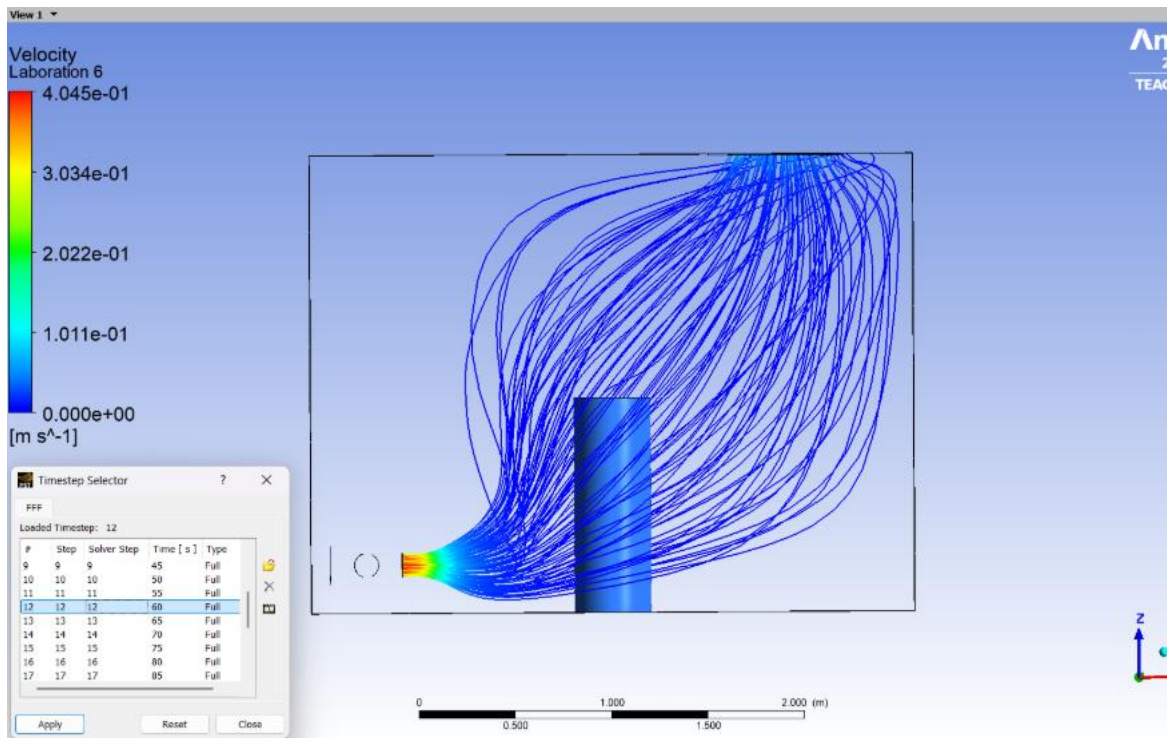
Figur 40: Rök som tilluft, 150W, $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 2 minuter. <https://youtu.be/7QxUAHH8RGw>



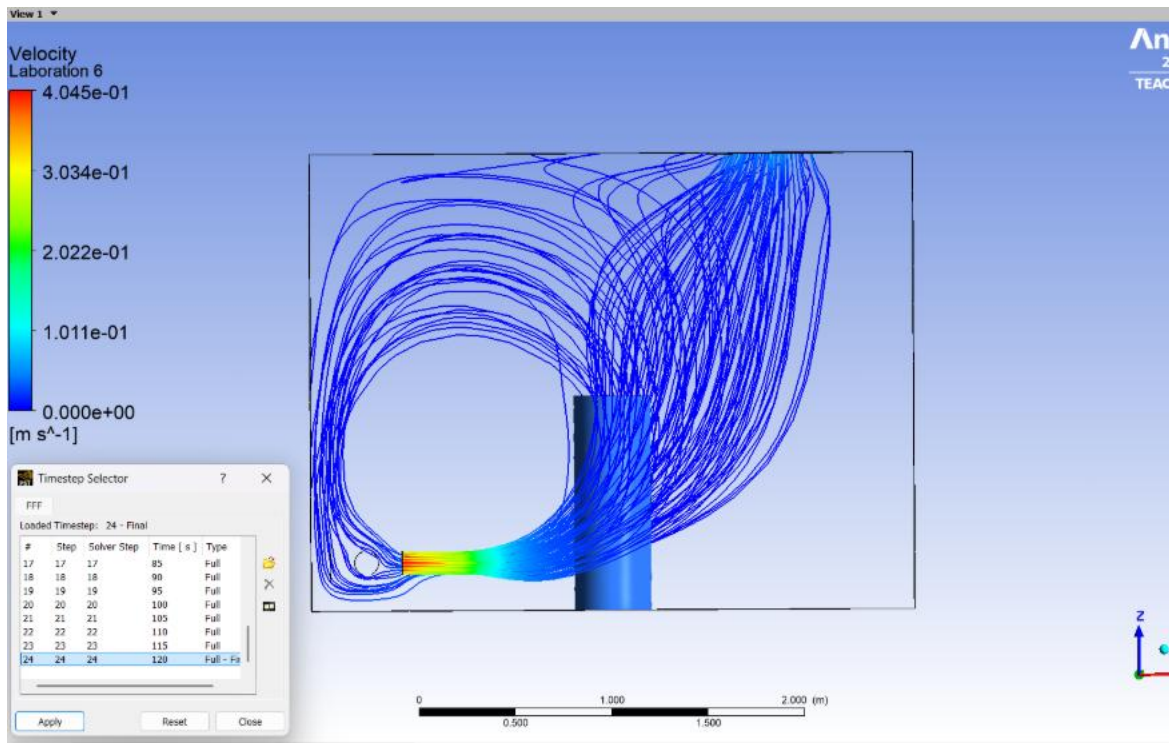
Figur 41: Rök som förorening, 150W, $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 1 minut. <https://youtu.be/448uTPf-43M>



Figur 42: Rök som förorening, 150W, $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 2 minuter. <https://youtu.be/448uTPf-43M>



Figur 43: CFD-simulering, 150W, $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 1 minut.



Figur 44: CFD-simulering, 150W, $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 2 minutter.

5 Tolkning av resultat och diskussion

I följande avsnitt diskuteras och jämförs resultaten från rökförsök och CFD-simulering. Diskussion behandlar metodernas likheter och skillnader samt möjliga felkällor som kan ha påverkat resultaten.

5.1 Jämförelse av olika flöden

En jämförelse av CFD-simuleringarna och rökförsöken samt påverkningar från ändringen av luftflöde.

5.1.1 Diskussion: 75W, $\Delta T = 1,2-1,7^{\circ}\text{C}$ kallare tilluft, 10 l/s & 15 l/s

Vid jämförelse mellan rökförsök och CFD-simuleringar från bilagor 1–12, görs bedömningen att resultaten överensstämmer väl, med endast mindre avvikelser. För fallen med en internvärme på 75W, kall tilluft och luftflöden på 10 respektive 15 l/s observeras likartade strömningsmönster i både rökförsök och CFD-simuleringen. Överensstämmelsen indikerar på att simuleringen har haft förutsättningar och inställningar av parametrar som väl representerar den verkliga situationen.

Vid det högre flödet (15 l/s) ökar luftens rörelsemängd och medför att tilluften träffar väggen med högre hastighet. Det leder till att luftströmmen pressas upp längs väggen, på grund av coandå-effekten, mot frånluftsdonet. Vid det lägre flödet (10 l/s) observeras att merparten av luften inte når fram till väggen innan den börjar stiga. Det beror på att de termiska drivkrafterna är starkare i förhållande till luftflödet.

En noterbar skillnad mellan metoderna är att luften stiger något tidigare i CFD-simuleringarna än i rökförsöken.

5.1.2 Diskussion: 150W, $\Delta T = 1,2-1,7^{\circ}\text{C}$ kallare tilluft, 10 l/s & 15 l/s

Vid 10 l/s visar rökförsöken att luftströmmen håller sig närmare golvnivå under den första minuten - jämfört med CFD-modellen, som uppvisar en tidigare vertikal avböjning, se figur 27-38. Detta indikerar att CFD-modellen i detta fall överskattar den termiska stigningskraften, sannolikt på grund av en förenklad modellering av turbulens och värmeöverföring i närheten av värmekällan.

Efter cirka två minuter uppvisar dock båda metoderna en god överensstämmelse, vilket tyder på att systemet då nått ett mer stationärt strömningsförhållande. För fallen med ett högre flöde (15 l/s) överensstämmer rökförsök och CFD-simuleringar väl genom hela förloppet. Förmodligen beror det på att de termiska effekterna har mindre påverkan vid högre flöden. Detta gör att den förenklade modelleringen av värmekälla i CFD-försöket påverkar resultatet mindre.

5.1.3 Diskussion: 225W, $\Delta T = 1,2-1,7^{\circ}\text{C}$ kallare tilluft, 10 l/s & 15 l/s

Vid jämförelse av flöden vid 225W och av CFD, studeras i bilagor 13–24. I rökförsöken observeras vid mannekängen en starkt uppåtgående rökpelare, som når taket och därefter omfördelas horisontellt och delvis cirkulerar tillbaka ned mot golvnivå.

I CFD-simuleringen uppstår initialt en riktad strömning mot frånluftsdonet. Detta kan förklaras av att modellen inte fullt fångar lokala icke-stationära effekter och småskalig turbulens genererad av den termiska effekten från mannekängen.

Efter cirka två minuter konvergerar resultaten och visar liknande cirkulationsmönster. Detta indikerar att CFD-modellen är bättre på att beskriva den stationära lösningen än den initiala.

Vid det högre flödet (15 l/s) förstärks återcirkulationen i rummet och luften blir mer omblandad. Då tappar deplacerande effekten en del av sin funktion och luften blir mer omblandad.

5.2 Jämförelse av temperaturskillnad

En jämförelse av CFD-simuleringarna och rökförsöken samt temperaturskillnadens påverkan.

5.2.1 Diskussion: 75W, 15 l/s, $\Delta T = 0^{\circ}\text{C}$ & $\Delta T = 1,2-1,7^{\circ}\text{C}$ kallare tilluft.

CFD-simuleringen och rökförsöken uppvisar en god överensstämmelse och efterliknar varandra relativt väl efter cirka en minut, se bilagor 7–12 och 25–30. I fallet med $\Delta T = 0^{\circ}\text{C}$ indikerar CFD-simuleringen ett rörelsemönster som tyder på omblandning av luften, vilket även observeras i motsvarande rökförsök. Det sker eftersom skillnad i densitet mellan tilluften och rumsluften saknas, vilket förhindrar de termiska drivkrafterna. Då förekommer i stället ett fenomen mer likt omblandande ventilation där luften sprids genom turbulens.

Den huvudsakliga skillnaden mellan fallen är att luften vid $\Delta T = 0^{\circ}\text{C}$ värms upp snabbare jämfört med fallen där $\Delta T = 1,2-1,7^{\circ}\text{C}$. Vidare upplevs röken vara mer homogent omblandad vid $\Delta T = 0^{\circ}\text{C}$, medan fallen med temperaturskillnad uppvisar en tydligare skiktning. Det sker eftersom densitetsskillnaden inte finns då $\Delta T = 0^{\circ}\text{C}$.

5.2.2 Diskussion: 150W, 15 l/s, $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ & $\Delta T = 1,2-1,7^\circ\text{C}$ kallare tilluft.

Vid $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ observeras en snabb övergång till homogen omblandning i både CFD och rökförsöken, se figur 34–44. Detta indikerar att frånvaron av temperaturskillnad gör att tilluften värms snabbare. Vid $\Delta T = 1,2-1,7^\circ\text{C}$ kvarstår däremot en mer strukturerad flödesbild med tydligare skiktning.

Skillnaden mellan 75W och 150W antyder dessutom att en ökad intern värmelast förstärker återcirkuleringen och resulterar därmed i en högre grad av omblandning även när temperaturskillnad finns.

5.2.3 Diskussion: 225W, 15 l/s, $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ & $\Delta T = 1,2-1,7^\circ\text{C}$ kallare tilluft.

CFD-simuleringarna och rökförsöken uppvisar en god överensstämmelse och efterliknar varandra genom hela försöket vid $\Delta T = 0^\circ\text{C}$, se bilagor 19–24 och 31–36. I både rökförsöken och simuleringarna kan det tydligt observeras hur luftströmmen stiger med sådan hastighet att den pressas ned mot golvnivå igen. När temperaturskillnad förekommer uppstår dock vissa skillnader mellan metoderna. I CFD-simuleringen tenderar luftströmmen att röra sig som en mer sammanhängande pelare mot frånluftsdonet, medan rökförsöken visar en något större omblandning av luften i hela rummet efter två minuter.

Skillnad mellan fallen med och utan temperaturskillnad är inte lika tydlig i rökförsöken som i tidigare fall. Vid både $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ och $\Delta T = 1,2-1,7^\circ\text{C}$ uppvisar rummet en tydlig omblandning - men på grund av olika anledningar. Vid $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ är inte de termiska drivkrafterna tillräckligt stora då det inte finns någon skillnad i densitet mellan tilluften och rummets luft. Då blir luftens rörelser mer omblandade. För $\Delta T = 1,2-1,7^\circ\text{C}$ så har vi en mycket hög värmeproducering från mannekången och rummet hittar ett stabilt läge där ventilationen omblandas.

5.3 Sammanfattande diskussion

Vid jämförelse av experimenten användes stillbilder tagna från videomaterialet, i kombination med de fullständiga videoinspelningarna. Filmsekvenserna förmedlar en mer detaljerad visualisering och möjliggör en tydligare analys av luftrörelserna - och rekommenderas därför till läsaren för att få en större övergripande förståelse. Filmerna finns samlade i bilagor.

En tydligare skiktning observerades i rökförsöken jämfört med CFD-simuleringen. Detta kan troligtvis förklaras av begränsningar i visualiseringsmetoden som användes i Ansys Fluent. Den visualiseringsmetod som valdes var "Streamline" som endast presenterar lufthastigheterna för en specifik tidpunkt, vilket resulterar i att det inte blir en ackumulering av rök. Denna felkälla diskuteras ytterligare i avsnittet Felkällor (avsnitt 5.4.2).

Ett sätt att jämföra resultatet är att studera vart partikelflödet i CFD-modellen är, vilket återspeglas av tätheten på partikellinjerna i bilderna från försöket. Detta stämmer delvis överens med rökförsöken vilket visas genom att ansamlingarna av rök är på samma ställe där det är hög densitet av partikellinjer i modellen.

Hastigheten avtar snabbare i rökförsöket än i CFD-modellen. CFD-resultaten antyder att hastigheten är konstant genom försöket, förutom precis i början när tilluften strömmar ut i rummet.

Likheter observerades även när luftströmmen träffar den borte väggen. I både CFD-simuleringen och rökförsöken slår luften mot väggen och avböjs uppåt mot frånluftsdonet till följd av väggens påverkan på flödet.

5.4 Felkällor

Flertalet felkällor har observerats och dokumenterats under arbetet. Dessa felkällor kopplas till utförandet av experimentet, simuleringens noggrannhet och trovärdighet, samt till tolkningen av resultaten.

5.4.1 Begränsningar i CFD-modellen

Noggrannheten av CFD-modellen avgörs av flera parametrar, delvis av beräkningsnätets storlek och antalet iterationer. På grund av begränsad beräkningskraft i datorerna, har dessa inte varit av den eftertraktade kvaliteten. Resultatet anses minst pålitligt runt värmekällan och till-och frånluftsdon eftersom dessa element kräver störst noggrannhet. För att få ett mer tillförlitligt resultat hade antalet iterationer förslagsvis behövt ökas.

Ytterligare en felkälla mellan metoderna är hur röken representerades och simulerades. Under rökförsöket tillsätts rök under fem sekunder medan CFD-modellen studerar luftflödet kontinuerligt genom hela simuleringen och följer inte en begränsad luftmängd. Detta kan påverka hur ”röken” ackumuleras, vilket försvårar jämförelsen.

Under inställningen av parametrar i steget ”Setup” i CFD-metoden valdes tilluftshastigheten från handberäkningar. Dessa utgick från luftflödet och donets area. Donet modellerades som en hel yta med uträknad hastighet i stället för ett perforerat don med uppmätt hastighet, vilket kan ha bidragit till felkällor i resultatet. Denna metod valdes på grund av given tid för arbetet och bristande förkunskaper inom Ansys.

Vid modellering av värmekällor gav inte modellen en reaktion vid ansättning av värmeeffekt, därav användes den uppmätta temperaturen på mannekängen i stället. Detta kan ha påverkat den termiska effekten av värmekällan i CFD.

Ännu en felkälla i resultatet är kopplat till egenskaperna av de avgränsande ytorna. På grund av brist på tid och förkunskap definierades inte olika material med olika egenskaper för att bättre representera verkligheten. Modellen i detta projekt har två definierade material, luft och stål, där alla avgränsade ytor är definierade som stål och har samma fysikaliska egenskaper vilket inte speglar den verkliga situationen. För att uppnå en bättre modell hade olika material för de olika ytorna behövts definieras då deras termiska egenskaper varierar och kommer påverka luftens rörelse i rummet, speciellt då det är deplacerande ventilation som studeras.

Den sista felkällan grundas i bristande förståelse för programmet vid start. Resultaten kommer från den förståelse som skapats under projektets gång - därav har inte alla Ansys-funktioner kunnat tas i beaktning i simuleringarna. Det finns en mängd olika fysikaliska modeller och funktioner som inte användes då de bortprioriterades i arbetet. Därav kan en simulering där fler parametrar tagits hänsyn till eventuellt ge bättre resultat.

5.4.2 Begränsningar i Streamline-visualisering

En identifierad felkälla är hur röken representeras i CFD-modellen samt valet av visualiseringsmetod, *Streamline*. CFD-modellen tar hänsyn till den totala lufthastigheten i systemet, inklusive de rörelser som uppstår när röken tränger undan omgivande luft. Det innebär att även luft som inte utgörs av rök, men som påverkas och sätts i rörelse av tilluften, kan visualiseras i simuleringen. Följden kan bli att all luft riskeras att tolkas som rök, vilket kan leda till en missvisande uppfattning av flödesbilden och därmed en felaktig tolkning av CFD-resultaten.

I framtida studier kan Streamlines vara mer lämplig vid modellering av en föroreningskälla. Genom att betrakta partiklar som emitteras från exempelvis en källa vid en mannekäng, kan transport och spridning av föroreningar följas mer realistiskt.

5.4.3 Begränsningar och osäkerheter vid rökförsök

Rökvisualiseringarna genomfördes i en labbmiljö där det var möjligt att kontrollera många av de ingående parametrarna, vilket bidrog till att förhindra yttre påverkan på försöken. Det fanns trots detta en del faktorer och störningar av försöken som var svåra att undvika. Med andra ord fanns det en rad felkällor som kan ha påverkat och vinklat resultaten åt ett visst håll.

Då rök inte nödvändigtvis har samma fysikaliska egenskaper som luft kan rökens rörelsemönster skilja sig från den "rena" luftens rörelse. Detta kan vara en felkälla och bör beaktas vid rökstudier.

Under tiden försöken genomfördes, steg temperaturerna både på tilluften och på rumsluften i det rum där röken släpptes ut. Detta beror främst på mänsklig aktivitet och att värme alstrades från utrustningen i de båda labbrummen. På grund av tidsbegränsningar var det inte aktuellt att låta rummen kylas ned till ursprungstemperaturerna mellan försöken. Temperaturdifferensen mellan tilluft och rumsluft var trots detta i stort sett konstant, vilket gjorde att den deplacerande ventilationen fortsatte fungera även med högre temperaturer. Det är svårt att avgöra om de stigande temperaturerna förändrade rökens rörelser, men det är också fullt möjligt att de haft en påverkan på resultatet.

Den uppmätta temperaturen på tilluften är också en eventuell felkälla. Termometern som användes vid mätningen var enkel och mätte temperaturen med en givare som fästes på tilluftsdonet. Denna utformning var inte optimal då det är osäkert om givaren faktiskt mätte temperaturen på tilluften som blåstes ut - eller om den mätte en blandning av den kalla tilluften och den varmare rumsluften. Temperaturen på tilluften var alltid högre än temperaturen i det nedkylda rummet, trots att den bara färdades en kort sträcka i kanalerna. En tänkbar förklaring till temperaturökningen är värmeöverföring från fläkten. Det är också möjligt att mätvärdena på tilluftstemperaturen inte är tillförlitliga.

Vid de försök där röken tillsattes via mannekängen behövde en person vara på plats i rummet för att styra rökmaskinen. Detta hade antagligen en viss påverkan på luftrörelserna, på grund av den extra värmeeffekten som en människa avger och personens rörelser som kan blanda om luften.

Den kanske största felkällan är kopplad till själva tolkningen av rökförsöken. Eftersom tolkningarna huvudsakligen är visuella kan olika slutsatser dras beroende på vem som

observerar testerna. Exempelvis kan två individer göra olika observationer från samma försök. En annan risk med att försöken utvärderas visuellt, utan objektiva mätvärden - är att det kan vara svårt att göra en neutral bedömning av resultaten. Förväntningar på hur luften borde röra sig i ett visst fall, kan påverka hur rökens rörelser uppfattas.

5.5 För- och nackdelar med metoderna

De två metoderna skiljer sig i flertal aspekter, exempelvis genomförande och vilken information som erhållits. Rökvisualisering ger en visuell bild av luftens rörelse medan CFD-simulering möjliggör detaljerade numeriska analyser. Nedan presenteras respektives metods främsta för- och nackdelar.

5.5.1 Rökvisualisering

Rökvisualisering är en tydlig och intuitiv metod för att studera luftströmningar och ventilationsförlopp i ett rum. Metoden möjliggör direkt observation av hur luften rör sig, vilket gör det enkelt att identifiera exempelvis skiktning, återcirkulation och omblandning av luftmassor. En stor fördel med rökvisualisering är att verkliga strömningsförhållanden återges utan behov av numeriska modeller eller teoretiska approximationer. Det innebär att samtliga fysikaliska fenomen som uppstår i rummet automatiskt inkluderas i försöket, vilket bidrar till en realistisk representation av luftens rörelsemönster.

Metoden är dessutom relativt enkel att genomföra och kräver varken avancerad programvara eller omfattande beräkningsresurser. Det gör rökvisualisering till en mycket tillgänglig och kostnadseffektiv metod. Försöken kan genomföras med relativt enkel utrustning samtidigt som resultaten är lätta att tolka visuellt, även för personer utan djupgående kunskap inom området. Den rök som användes under försöken bedöms inte innebära någon säkerhetsrisk.

Trots metodens fördelar finns även begränsningar. Rökvisualisering ger huvudsakligen kvalitativ information och gör det svårt att erhålla exakt, kvantitativ data, som lufthastigheter eller exakta koncentrationsfördelningar. Även om rörelsemönster och områden med hög rökkoncentration kan observeras visuellt är det svårt att avgöra hur stora luftflöden som transporteras genom olika delar av rummet.

Metoden är dessutom känslig för yttre störningar. Små variationer i omgivningen, exempelvis rörelser i rummet och variation i rökproduktionen, kan påverka luftflödet och temperaturen, vilket således påverkar resultatet. Detta medför att det kan vara svårt att återskapa identiska försöksförhållanden mellan olika experiment, vilket begränsar metodens reproducerbarhet och jämförbarhet.

5.5.2 CFD-simulering

Ansys Fluent är ett avancerat program som möjliggör omfattande och detaljerade studier av inneklimatet och ventilationens prestanda. Programmet samlar data inom flera aspekter, exempelvis hastigheter och temperaturer. Ansys gör det mycket enkelt att ändra begynnelsevillkor och ingående geometri, vilket är speciellt nödvändigt i projekteringsfasen. Då kan ett rums inneklimat studeras i detalj samtidigt som ingångsvärdena kan enkelt justeras. Ansys är därav bra för att hitta den optimala lösningen till mer avancerade system eller där det sätts högre krav på klimatet och ventilationens prestanda. Ansys är även en fördelaktig metod för forskning inom luftströrelser, där studier av nya tekniker och metoder går att studera i hög detalj.

Ansys Fluent kräver stor teknisk kompetens samt förståelse för fysiken och teorin som programmet baseras på. En brist på det kommer leda till felaktiga antaganden, som resulterar i felaktiga resultat. Utöver ett krav på hög kompetens är Ansys Fluent ett program vars licens är väldigt kostsam. Exakt kostnad per licens är svårt att specificera då det är ett offertbaserat, en generell uppskattning av priset för en kommersiell licens landar runt 20 000–30 000 US\$ per år. Det priset är betydligt högre än kostnaderna för att utföra enklare rökförsök, vilket gör att användningen begränsas på grund av ekonomiska och tekniska skäl. Eftersom Ansys kräver stor teknisk kompetens blir tillgängligheten av metoden smal och endast lämplig för någon med stora kunskaper inom ämnet. Däremot kräver inte Ansys några fysiska försök utan kan göras av oavsett användarens fysiska begränsningar.

En nackdel som klargjorts under projektets arbetsgång är att utförandet av simuleringar i Ansys Fluent är väldigt krävande när det kommer till hårdvaruprestanda. Det krävs dyra kraftfulla datorer med mycket lagringsutrymme för att kunna genomföra försöken, och det är en mycket tidskrävande process. Under arbetet kunde enskilda simuleringar ta upp till sex timmar.

5.5.3 Tillämpning i verklig miljö

Laboratoriet möjliggör en stor kontroll av samtliga försök både när det kommer till dokumentation och uppställning av experiment. En tillämpning i verklig miljö kommer kräva en anpassning av metod baserat på rummets egenskaper. Rökförsöken kommer inte längre ha samma möjligheter till film och dokumentation genom glasväggarna. Möjligheterna till att ta fram parametrar och fysikaliska egenskaper för CFD-modellen kommer påverkas och göra det svårare att få en exakt modell.

6 Slutsats

Det här kandidatarbetet har undersökt två olika metoder för visualisering av luftrörelser: fysisk rökvisualisering och CFD-simulering. För- och nackdelar med metoderna har utvärderats, samt vilka sammanhang de är mest lämpade för inom området installationsteknik.

De fysiska rökförsöken är mest lämpade för test i driftsfasen, då det var en mer tidseffektiv och billigare metod när det fanns befintliga ventilationssystem på plats. Det är också mer intuitivt och kräver ingen större kunskap för att genomföra - men blir invecklat om det är svårt att komma åt donen eller om testerna blir mer komplexa.

CFD-simuleringar lämpar sig bättre för tester i projekteringsfasen då de erbjuder en hög grad av flexibilitet och repeterbarhet, vilket gör det enklare att experimentera med olika flöden och temperaturer i större skala. CFD-simuleringar kräver mer förkunskaper och förberedelser för att påbörja simulering. Användaren behöver kunskap om programvaran samt kunna konfigurera randvillkor och ta beslut kring vilka fysikaliska modeller som ska användas. Programvaran är krävande för datorns prestanda, särskilt på minne och processorkraft. Behovet av en högpresterande dator i kombination med licensen resulterar i att kostnader för att genomföra CFD-simuleringar ofta blir höga.

Slutligen är rökvisualisering en enklare metod att använda samt mer kostnadseffektiv och passar därför mer till småskaliga analyser i befintliga miljöer. CFD-simulering är bättre lämpat i avancerade projekt med storskaliga och detaljorienterade undersökningar. Jämförelser gick att göra mellan de olika metoderna om CFD-simuleringarna gjordes under rätt förutsättningar.

7 Referenser

Anderson, J. D. (1995). *Computational fluid dynamics: The basics with applications*.

McGraw-Hill.

Arbetsmiljöverket. (2025, juli 10). *Allmänventilation och luftkvalitet—Arbetsmiljöverket*.

<https://www.av.se/inomhusmiljo/ventilation-och-luftkvalitet/allmanventilation-och-luftkvalitet/>

ASHRAE. (2013). *ASHRAE Handbook: Fundamentals*. ASHRAE Research.

Boverket. (2024a). *Boverkets föreskrifter om skydd med hänsyn till hygien, hälsa och miljö samt hushållning med vatten och avfall* (BFS 2024:8).

<https://rinfo.boverket.se/BFS2024-8/pdf/BFS2024-8.pdf>

Boverket. (2024b, augusti 7). *Ventilation*. Boverket. Boverket.

<https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/regler-om-byggande/boverkets-byggregler/ventilation/>

Catarina Warfvinge & Mats Dahlblom. (2010). *Projektering av VVS-installationer* (1:20).

Studentlitteratur.

D’Cruz, R. F., & Hart, N. (2024). A history of home mechanical ventilation: The past, present and future. *Chronic Respiratory Disease*, 21, 14799731241240776.

<https://doi.org/10.1177/14799731241240776>

Elbadri, R., Abdel-Salam, H., & Fikry, M. (2023). Airflow in Urban Environment: An

Approach to Improve Egyptian Buildings Regulations. *LET IT GROW, LET US*

PLAN, LET IT GROW: Nature-Based Solutions for Sustainable Resilient Smart Green

and Blue Cities. REAL CORP 2023 – 28th International Conference on Urban

Planning and Regional Development in the Information Society.

https://www.corp.at/archive/CORP2023_7.pdf?utm_source=chatgpt.com

- Euler Equations*. (u.å.). Hämtad 04 maj 2026, från <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/eulereqs.html>
- Faraguna, C. (2012). *Självdagsventilation i flerbostadshus: Förutsättningar och möjliga förbättringsåtgärder* (TVIT--12/5039). Lunds universitet.
<https://www.lu.se/lup/publication/7452117>
- Folkhälsomyndigheten. (2014). *Folkhälsomyndighetens allmänna råd om ventilation* (FoHMFS 2014:18). Folkhälsomyndigheten.
<https://www.folkhalsomyndigheten.se/contentassets/641784832543443ea4eebe9b300c244e/fohmfs-2014-18.pdf>
- Karimipannah, T., & Awbi, H. B. (2002). Theoretical and experimental investigation of impinging jet ventilation and comparison with wall displacement ventilation. *Building and Environment*, 37(12), 1329–1342. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00117-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00117-2)
- Lindab. (2021). *Luft Teori*. Lindab Ventilation A/S.
https://www.lindab.se/globalassets/commerce/lindabwebproductsdoc/assets/production/mje2yzzq1ntqtote5yi00mzflltk1nmitntczm2zmzjk2yvtvi/5249788395849167630/theory_air_se.pdf?v=1674653495
- Liu, H.-Y., Chu, Y.-C., Chiang, T., & Kao, C.-H. (2025). Investigating Airflow Transmission Pathways of Respiratory Viruses in High-Rise Residential Buildings Based on CFD Model. *Indoor Air*, 2025(1), 1754054. <https://doi.org/10.1155/ina/1754054>
- Luftsson. (2024, november 25). *Ventilationens historia – Från Dåtid till Framtid*. Luftsson Sverige AB. <https://luftsson.se/sv/post/ventilationens-historia-fran-datid-till-framtid>
- Macagno, E. (1991). Some remarkable experiments of Leonardo da Vinci. *La Houille Blanche*, 77(6), 463–471. <https://doi.org/10.1051/lhb/1991045>
- Stenmark, E. (u.å.). *On Multiphase Flow Models in ANSYS CFD Software*.

Stocks, J., & Lundquist, A. (2025). *Naturlig ventilation I svenska kontor* [Examensarbete].

Chalmers Tekniska Högskola.

<https://odr.chalmers.se/server/api/core/bitstreams/b9b58401-96e7-4a74-97e8-abd9e668627e/content>

Swegon. (u.å.). *Ventilation principles*. Swegon. Hämtad <https://www.swegon.com/references-and-insights/technical-guides/ventilation-principles/>

8 Bilagor

Inspelat filmmaterial från laborationer:

1	1 lampa, kall tilluft, 10l/s. Tilluft	https://youtu.be/pq-rZDFVSj8
2	1 lampa, kall tilluft, 15l/s. Tilluft	https://youtu.be/9lQrQ0VXnsM
3	1 lampa, kall tilluft, 10l/s. Förorening	https://youtu.be/K-NrkSd5ocs
4	1 lampa, kall tilluft, 15l/s. Förorening	https://youtu.be/1TZb556WtGs
5	2 lampor, kall tilluft, 10l/s. Tilluft	https://youtu.be/eU8ayBcL_g4
6	2 lampor, kall tilluft, 15l/s. Tilluft	https://youtu.be/dCX_k2mv77Q
7	2 lampor, kall tilluft, 10l/s. Förorening	https://youtu.be/GOV6xk629UA
8	2 lampor, kall tilluft, 15l/s. Förorening	https://youtu.be/l1IK3Adqsss
9	3 lampor, kall tilluft, 10l/s. Tilluft	https://youtu.be/iMI4Y4vhISl
10	3 lampor, kall tilluft, 15l/s. Tilluft	https://youtu.be/J-rY3gMp-8
11	3 lampor, kall tilluft, 10l/s. Förorening	https://youtu.be/zXM4_BSlyfs
12	3 lampor, kall tilluft, 15l/s. Förorening	https://youtu.be/KwPFSKJJsOI
13	1 lampa, rumstemp tilluft, 15l/s. Tilluft	https://youtu.be/Q_5hVhUR0LQ
14	1 lampa, rumstemp tilluft, 15l/s. Förorening	https://youtu.be/3FN1lAXj9m0
15	2 lampor, rumstemp tilluft, 15l/s. Tilluft	https://youtu.be/7QxUAHH8RGw
16	2 lampor, rumstemp tilluft, 15l/s. Förorening	https://youtu.be/448uTPf-43M
17	3 lampor, rumstemp tilluft, 15l/s. Tilluft	https://youtu.be/eyYn6xtZeto
18	3 lampor, rumstemp tilluft, 15l/s. Förorening	https://youtu.be/Dq91qHNw5t0
19	1 lampa, kall tilluft, 10l/s. Tilluft. Sidovy	https://youtu.be/UGlD9-YvVzw
20	1 lampa, kall tilluft, 15l/s. Tilluft. Sidovy	https://youtu.be/ryFo48PecGI
21	1 lampa, kall tilluft, 10l/s. Förorening. Sidovy	https://youtu.be/yNLVtcSBU9U
22	1 lampa, kall tilluft, 15l/s. Förorening. Sidovy	https://youtu.be/4qWX3WrmMK0
23	2 lampor, kall tilluft, 10l/s. Tilluft. Sidovy	https://youtu.be/3A4OclbsJDk
24	2 lampor, kall tilluft, 15l/s. Tilluft. Sidovy	https://youtu.be/f2XcHI5xjZw
25	2 lampor, kall tilluft, 10l/s. Förorening. Sidovy	https://youtu.be/UvYdqFZ6MjE

26	2 lampor, kall tilluft, 15l/s. Förorening. Sidovy	https://youtu.be/GgKUy4g6Dic
27	3 lampor, kall tilluft, 10l/s. Tilluft. Sidovy	https://youtu.be/qBeZks00wzQ
28	3 lampor, kall tilluft, 15l/s. Tilluft. Sidovy	https://youtu.be/e8_psAoZBAc
29	3 lampor, kall tilluft, 10l/s. Förorening. Sidovy	https://youtu.be/xMDk9LWj7Fo
30	3 lampor, kall tilluft, 15l/s. Förorening. Sidovy	https://youtu.be/i9OXLp7VA24
31	1 lampa, rumstemp tilluft, 15l/s. Tilluft. Sidovy	https://youtu.be/nlB2ZmRurVk
32	1 lampa, rumstemp tilluft, 15l/s. Förorening. Sidovy	https://youtu.be/qO79eSvmmus
33	2 lampor, rumstemp tilluft, 15l/s. Tilluft. Sidovy	https://youtu.be/loHCNfyNPjo
34	2 lampor, rumstemp tilluft, 15l/s. Förorening. Sidovy	https://youtu.be/NhPmMhp5hE4
35	3 lampor, rumstemp tilluft, 15l/s. Tilluft. Sidovy	https://youtu.be/b-KDFFuXnW4
36	3 lampor, rumstemp tilluft, 15l/s. Förorening. Sidovy	https://youtu.be/EA1aigEbnas

Skärmlapp från rökförsök:



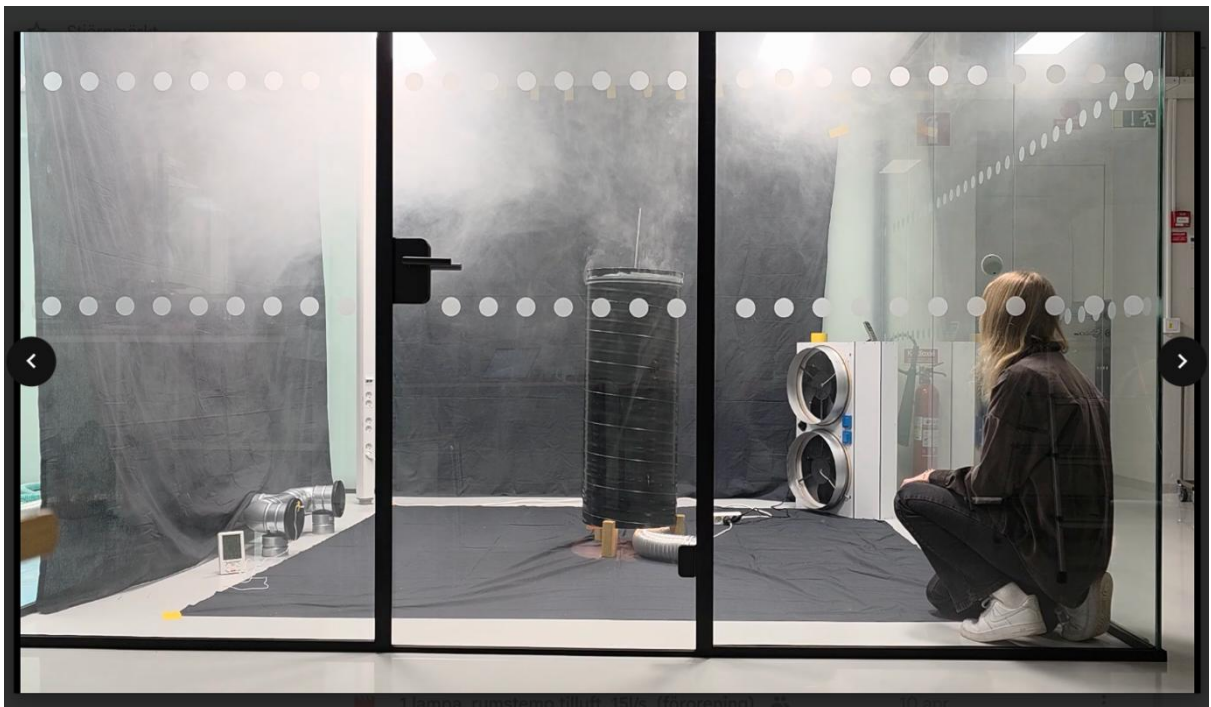
Bilaga 1: Rök som tilluft, 75W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 10 l/s efter 1 minut. <https://youtu.be/pq-rZDFVSj8>



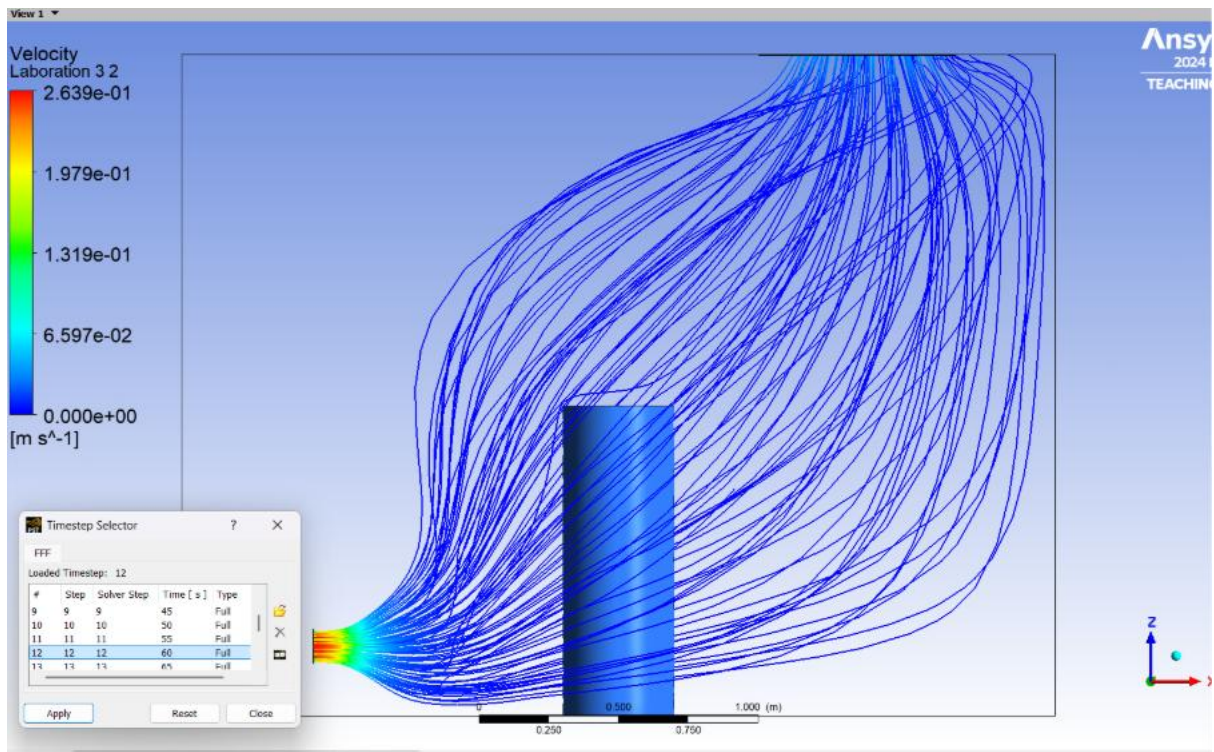
Bilaga 2: Rök som tilluft, 75W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 10 l/s efter 2 minuter. <https://youtu.be/pq-rZDFVSj8>



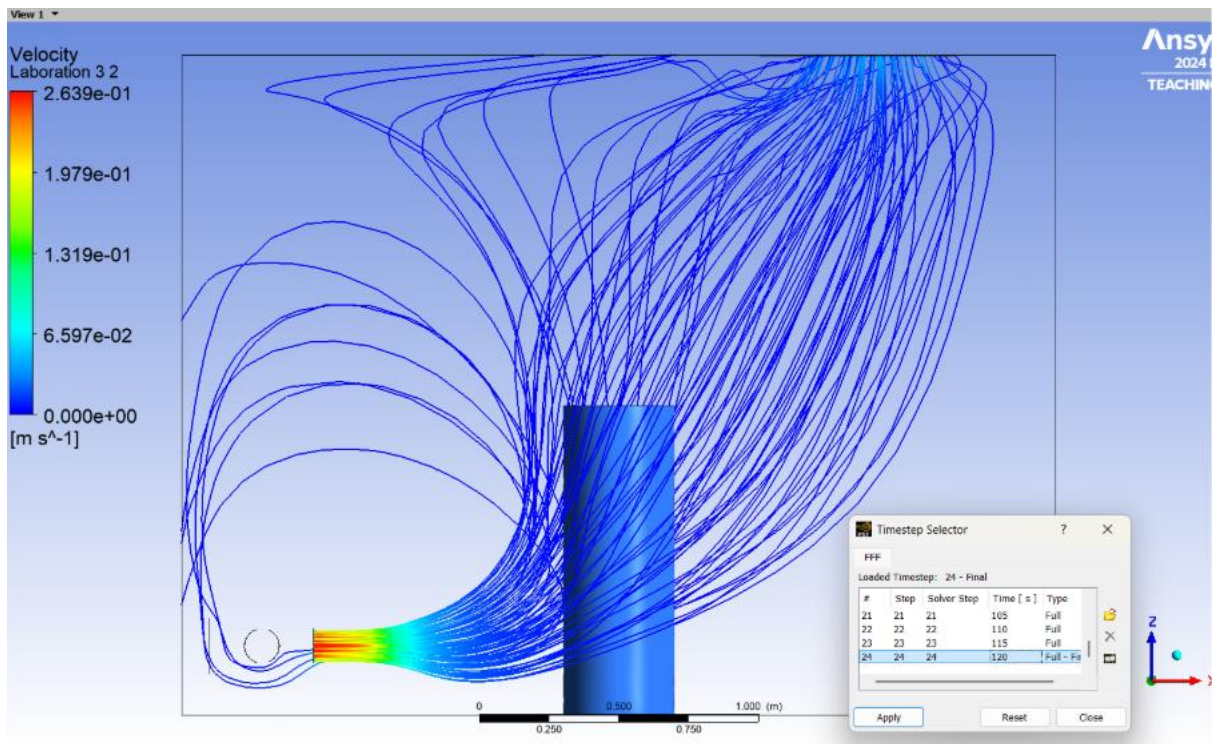
Bilaga 3: Rök som förorening ,75W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 10 l/s efter 1 minut. <https://youtu.be/K-NrkSd5ocs>



Bilaga 4: Rök som förorening ,75W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 10 l/s efter 2 minuter. <https://youtu.be/K-NrkSd5ocs>



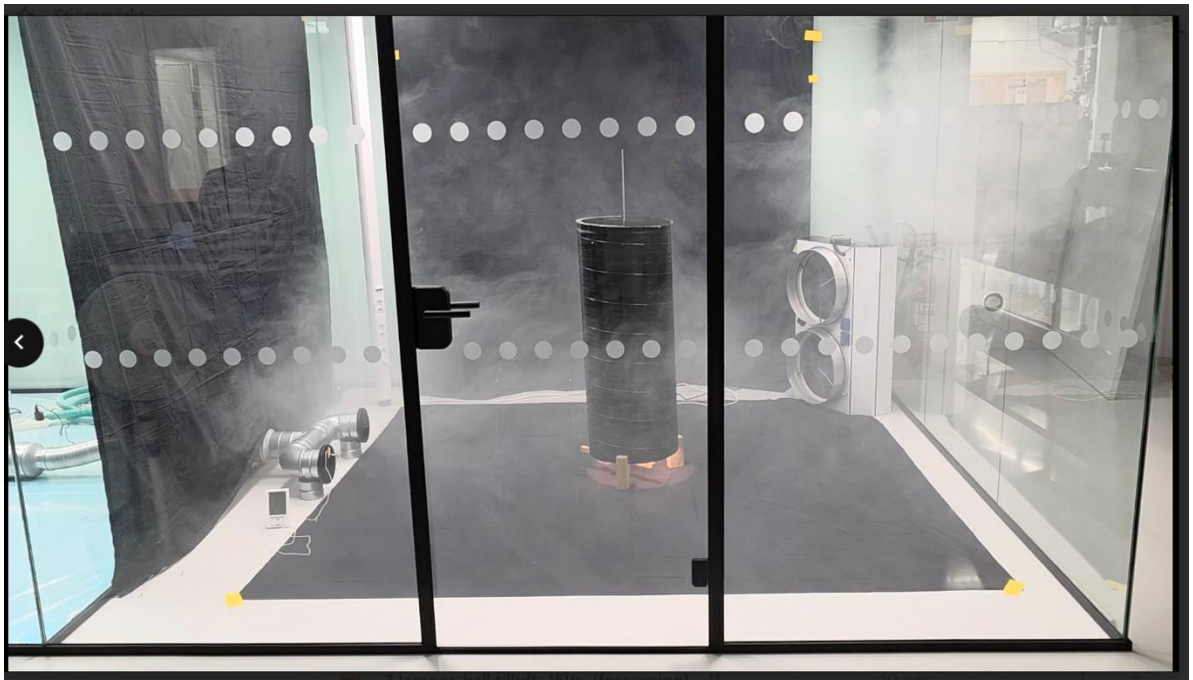
Bilaga 5: CFD-simulering, 75W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 10 U/s efter 1 minut.



Bilaga 6: CFD-simulering, 75W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 10 U/s efter 2 minuter.



Bilaga 7: Rök som tilluft, 75W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 1 minut. <https://youtu.be/9lQrQ0VXnsM>



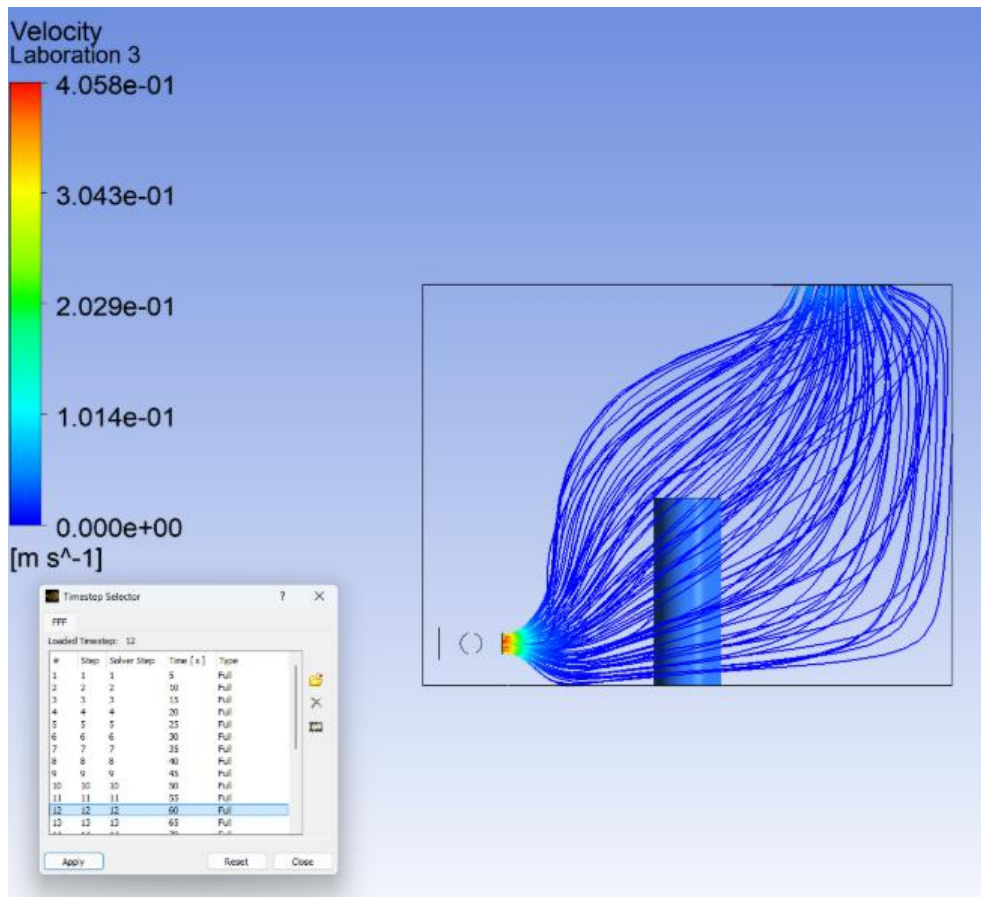
Bilaga 8: Rök som tilluft, 75W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 2 minuter. <https://youtu.be/9lQrQ0VXnsM>



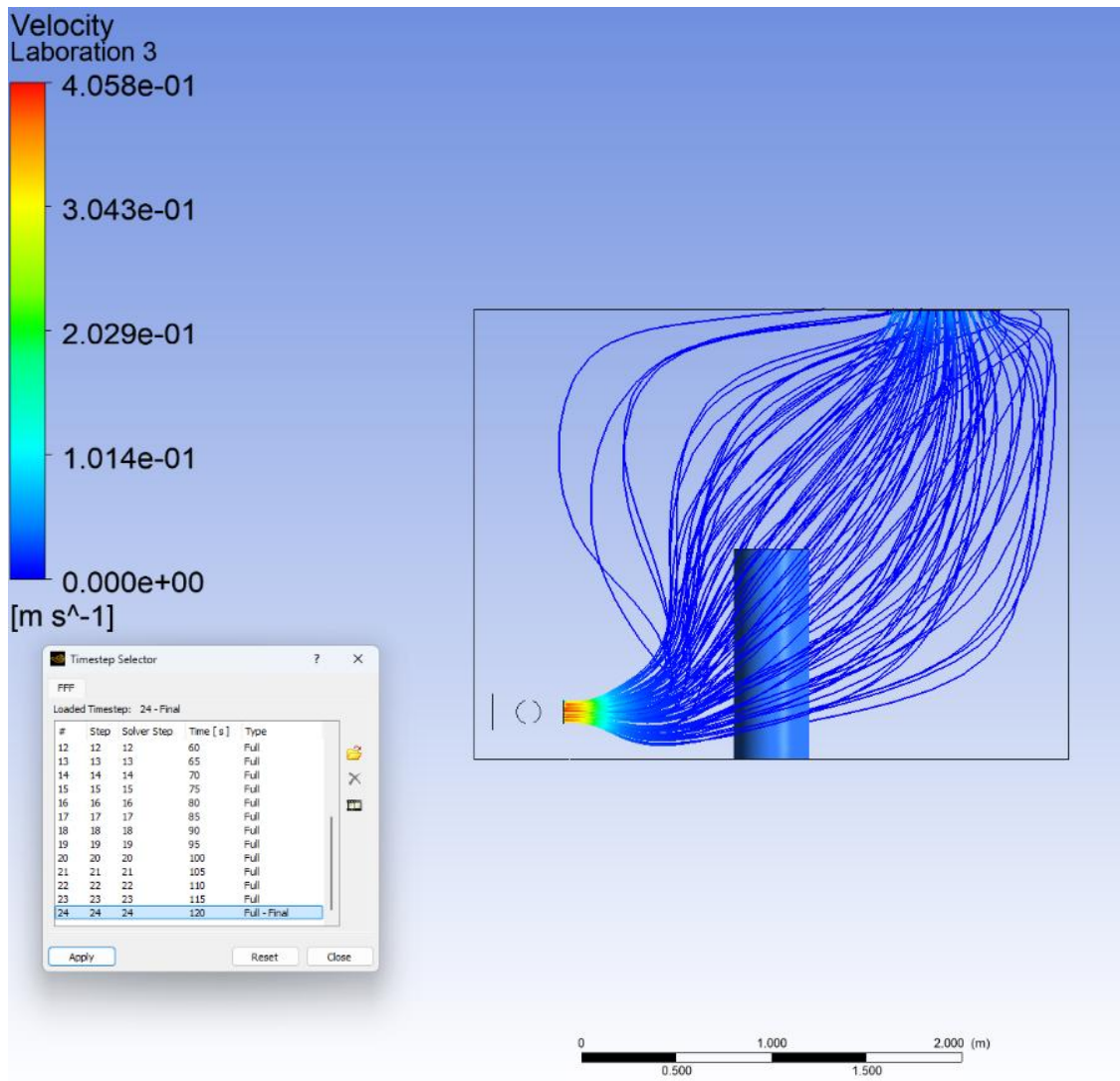
Bilaga 9: Rök som förorening, 75W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 1 minut. <https://youtu.be/1TZb556WtGs>



Bilaga 10: Rök som förorening, 75W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 2 minuter.
<https://youtu.be/1TZb556WtGs>



Bilaga 11: CFD-simulering, 75W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 1 minut.



Bilaga 12: CFD-simulering, 75W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 2 minuter.



Bilaga 13: Rök som tilluft, 225W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 10 l/s efter 1 minut. <https://youtu.be/iMI4Y4vhISl>



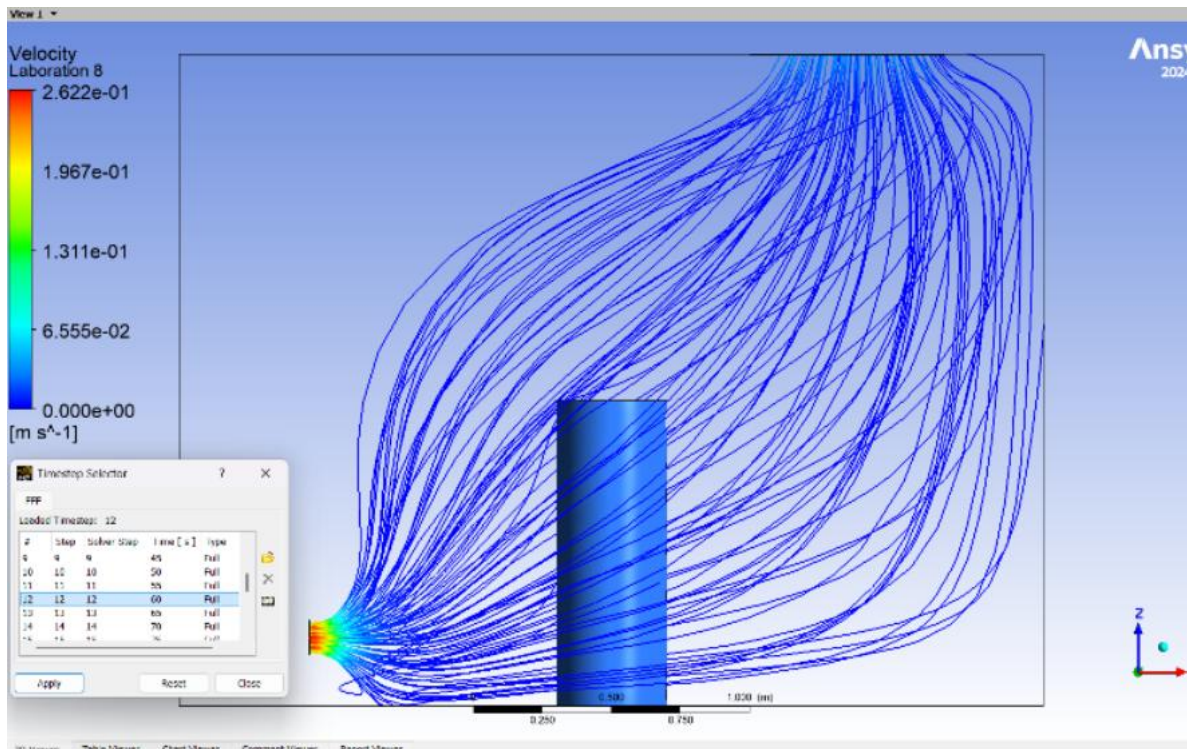
Bilaga 14: Rök som tilluft, 225W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 10 l/s efter 2 minuter. <https://youtu.be/iMI4Y4vhISl>



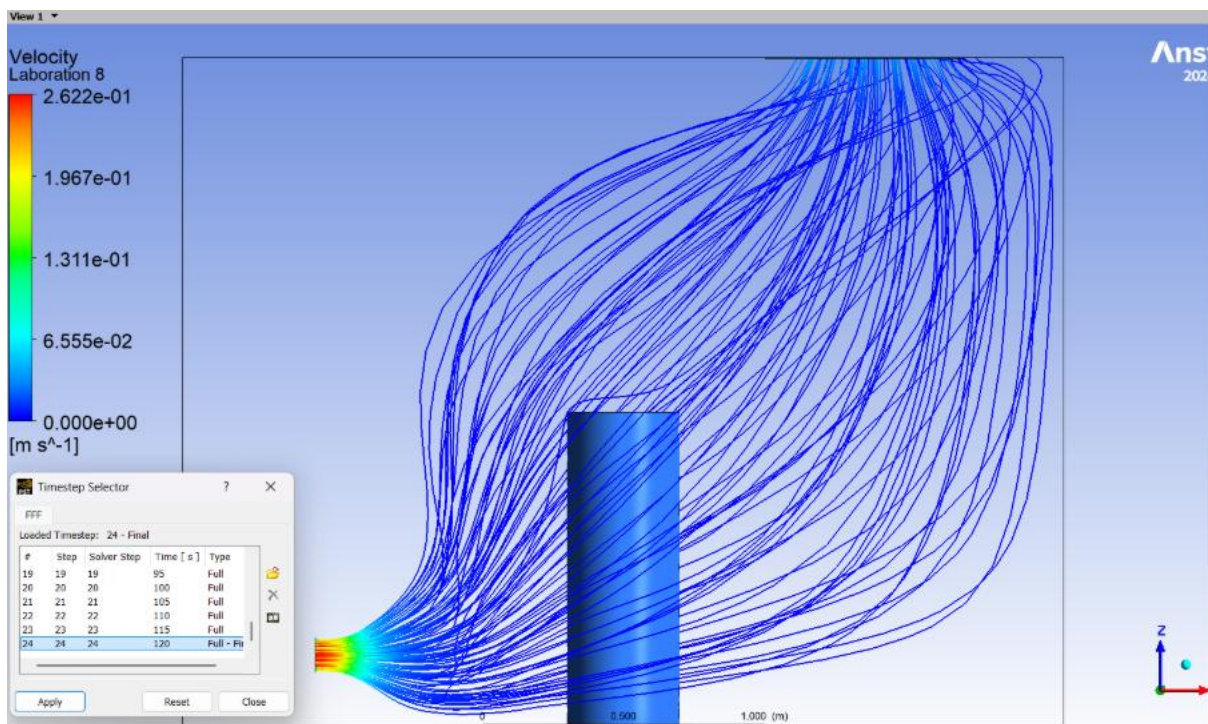
Bilaga 15: Rök som förorening, 225W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 10 l/s efter 1 minut. https://youtu.be/zXM4_BSIyfs



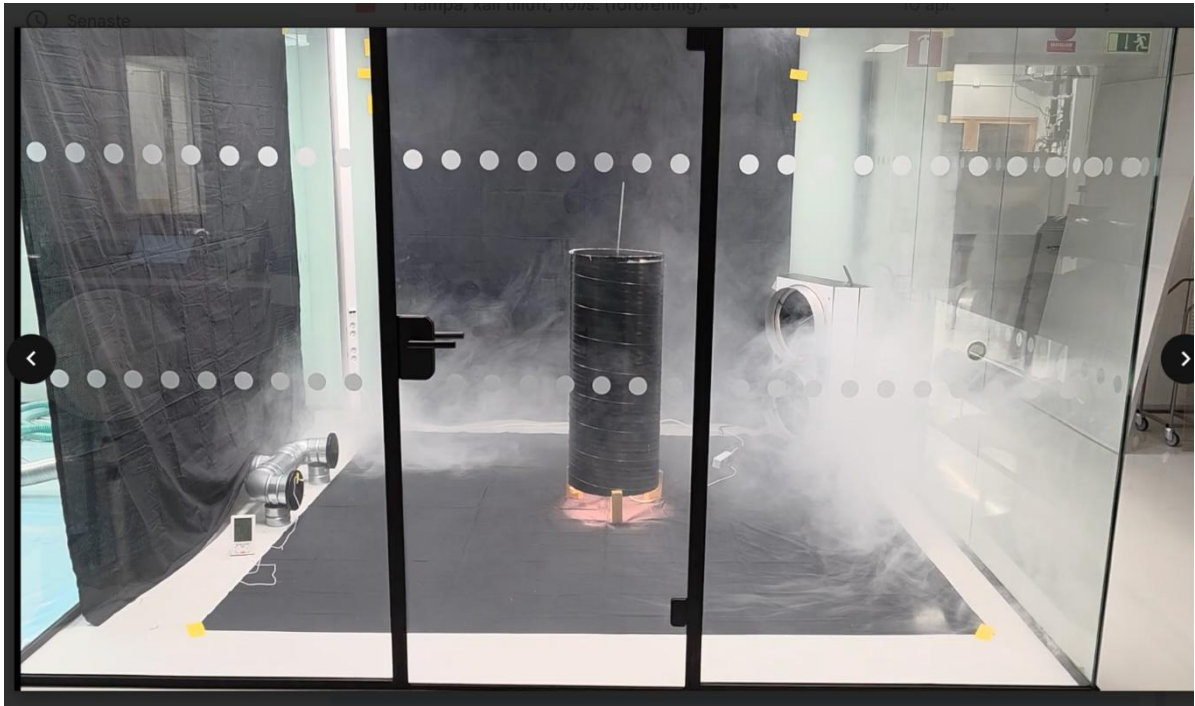
Bilaga 16: Rök som förorening, 225W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 10 l/s efter 2 minuter. https://youtu.be/zXM4_BSIyfs



Bilaga 17: CFD-simulering, 225W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 10 l/s efter 1 minut.



Bilaga 18: CFD-simulering, 225W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 10 l/s efter 2 minuter.



Bilaga 19: Rök som tilluft, 225W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 1 minut. <https://youtu.be/J-rxY3gMp-8>



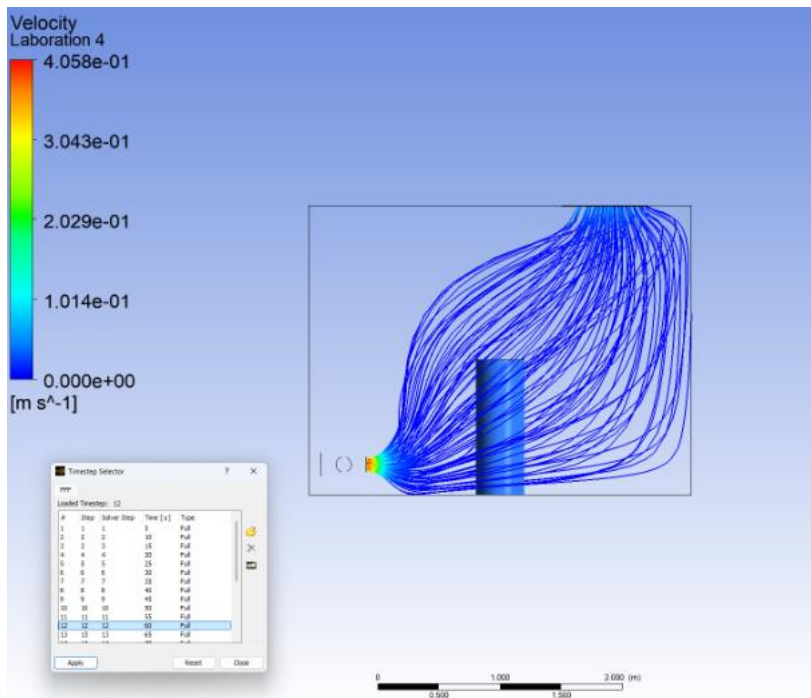
Bilaga 20: Rök som tilluft, 225W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 2 minuter. <https://youtu.be/J-rxY3gMp-8>



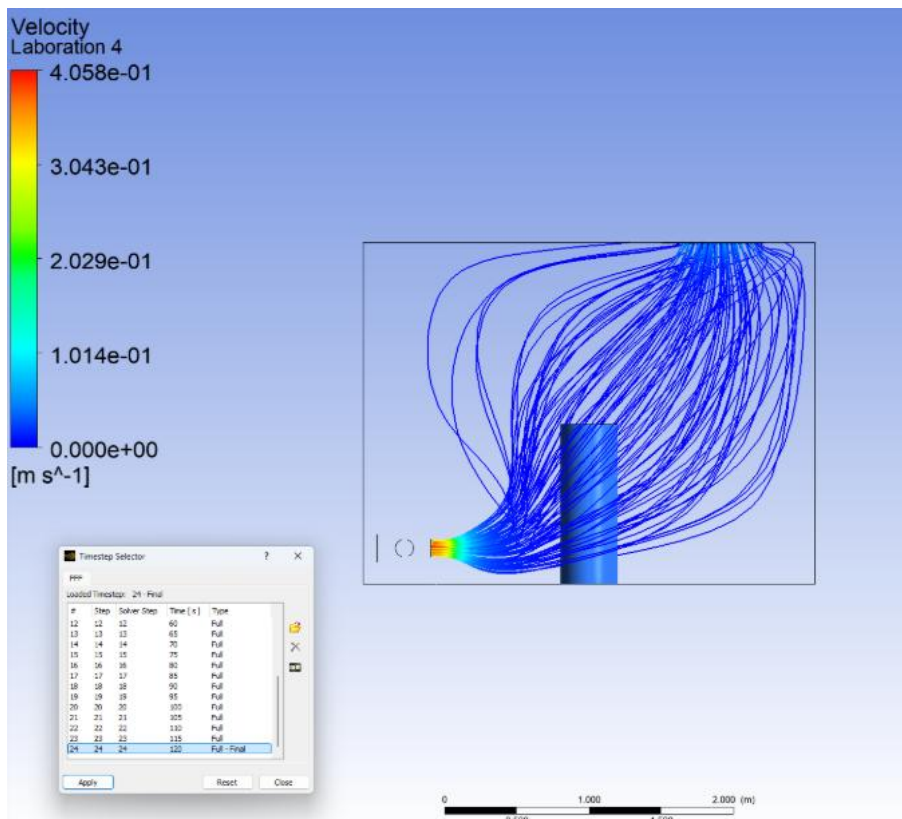
Bilaga 21: Rök som förorening, 225W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 1 minut.
<https://youtu.be/KwPFSKJJsOI>



Bilaga 22: Rök som förorening, 225W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 2 minuter.
<https://youtu.be/KwPFSKJJsOI>



Bilaga 23: CFD-simulering, 225W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 1 minut.



Bilaga 24: CFD-simulering, 225W, $\Delta T=1,2-1,7^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 2 minuter.



Bilaga 25: Rök som tilluft, 75W, $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 1 minut. https://youtu.be/Q_5hVhUR0LQ



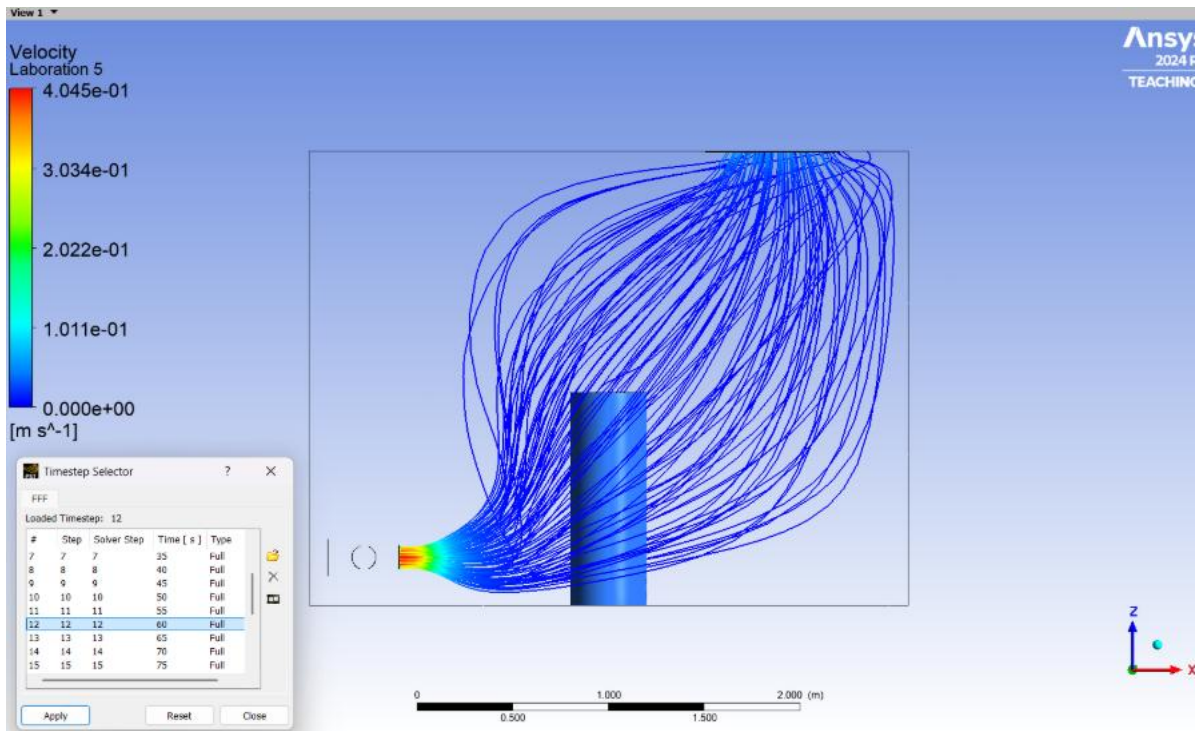
Bilaga 26: Rök som tilluft, 75W, $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 2 minuter. https://youtu.be/Q_5hVhUR0LQ



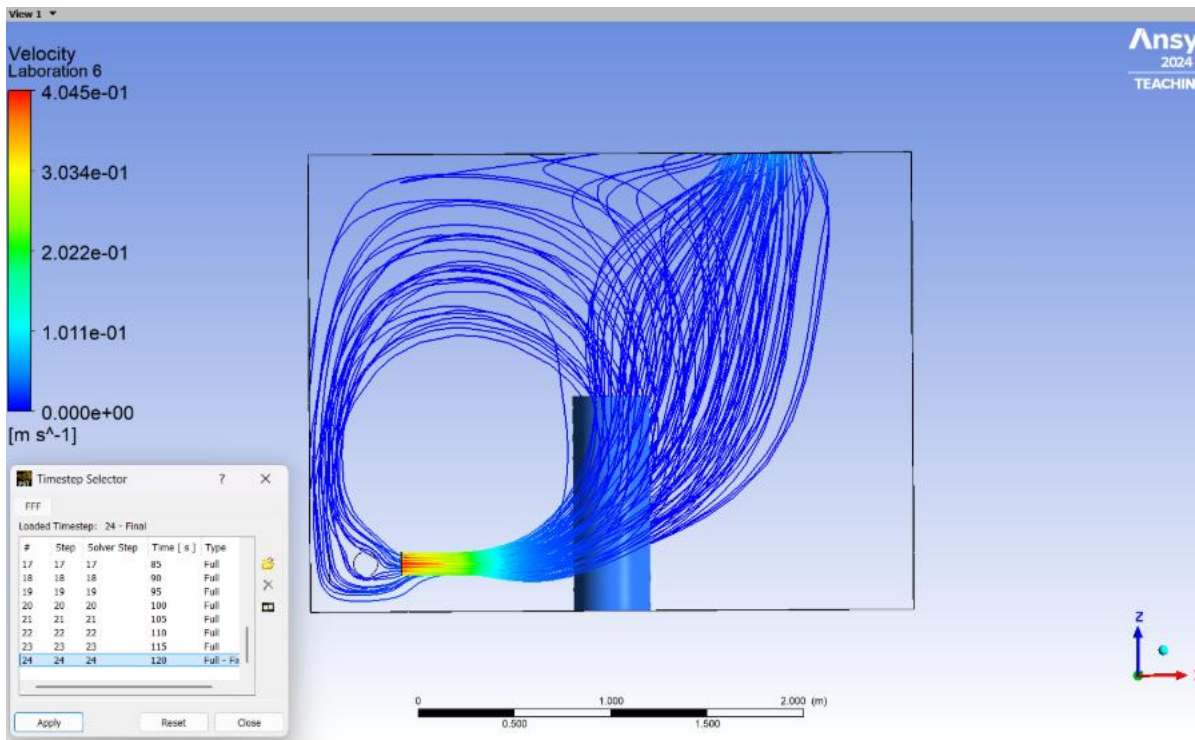
Bilaga 27: Rök som förorening, 75W, $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 1 minut. <https://youtu.be/3FN1IAXj9m0>



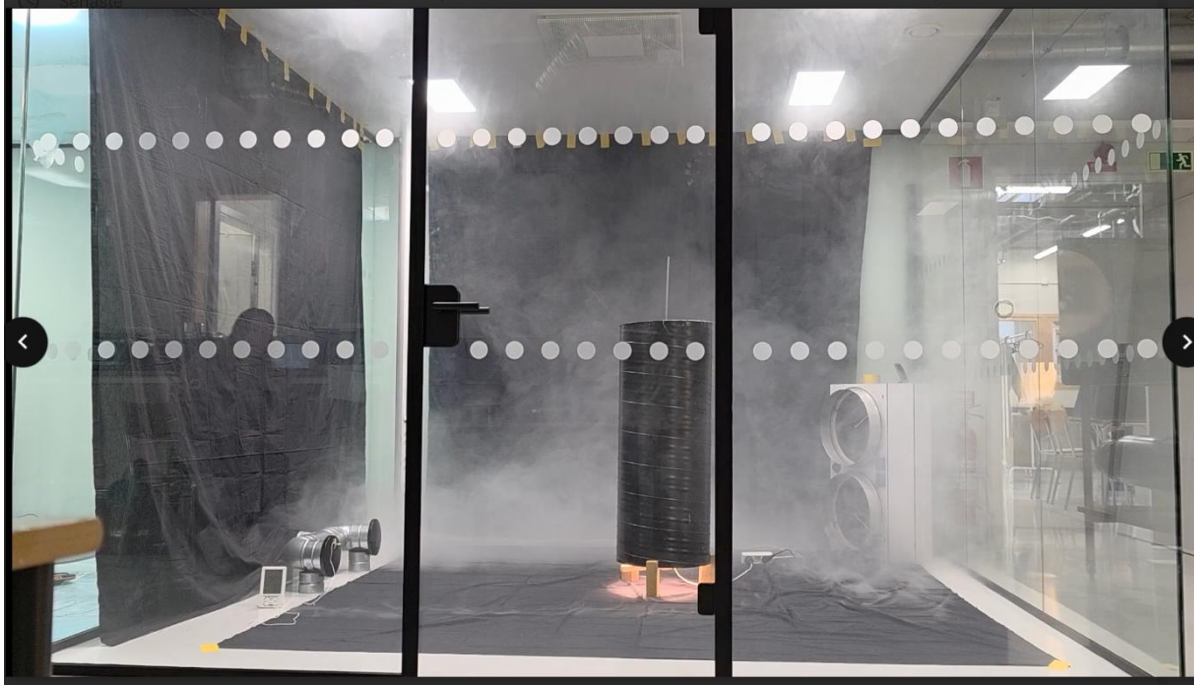
Bilaga 28: Rök som förorening, 75W, $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 2 minuter. <https://youtu.be/3FN1IAXj9m0>



Bilaga 29: CFD-simulering, 75W, $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 1 minut.



Bilaga 30: CFD-simulering, 75W, $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 2 minuter.



Bilaga 31: Rök som tilluft, 225W, $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 1 minut. <https://youtu.be/eyYn6xtZeto>



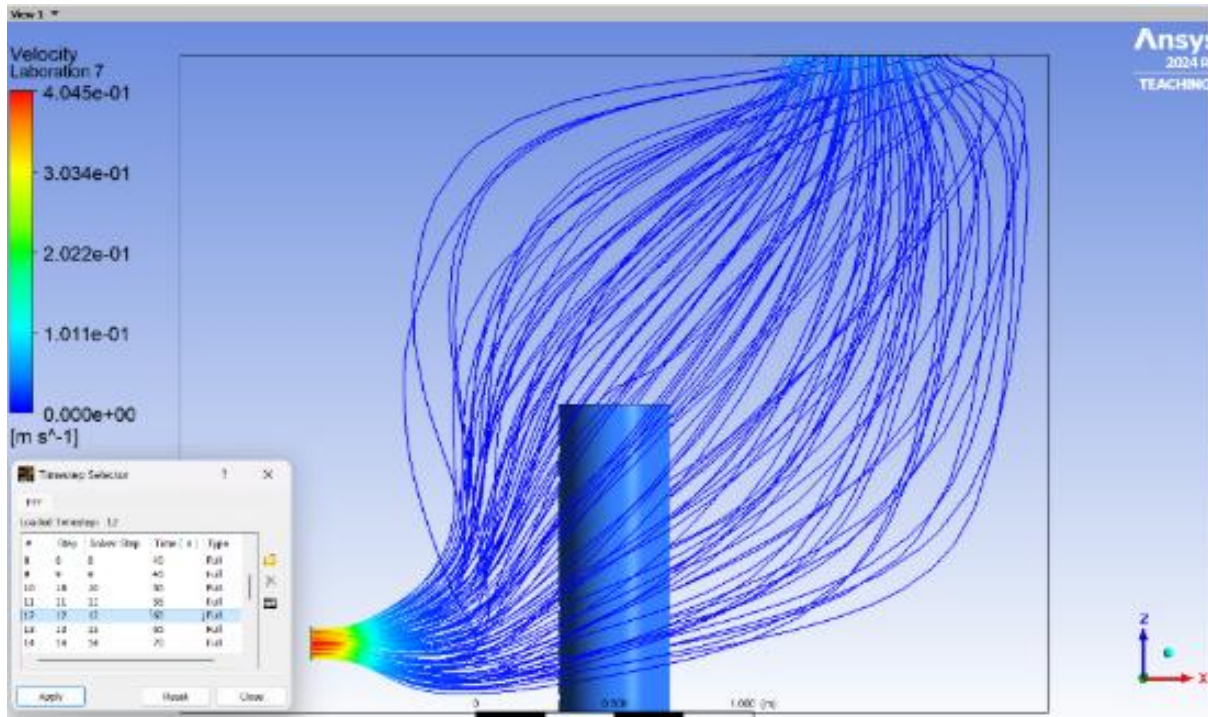
Bilaga 32: Rök som tilluft, 225W, $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 2 minuter. <https://youtu.be/eyYn6xtZeto>



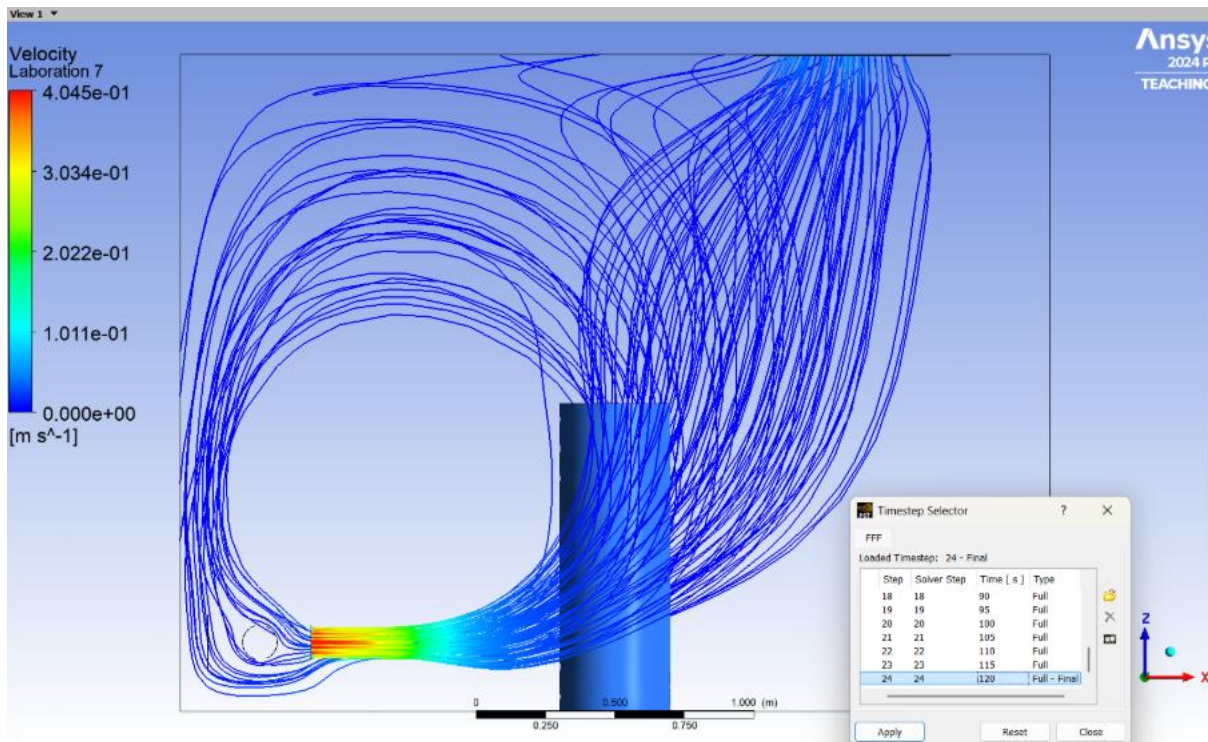
Bilaga 33: Rök som förorening, 225W, $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 1 minut. <https://youtu.be/Dq91qHNw5t0>



Bilaga 34: Rök som förorening, 225W, $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 2 minuter. <https://youtu.be/Dq91qHNw5t0>



Bilaga 35: CFD-simulering, 225W, $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 1 minut.



Bilaga 36: CFD-simulering, 225W, $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$, 15 l/s efter 2 minuter.

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH
SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA



CHALMERS