



CHALMERS

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

MMSX21-VT25-23

CFD-simuleringar av urbana värmeöar

Författare:

CARL HÖRFELT
caho@chalmers.se

CAROLINE STJERNLÖF
carstj@chalmers.se

ERNEST LASKOWSKI
ernestl@chalmers.se

Examinator:

GAETANO SARDINA
sardina@chalmers.se

Handledare:

ANGELA SASIC KALAGASIDIS
angela.sasic@chalmers.se

Abstract

This study will examine how the impact atmospheric stability have on airflow and temperature distribution in urban environments and it will focus on the urban heat island effect. Using the program STAR-CCM+ to conduct Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations, a simple two-dimensional urban model were created, with three stability conditions defined by the Richardson number, R_b , a stable case $R_b = 0.79$, neutral $R_b = 0$ and an unstable case $R_b = -0.21$.

The results presented that in the stable case, restricted vertical mixing resulted in a higher temperature close to the street level and lower temperatures above the buildings, this can affect the urban heat island effect. For the neutral case, no significant thermally driven flows were identified. The airflow was regulated by the mechanical wind forces. For the unstable case, showed vertical airflows and an effective heat transport, which was caused by heated surfaces.

This study highlighted the significance of including buoyancy effects in the simulations to capture airflow patterns and temperature distribution correctly, in particular in the unstable case. These results contribute to a better understanding of urban environments and the reduction of urban heat island effects through urban planning strategies.

Sammandrag

I denna studie undersöktes hur atmosfärisk stabilitet påverkar luftflöde och temperaturfördelning i urbana miljöer, med fokus på den urbana värmeöeffekten. Det genomfördes Computational Fluid Dynamics (CFD) simuleringar i programmet STAR-CCM+. En förenklad tvådimensionell modell av en stad gjordes och användes under tre olika stabilitetsförhållanden, definierade av Richardson-talet, R_b , det stabila fallet $R_b = 0.79$, det neutrala fallet $R_b = 0$ och det instabila fallet $R_b = -0.21$.

Resultatet visade att det stabila fallet begränsade den vertikala omblandningen, vilket resulterade i högre temperaturer vid gatunivå men lägre temperaturer över byggnaderna. Detta kan i sin tur bidra till den urbana värmeöeffekten. I det neutrala fallet noterades inte några termiskt drivna flöden. Luftcirkulationen styrdes främst av den mekaniska vinden. I det instabila fallet visade på vertikala luftströmmar och en effektiv värmetransport, vilket orsakades av uppvärmda ytor.

Denna studie uppmärksammar vikten av att inkludera betydelsen av bärkraftseffekter i simuleringarna för att kunna framställa luftflödesmönster och temperaturfördelningar, särskilt under de instabila atmosfäriska förhållandena. Resultaten bidrar till en ökad förståelse för urbana miljöer och hur de negativa effekterna kan minskas genom en medveten stadsplanering.

Förord

Den här rapporten presenterar de resultat vi kommit fram till i vårt kandidatarbete. Det har utförts på Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper på Chalmers Tekniska Högskola.

Tackord

Vi vill rikta ett stort tack till vår examinator Gaetano Sardina och vår handledare Angela Sasic Kalagasidis för deras värdefulla vägledning och stöd som gjort detta arbete möjligt.

Innehåll

1	Introduktion	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	2
1.3	Avgränsning	2
2	Teori	4
2.1	Finita Volym Metoden	4
2.2	Reynolds Averaged Navier-Stokes	5
2.2.1	Kontinuitetsekvationen	5
2.2.2	Rörelsemängdekvationen	6
2.2.3	Energiekvationen	6
2.2.4	K-Epsilon model	6
2.2.5	Vindhastighetsprofilen	7
2.3	Reynolds transportteorem	8
2.4	Randvillkor	8
2.4.1	Dirichlet-villkor	9
2.4.2	Neumann-villkor	9
2.4.3	Robin-villkor	9
2.5	Richardson-talet (R_b)	10
2.6	Bärkraft och koppling i CFD-simuleringar	11
2.6.1	Bärkraft (Buoyancy) - Bärighet	11
2.6.2	Koppling (Coupling)	12
3	Metod	14
3.1	Modelluppbyggnad	14
3.2	Meshkonvergensstudie	16
3.3	Simuleringar	16
3.3.1	Konvektion och konduktion	16
3.3.2	Simuleringsfall 1: Stabil skiktning ($R_b = 0.79$)	17
3.3.3	Simuleringsfall 2: Neutral skiktning ($R_b = 0$)	17
3.3.4	Simuleringsfall 3: Instabil skiktning ($R_b = -0.21$)	17
3.3.5	Randvillkor	18
3.3.6	Vindhastighetsprofil	19
3.4	Line probe och datainsamling	20
3.5	Dataanalys	20

4	Resultat	22
4.1	Simulering fall 1 ($R_b = 0.79$)	22
4.1.1	Stabilt fall utan bärighet	22
4.1.2	Stabilt fall med bärighet	25
4.2	Simulering fall 2 ($R_b = 0$)	28
4.2.1	Neutralt fall med bärighet	28
4.3	Simulering fall 3 ($R_b = -0.21$)	30
4.3.1	Instabilt fall utan bärighet	30
4.3.2	Instabilt fall med bärighet	33
5	Diskussion	36
5.1	Slutsats	37
6	Referenser	38
7	Appendix	39
7.1	Python-kod för logaritmisk vindhastighetsprofil	39

1 Introduktion

Detta avsnitt presenterar bakgrunden till urbana värmeöar, deras orsaker samt konsekvenser, och CFD-simuleringar som används för att studera temperatur- och luftflöden i stadsmiljöer.

1.1 Bakgrund

I takt med att städerna blir större och mer tätbefolkade förändras också det lokala klimatet (Zografos, Toparlak & Blocken, 2024). Ett märkbart fenomen är den urbana värmeön, den uppstår när stadsmiljöer har en påtagligt högre temperatur än de landsbygdsområden som omger staden. Temperaturskillnaden är en konsekvens av hur städerna används och hur de konstrueras. I samband med ökade värmeböljor och klimatförändringar är den urbana värmeön ett intressant och vetenskapligt ämne som utgör ett växande samhällsproblem.

Den urbana värmeöeffekten bildas främst från den byggda omgivningen. Ytor i staden såsom asfalt, tegel eller betong, är ofta mörka och de absorberar stora mängder av solljus på dagen. Dessa material lagrar energin och avger långsamt under kväll och natt till skillnad från naturliga ytor som reflekterar bort eller reglerar värmen. Detta orsakar ständig temperaturhöjning som sedan håller dygnet runt.

Den förhöjda värmeöeffekten påverkas också av bristen på vegetation i stadsmiljöer. Detta innebär att naturliga kylprocesser såsom avdunstning eller skugga försvagas. Grönområden har ersatts med byggnader och mörka ytor och naturliga funktioner för temperaturregulationer förloras. På landsbygder, där mängden vegetation är större och mer utbredd, kan temperaturen hållas lägre med dessa naturliga funktioner.

Utöver detta är mänsklig aktivitet en bidragande faktor till värmeökningen. Energianvändningen i städer är stor och avger mycket värme, det kan komma från till exempel fordon, uppvärmnings- och kylsystem eller fabriker. Det skapas ett klimat i städerna som inte bara är varmare utan också mer känsligt för extrema väder. De urbana värmeöarna kan leda till värmeböljor i städerna och kan orsaka värmestress hos människor, särskilt sjuka eller äldre. Värmeböljorna kan också medföra ökad risk för uttorkning eller värmeslag och i extremfall dödsfall.

För att hitta förståelse och metoder för att motverka de negativa effekterna är vindtunnelexperiment ett bra tillvägagångssätt. Det bygger fläktar som blåser in luft i ett rör där det placeras ett föremål som ska studeras, i detta fall en stadsmodell. På så sätt kan vindens påverkan på städer studeras i mindre skala. Detta har tidigare studerats där det togs fram hastighets- samt temperaturprofiler för en enkel stadsmodell i 2 dimensioner (Santese et al., 2007), vilket detta arbete baseras på.

I detta arbete används datorsimuleringar, Computational Fluid Dynamics (CFD) i programmet Star CCM+, vilket är ett alternativ till vindtunnel vid studerande av urbana värmeöar. Genom att använda CFD kan olika simuleringar utföras och i sin tur visualisera beteendet för temperaturer och vindar i en stad. Sedan läggs randvillkor på för de olika fallen som ska visa hur värmen rör sig under de olika förhållandena. För att göra simuleringssmodellen tillförlitlig måste den verifieras med hjälp av verklig mätdata. I detta arbete kommer inte sådana vindtunnelresultat utföras och därför används vindtunnelresultat från ett tidigare arbete (Santese et al., 2007).

1.2 Syfte

Syftet med rapporten är att verifiera vindtunnelresultat samt simuleringar från tidigare studier med hjälp av CFD och på så sätt lägga en grund för en pålitlig simuleringssmodell för urbana värmeöar.

1.3 Avgränsning

Simuleringar kommer att utföras på en förenklad tvådimensionell stadsmodell som ska efterlikna ett tidigare arbete. Bild på stadsmodellen med tillhörande mått hittas i kapitel 3.1.

Studien avgränsas till tre specifika atmosfäriska stabilitetsförhållanden (stabil, neutralt och instabil) definierade genom Richardson-talet. Dessa tre fall representerar typiska förhållanden som kan påverka urbana värmeöar, men täcker inte hela spektrumet av möjliga atmosfäriska tillstånd.

Modellen bortser från ett antal faktorer som kan påverka urbana värmeöar i verkliga stadsmiljöer, såsom:

- Tredimensionella effekter och gatugeometrier
- Vegetation och dess kylande effekter
- Antropogena värmekällor (fordon, byggnaders värmeutsläpp, etc.)
- Materialdiversitet i urban bebyggelse
- Dygns- och säsongsvariationer i temperatur och solstrålning

Vidare fokuserar studien enbart på luftflöden och temperaturfördelning, medan andra faktorer som kan påverka urbant mikroklimat, till exempel luftfuktighet och föroreningsspridning, inte undersöks.

2 Teori

I detta avsnitt presenteras teoretiska grunder för de numeriska metoderna och fysikaliska principer som används i simuleringarna på urbana värmeöar.

2.1 Finita Volym Metoden

Finita volym-metoden (FVM) är en numerisk metod som används för att lösa partiella differentialekvationer, särskilt inom fluidmekanik simuleringar. Metoden bygger på att bevara de fysikaliska lagarna över en kontrollvolym snarare än enskilda punkter. Domänen delas upp i ett ändligt antal kontrollvolym (celler), där varje volym representerar en diskret approximation av den kontinuerliga ekvationen. I den här studien av urbana värmeöar är FVM avgörande för att korrekt modellera temperatur- och flödesfälten runt byggnader, särskilt för de komplexa interaktionerna i gatukanjoner.

Nedan härleds FVM för en dimensionell ekvation:

Utgångspunkt är bevarandeekvationen:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial f(u)}{\partial x} = 0. \quad (1)$$

Domänen delas upp i kontrollvolym $[x_{i-1/2}, x_{i+1/2}]$ med cellcenter x_i och bredd Δx . Integrering över en kontrollvolym ger:

$$\int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \frac{\partial u}{\partial t} dx + \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \frac{\partial f}{\partial x} dx = 0. \quad (2)$$

Genom att tillämpa Gauss sats på flödestermen erhålls:

$$\frac{d}{dt} \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} u dx + [f(u_{i+1/2}) - f(u_{i-1/2})] = 0. \quad (3)$$

Cellmedelvärdet approximeras av u :

$$\int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} u dx \approx u_i \Delta x. \quad (4)$$

Insättning ger:

$$\frac{du_i}{dt} + \frac{1}{\Delta x} [f(u_{i+1/2}) - f(u_{i-1/2})] = 0. \quad (5)$$

Om $f(u) = u^2$, blir ekvationen:

$$\frac{du_i}{dt} = \frac{1}{\Delta x} [u_{i+1/2}^2 - u_{i-1/2}^2]. \quad (6)$$

Detta är en grundläggande finite volume-diskretisering i 1D, vilket i modellen utökas till 2D för att hantera de komplexa flödesförhållandena i urbana miljöer.

2.2 Reynolds Averaged Navier-Stokes

Computational Fluid Dynamics eller CFD-mjukvaror använder sig av Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) för att beräkna olika fluidflödeproblem. RANS-modellen använder sig av en metodik där man tidmedelvärderar Navier-Stokes partiella differentialekvationer (PDE) för att uppskatta fluidens beteende för främst icketurbulenta flöden eller så kallade laminära flöden. Dessa PDE:er beskriver fluidens olika fysikaliska egenskaper såsom viskositet, tryck, hastighet, densitet och kommer övergripigt beskrivas nedan. I denna studie är RANS-ekvationerna centrala för att modellera luftflödet runt byggnader och hur detta påverkas av olika stabilitetsförhållanden enligt Richardson-talet.

2.2.1 Kontinuitetsekvationen

Kontinuitetsekvationen beskriver hur fluidens massa bevaras över tid, det vill säga förändringen av densiteten är noll för inkompressibla flöden. I den här urbana värmeöstudien säkerställer denna ekvation att massbalansen upprätthålls i luftflödet, vilket är grundläggande för korrekta simuleringsresultat.

$$\frac{d}{dt} \left(\int_{cv} \rho dV \right) + \int_{cs} \rho (\mathbf{V}_r \cdot \mathbf{n}) dA = 0 \quad (7)$$

2.2.2 Rörelsemängdekvationen

Rörelsemängdekvationen eller momentumekvationen har sitt ursprung från Newtons andra lag ($F = ma$) som sedan har applicerats på fluidmekanik. Den definierar hur rörelsemängden av en fluid förändras och bevaras över tid. Den här studien, av värmeöar, är denna ekvation avgörande för att förstå hur temperaturskillnader påverkar luftrörelser genom förändrad densitet.

$$\sum \mathbf{F} = \frac{d}{dt} \left(\int_{cv} \mathbf{V} \rho dV \right) + \int_{cs} \mathbf{V} \rho (\mathbf{V}_r \cdot \mathbf{n}) dA \quad (8)$$

2.2.3 Energiekvationen

Energiekvationen, som är en del av Navier-Stokes ekvationssystem, beskriver hur energin i en fluid bevaras eller förändras över tid. Den tar hänsyn till energitransport genom konvektion och värmeledning, arbete utfört av tryck- och viskösa krafter, samt eventuella externa energikällor eller sänkor. Energin i systemet förblir inte konstant i simuleringar där värme tillförs eller avges, där mekaniskt arbete utförs, eller där kemiska reaktioner sker. I denna studie är denna ekvation central för att modellera hur värme överförs mellan ytor och luft i urban miljö.

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\int_{cv} e \rho dV \right) + \int_{cs} e \rho (\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) dA \quad (9)$$

2.2.4 K-Epsilon modell

Som tidigare beskrivs används Navier-Stokes ekvationer bäst i laminära flöden och därav behöver det i RANS-modellen appliceras en K-epsilon modell för att modellera eventuell turbulens som uppstår i systemet. K-epsilon är en av de mest förekommande turbulensmodeller och är en tvåekvationsmodell som introducerar två extra transportekvationer för att representera turbulenta egenskaper i flödet. I denna studie är denna modell avgörande för att fånga de turbulenta flöden som uppstår runt byggnader och i gatukanjoner under olika stabilitetsförhållanden.

k-ekvationen: Beskriver turbulent kinetisk energi (k), som representerar energin i turbulenta fluktuationer.

$$k(z) = \frac{u_*^2}{C_\mu^{1/2}} \left(1 - \frac{z}{\delta}\right)$$

ε -ekvationen: Beskriver dissipationshastigheten av turbulent kinetisk energi (ε), alltså hur snabbt turbulent energi omvandlas till värme genom viskösa krafter.

$$\varepsilon(z) = \frac{u_*^3}{\kappa z} \left(1 - \frac{z}{\delta}\right)$$

2.2.5 Vindhastighetsprofilen

I CFD-simuleringar är det vanligt förekommande att använda sig av en logaritmisk hastighetsprofil för att beskriva gränsskikt över terräng. Denna profil är särskilt viktig i den här studien för att efterlikna den realistiska vindhastighetsfördelningen i höjddled, vilket avsevärt påverkar flöden i gatukanjoner och därmed urbana värmeöar.

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z - d}{z_0} \right) \quad (10)$$

Där:

- u_* är friktionshastigheten
- κ (≈ 0.41) är von Kármáns konstant
- z_0 är den aerodynamiska strävheten (roughness length)
- d är nollplansförskjutningen

2.3 Reynolds transportteorem

För att kunna formulera de fundamentala bevarandelagarna inom fluidmekanik, såsom kontinuitetsekvationen, rörelsemängdsekvationen och energiekvationen, används Reynolds transportteorem. Detta teorem möjliggör övergången från en Lagrange-beskrivning, som följer en fluidpartikel, till en Euler-beskrivning, som fokuserar på en kontrollvolym. I studien av urbana värmeöar utgör detta teorem den teoretiska grunden för hur analys av energi- och massbalanser i det urbana gränsskiktet kan utföras.

Reynolds transportteorem uttrycks generellt som:

$$\frac{d}{dt} \int_{CV} \phi dV + \int_{CS} \phi(\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) dA = \int_{CV} \frac{\partial \phi}{\partial t} dV + \int_{CS} \phi(\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) dA$$

där:

- ϕ är en godtycklig flödesegenskap (exempelvis densitet, ρ , rörelsemängd eller energi),
- **CV** står för kontrollvolym, alltså den fixerade volymen över vilken ekvationerna formuleras,
- **CS** är kontrollytan som omger kontrollvolymen,
- **V** är fluidens hastighetsvektor, och
- **n** är ytans normala vektor.

Detta teorem ligger till grund för formuleringen av de tre fundamentala bevarandelagarna för massa, rörelsemängd och energi.

2.4 Randvillkor

Vid numerisk lösning av partiella differentialekvationer måste randvillkor specificeras för att problemet ska vara väldefinierat och lösbart. I den här studien av urbana värmeöar är korrekt specificering av randvillkor avgörande för att kunna skapa realistiska simuleringar av de olika stabilitetsförhållandena enligt Richardson-talet.

2.4.1 Dirichlet-villkor

Dirichlet-villkor innebär att en funktions värde är specificerat på randen av domänen. Det kan exempelvis innebära att temperaturen eller hastigheten är given vid gränsen. I den här studien används dessa villkor för att specificera de olika temperaturer vid inloppet och markytan som krävs för att skapa stabil, neutral eller instabil skiktning.

$$u = g(x) \quad \text{på randen} \quad (11)$$

Här är $g(x)$ en känd funktion som specificerar värdet av u på randen.

2.4.2 Neumann-villkor

Neumann-villkor innebär att derivatan (flödet) av en funktion är specificerad vid randen. Detta motsvarar att exempelvis ett värmefflöde eller en hastighetsgradient är given vid gränsen. I den här urbana värmeöstudie skulle detta kunna användas för att specificera värmefflöden från byggnadsytor.

$$\frac{\partial u}{\partial n} = h(x) \quad \text{på randen} \quad (12)$$

där $\frac{\partial}{\partial n}$ är derivatan i normalriktningen mot randen och $h(x)$ är en känd funktion.

2.4.3 Robin-villkor

Robin-villkor är en kombination av Dirichlet- och Neumann-villkor, där både funktionen och dess derivata förekommer i en linjär kombination. Robinvillkor används ofta för att modellera till exempel konvektiv värmeöverföring eller delvis reflekterande gränser. I aktuell studie kan dessa villkor vara relevanta för att modellera värmeöverföring mellan byggnadsytor och omgivande luft.

$$\alpha u + \beta \frac{\partial u}{\partial n} = r(x) \quad \text{på randen} \quad (13)$$

där α , β och $r(x)$ är kända konstanter eller funktioner.

2.5 Richardson-talet (Rb)

Richardson-talet (Rb) är ett dimensionslöst tal som används inom fluidmekanik för att kvantifiera atmosfärisk stabilitet. Detta tal är särskilt viktigt vid studier av urbana värmeöar och luftflöden i städer eftersom det beskriver förhållandet mellan termisk konvektion och mekanisk turbulens orsakad av vindhastighetsgradienter. I den genomförda studien utgör Richardson-talet den centrala parametern för att karakterisera olika atmosfäriska stabilitetsförhållanden och systematiskt undersöka deras effekter på urbana värmeöar.

Richardson-talet definieras matematiskt som:

$$R_b = \frac{gH(T_H - T_0)}{(U_H^2 T)} \quad (14)$$

Där:

- g är gravitationsaccelerationen [m/s²]
- H är den karakteristiska höjden, exempelvis byggnadshöjd [m]
- T_H är temperaturen vid höjden H [K]
- T_0 är markytans temperatur [K]
- U_H är vindhastigheten vid höjden H [m/s]
- T är medeltemperaturen [K]

Richardson-talet tolkas enligt följande:

- $R_b > 0$: Stabil skiktning - varmare luft befinner sig ovanför kallare luft, vilket hämmar vertikal blandning och turbulens
- $R_b = 0$: Neutral skiktning - ingen termisk drivkraft för vertikala rörelser
- $R_b < 0$: Instabil skiktning - kallare luft befinner sig ovanför varmare luft, vilket främjar vertikal blandning och konvektion

Vid studier av urbana värmeöar används Richardson-talet för att karakterisera olika atmosfäriska förhållanden och deras påverkan på luftcirkulation och temperaturfördelning i gatuklyftor (street canyons). Genom att manipulera temperaturdifferenser mellan mark eller väggytor och omgivande luft i experiment eller simuleringar kan olika stabilitetsnivåer uppnås och deras effekter på urbana klimatförhållanden studeras systematiskt.

2.6 Bärkraft och koppling i CFD-simuleringar

I studier av urbana värmeöar och atmosfärisk stabilitet är det avgörande att förstå hur bärkraft (buoyancy) och koppling (coupling) mellan temperatur- och flödesfält påverkar simuleringarnas resultat. Dessa mekanismer är särskilt viktiga vid studier av olika stabilitetsfaktorer enligt Richardson-talet.

2.6.1 Bärkraft (Buoyancy) - Bärighet

Bärkraft är ett fysikaliskt fenomen som uppstår på grund av densitetsskillnader i en fluid under inverkan av ett gravitationsfält. I atmosfäriska sammanhang skapas dessa densitetsskillnader huvudsakligen genom temperaturvariationer. Varmare luft har lägre densitet än kallare luft och tenderar därför att stiga uppåt.

Bärkraften per volymenhet kan beskrivas matematiskt som:

$$\mathbf{F}_b = (\rho - \rho_0)\mathbf{g} \quad (15)$$

Där ρ är fluidens lokala densitet, ρ_0 är referensdensiteten och \mathbf{g} är gravitationsaccelerationen. Genom Boussinesq-approximationen, som ofta används i CFD-simuleringar för fall med små temperaturskillnader, kan bärkraften uttryckas i termer av temperaturskillnader:

$$\mathbf{F}_b \approx -\rho_0\beta(T - T_0)\mathbf{g} \quad (16)$$

Där β är den termiska expansionskoefficienten, T är lokal temperatur och T_0 är referenstemperaturen.

I gjorda simuleringar är bärkraften en avgörande parameter, särskilt för det instabila fallet ($R_b = -0,21$) där den varma markytan driver uppåtgående luftströmmar, och för det stabila fallet ($R_b = 0,79$) där den tenderar att hämma vertikal blandning.

2.6.2 Koppling (Coupling)

Koppling i CFD-sammanhang refererar till graden av interaktion mellan olika fysikaliska processer i simuleringen, i detta fall mellan temperatur- och flödesfält. När koppling aktiveras i simuleringen, tillåts temperaturförändringar att påverka flödesfältet genom bärkraft och andra mekanismer, och samtidigt påverkar flödesfältet temperaturfördelningen genom advektiva och konvektiva processer.

Man skiljer mellan två huvudtyper av koppling:

- **Envägs-koppling** (one-way coupling): Temperaturfördelningen beräknas baserat på ett fixerat flödesfält, men återkopplingen från temperatur till flöde inkluderas inte. Detta är en förenklad metod som kan vara tillräcklig för fall där bärkraften har minimal inverkan på flödet.
- **Tvåvägs-koppling** (two-way coupling): Både temperatur- och flödesfält beräknas samtidigt med full hänsyn till deras ömsesidiga påverkan. Denna metod är mer fysikaliskt korrekt, särskilt för fall där bärkraften spelar en betydande roll, som vid starkt stabila eller instabila förhållanden.

I den här studien genomfördes två simuleringsfall, stabilt och instabilt, både med och utan aktiverad koppling (buoyancy), för att systematiskt undersöka hur bärkraftens inverkan på flödesfältet påverkar simuleringarnas resultat. Detta är särskilt viktigt för att förstå dynamiken i urbana värmeöar, där temperaturskillnader mellan byggnader, gator och omgivande luft kan skapa lokala cirkulationsmönster som påverkar både komfort och spridning av föroreningar. I det neutrala fallet är bärkraftens inverkan försumbar då det för vertikal luftrörelse saknas termisk drivkraft, som tidigare nämnts.

När koppling aktiveras i simuleringarna, inkluderas bärkraftseffekter i rörelsemängds-
ekvationen:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} \beta (T - T_0) \quad (17)$$

Där den sista termen representerar bärkraftens bidrag till flödesfältet.

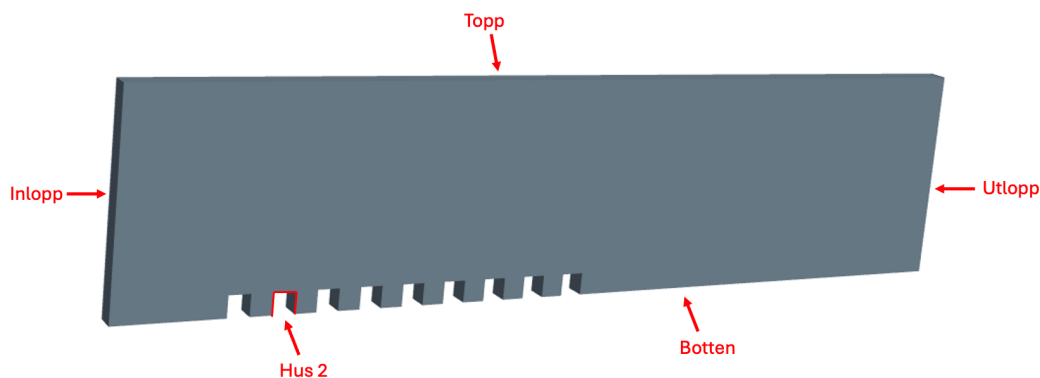
3 Metod

I metoden beskrivs hur en tvådimensionell stadsmodell framställdes och simulerades i en CFD-programvara, STAR CCM+, för att studera urbana värmeöar.

3.1 Modelluppbyggnad

Modellen som används i denna studie är en förenklad representation av en tvådimensionell stadsmiljö. Förenklingen är nödvändig eftersom beräkningarnas komplexitet och flödesdynamikens beteende ökar exponentiellt med en mer avancerad geometri.

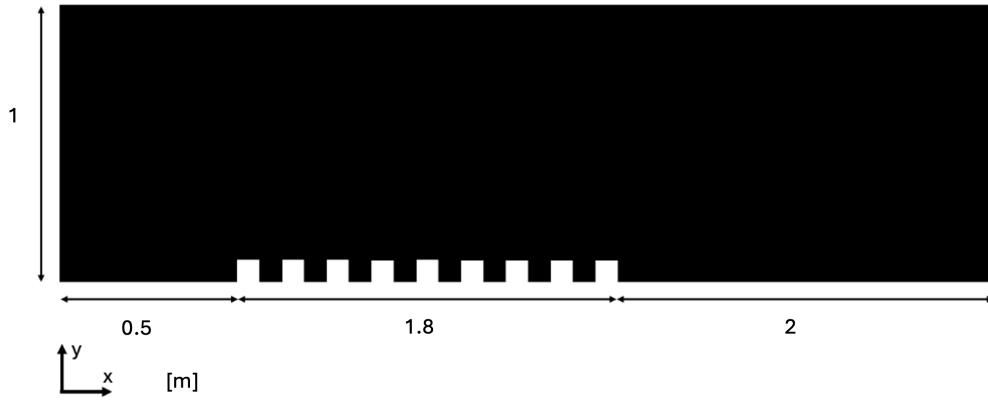
Modellen består av ett inlopp, ett utlopp, en botten och ett övre plan, enligt figur 1 nedan. Fluiden flödar in genom modellens inlopp och passerar därefter genom området mellan byggnaderna innan den lämnar domänen genom utloppet. Byggnaderna representeras av kvadratiska former placerade på bottenytan.



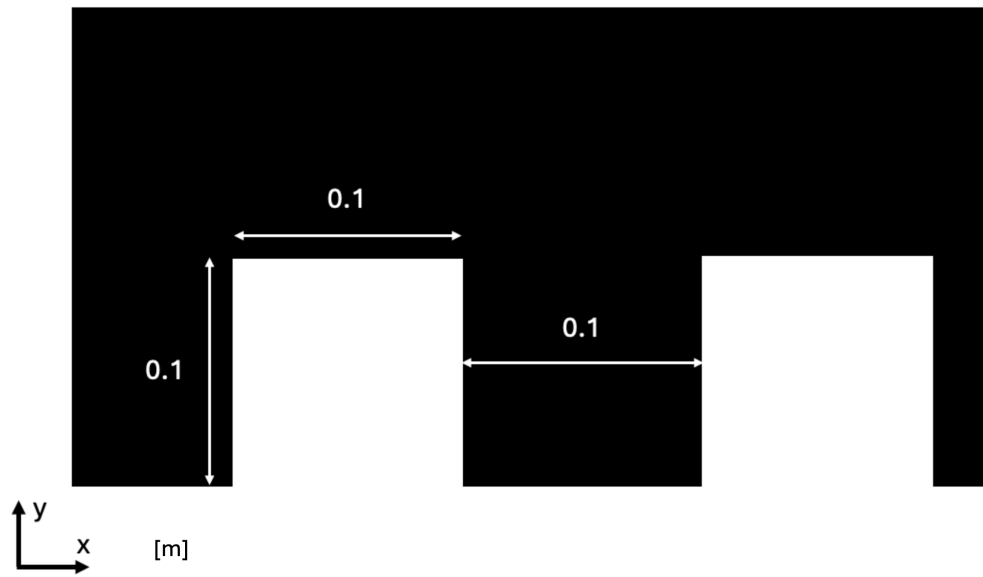
Figur 1: Förenklad modell av en stadsmiljö

Eftersom modellen är relativt enkel konstruerades geometrin direkt i STAR-CCM+ utan behov av externa CAD-program.

Dimensionerna i modellen är baserade på skalade proportioner från en förenklad representation av en stadsmiljö sedd från sidan. Exakta mått och placeringar framgår av figur 2 och 3.



Figur 2: Mått för hela stadsmodellen



Figur 3: Byggnadsmått

3.2 Meshkonvergenstudie

För att säkerställa att resultaten från simuleringarna inte påverkades av meshstorleken utfördes ett meshkonvergenstest. Testet genomfördes genom att simulera flera fall med olika basstorlekar på meshen, vilka redovisas i tabell 1 nedan. Hastighetsfältet jämfördes mellan de olika fallen. Det observerades att skillnaden mellan Test 3 (5 mm) och Test 4 (2.5 mm) var försumbar, vilket indikerar att resultatet hade konvergerat. För att uppnå en balans mellan beräkningskostnad och noggrannhet valdes därför en meshstorlek på 5 mm för de fortsatta simuleringarna.

Meshkonvergenstest	Mesh Storlek
1	15 mm
2	10 mm
3	5 mm
4	2.5 mm

Tabell 1: Meshkonvergenstudie

3.3 Simuleringar

För att undersöka hur atmosfärisk stabilitet påverkar luftflöden och temperaturfördelningar i urbana gatukanjoner genomfördes CFD-simuleringar med tre distinkta Richardson-tal (R_b). De tre fallen representerar olika atmosfäriska stabilitetsförhållanden som kan förekomma i urbana miljöer och har valts för att systematiskt studera deras effekter på urbana värmeöar.

3.3.1 Konvektion och konduktion

Undersökningens primära syfte är att undersöka hur olika fysikaliska fenomen bidrar till bildandet av urbana värmeöar. De värmetransportmekanismer som huvudsakligen studerades är konvektion och i viss mån konduktion. Dessa fenomen kan beskrivas enligt följande:

- **Konduktion** är värmeöverföring genom direkt kontakt mellan material. I experimentet sker detta när värme överförs från de uppvärmda ytorna till luftmolekylerna i direkt kontakt med dem. Detta är den inledande värmeöverföringsmekanismen vid gränsytan mellan fasta material och luft.

- **Konvektion** är värmeöverföring genom rörelse i vätskor eller gaser, vilket är experimentets huvudfokus. Genom att värma modellens botten mer än luften (instabilt fall) eller luften mer än golvet (stabilt fall) skapades olika Richardson-tal som representerar olika grader av atmosfärisk stabilitet. När golvet är varmare skapas uppåtstigande luftströmmar då den uppvärmda luften blir mindre tät, vilket leder till konvektiva flöden som påverkar luftcirkulationen i gatukanjonen.

3.3.2 Simuleringsfall 1: Stabil skiktning ($R_b = 0.79$)

I detta simuleringsfall skapades en stabil atmosfärisk skiktning genom att ställa in lufttemperaturen (T_a) till 351 K och marktemperaturen (T_f) till 294 K, vilket resulterade i en temperaturdifferens på 57 K. Under dessa förhållanden placeras varm luft ovanför kallare luft, vilket hämmar vertikal blandning och reducerar turbulens. Referenshastigheten (U_{ref}) vid höjden 700 mm hölls konstant vid 1,5 m/s.

3.3.3 Simuleringsfall 2: Neutral skiktning ($R_b = 0$)

Det neutrala fallet representerar ett tillstånd utan temperaturdrivna krafter. Både lufttemperaturen (T_a) och marktemperaturen (T_f) ställdes in på 293 K, vilket ger en temperaturdifferens på 0 K. Under dessa förhållanden är den enda drivkraften för luftcirkulation de mekaniska krafterna från vindhastighetsgradienten. Referenshastigheten (U_{ref}) bibehölls vid 1,5 m/s.

3.3.4 Simuleringsfall 3: Instabil skiktning ($R_b = -0.21$)

För att simulera instabila förhållanden ställdes lufttemperaturen (T_a) in på 293 K och marktemperaturen (T_f) på 352 K, vilket skapar en temperaturdifferens på 59 K med varmare ytor under kallare luft. Detta förhållande främjar kraftig konvektion och vertikal blandning när den varma luften nära markytan stiger uppåt. Referenshastigheten (U_{ref}) hölls konstant vid 1,5 m/s även i detta fall.

Följande simuleringfall kan sammanfattas enligt tabell 2.

Simuleringsfall	Rb	Lufttempertur (T_a)	Marktemperatur (T_f)
1	0.79	351 K	294 K
2	0	293 K	293 K
3	-0.21	293 K	352 K

Tabell 2: Temperatur och R_b -tal för de tre simuleringfallen

3.3.5 Randvillkor

I simuleringen definierades randvillkoren utifrån de fysikaliska fenomen som studerades, huvudsakligen **konvektion** och **konduktion**. Dessa fenomen är avgörande för att kunna skapa och studera olika stabilitetsnivåer enligt Richardson-talet (R_b).

För **strömningen** (luftens rörelse) användes:

- Vid **inloppet** applicerades ett **Dirichletvillkor** där hastighetsprofilen följde den logaritmiska lagen enligt ekvation (10) med referenshastigheten $U_{ref} = 1,5$ m/s vid höjden 700 mm.
- Vid **toppen** och **sidorna** av domänen användes **symmetrivillkor**, vilket innebär att flödet tillåts röra sig längs med gränsytan men inte genom den. Detta motsvarar att hastighetskomponenten vinkelrät mot ytan är noll, medan komponenterna parallella med ytan kan ha icke-noll värden.
- Vid **utloppet** applicerades ett **utflödesvillkor** som tillåter fri passage av flödet utan påtvingade gradienter.
- På alla **fasta ytor** (väggar, tak och mark) applicerades ett **no-slip condition** ($u = v = w = 0$).

För **temperatur** användes:

- Vid **inloppet** applicerades ett **Dirichletvillkor** där temperaturen (T_a) varierade enligt:

- $T_a = 351$ K för stabilt fall ($R_b = 0.79$)
- $T_a = 293$ K för neutralt fall ($R_b = 0$)
- $T_a = 293$ K för instabilt fall ($R_b = -0.21$)
- På **markytan** (golvet) applicerades också ett **Dirichletvillkor** där temperaturen (T_f) varierade enligt:
 - $T_f = 294$ K för stabilt fall
 - $T_f = 293$ K för neutralt fall
 - $T_f = 352$ K för instabilt fall

För **turbulensmodellering** användes en standard **k- ϵ modell** med inloppsprofiler enligt:

- Turbulent kinetisk energi: $k(z) = \frac{u_*^2}{C_\mu^{1/2}} \left(1 - \frac{z}{\delta}\right)$
- Turbulent dissipationsgrad: $\epsilon(z) = \frac{u_*^3}{\kappa z} \left(1 - \frac{z}{\delta}\right)$

Valet av dessa randvillkor möjliggjorde skapandet av tre distinkta atmosfäriska stabilitetsförhållanden för att undersöka deras effekter på luftcirkulation och temperaturfördelning i gatukanjoner. Den primära konvektionsmekanismen i de instabila fallen drivs genom temperaturskillnaden mellan den varma markytan och den kallare luften, medan det stabila fallet karakteriseras av att varm luft ligger ovanför kall markyta, vilket hämmar vertikal blandning.

3.3.6 Vindhastighetsprofil

För gränsskiktet applicerades en logaritmisk hastighetsprofil över terrängen som beskrivs ihop med profilens funktion under teoridelen. Simuleringarna använde hastighetsdatan från ett python script som itererade funktionen över y-distansen av modellen, koden hittas i appendix.

3.4 Line probe och datainsamling

För att systematiskt jämföra flödes- och temperaturprofiler under olika stabilitetsförhållanden användes en vertikal line probe, placerad mellan byggnad 5 och 6 i modellen. Denna placering valdes för att efterlikna mätningarna från vindtunneexperimenten i litteraturen och möjliggöra direkt validering av simuleringsresultaten.

Line proben sträckte sig vertikalt från marknivån upp till en höjd som var tillräcklig för att fånga hela det turbulenta gränsskiktet, inklusive området ovanför byggnaderna. Denna mätmetod möjliggjorde insamling av data som funktion av höjden (z) enligt följande:

- **Vertikala hastighetsprofiler** - Förhållandet mellan normaliserad vindhastighet (u/U_{ref}) och normaliserad höjd (z/H) registrerades för att analysera hur de olika stabilitetsfallen påverkade flödesmönstren i gatukanjonen.
- **Vertikala temperaturprofiler** - Förhållandet mellan normaliserad temperatur ($(T-T_f)/(T_a-T_f)$) och normaliserad höjd (z/H) mättes för att undersöka temperaturskiktning och värmespridning under olika stabilitetsfaktorer.

Dessa profiler extraherades direkt från STAR-CCM+ efter att simuleringarna uppnått konvergens och exporterades för vidare analys och jämförelse med data från vindtunneexperimenten. För att säkerställa konsekventa jämförelser normaliserades alla data med relevanta referensvärden: byggnadshöjden (H) för längdskala, referenshastigheten (U_{ref}) vid höjden 700 mm för hastighet, samt inlopps- och marktemperaturer (T_a och T_f) för temperaturprofiler.

3.5 Dataanalys

De insamlade profilerna analyserades genom jämförelse mellan de tre simuleringsfallen, stabil, neutral och instabil skiktning, samt mot motsvarande data från vindtunneexperimenten. Särskild uppmärksamhet ägnades åt:

- Inverkan av olika Richardson-tal på flödesmönster inom gatukanjonen

- Förekomst och styrka av återcirkulationsområden under olika stabilitetsfaktorer
- Temperaturgradienter och värmespridning för de tre fallen
- Överensstämmelse mellan simuleringsresultaten och tillgänglig experimentdata

Analysen genomfördes med hjälp av post-processing i STAR-CCM+ samt ytterligare bearbetning i Python för visualisering och kvantitativ jämförelse av profilerna. Genom denna metodik kunde det systematiskt undersökas hur atmosfärisk stabilitet påverkar urbana värmeöars utveckling och struktur.

4 Resultat

I detta avsnitt redovisas resultaten från den tidigare beskrivna metodiken för de tre olika simuleringsfallen stabil ($R_b = 0.79$), neutral ($R_b = 0$) och instabil ($R_b = -0.21$). Resultaten presenteras genom plottar som bygger på den normaliserade vindhastighetsprofilen och temperaturprofilen som funktion av höjden följt av visualiseringar av vindrörelser och temperaturen för respektive fall. I plottarna tas även experiment- och simuleringsdata från det tidigare arbetet med för jämförelse (Santese et al., 2007).

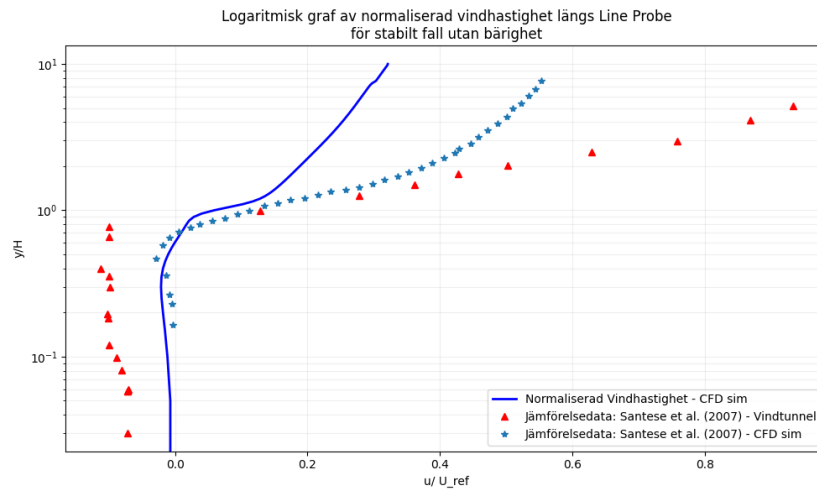
4.1 Simulering fall 1 ($R_b = 0.79$)

I simuleringsfall 1 presenteras det stabila fallet med $R_b = 0.79$. Först gjordes ett fall med koppling utan bärighet och sedan adderades koppling med bärighet till fallet.

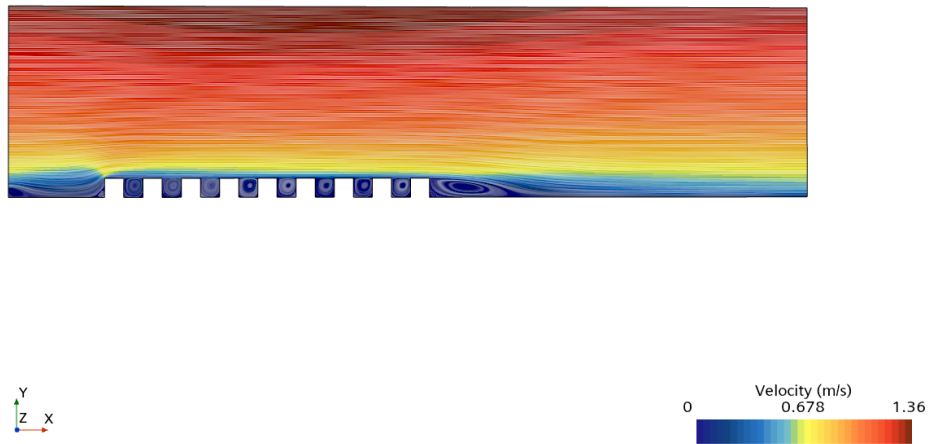
4.1.1 Stabilt fall utan bärighet

Här redovisas resultatet för fallet med stabil atmosfärisk skiktning, $R_b = 0.79$, utan koppling till bärighet. I figur 4 visas det att vindhastigheten ökar med höjden, vilket är väntat för ett stabilt fall. I simuleringen underskattas vindhastigheten vid låg höjd jämfört med referensdatan, vilket indikerar begränsad luftcirkulation i gatukanjonerna.

I figur 5 syns det tydligt att flödet ovanför byggnaderna har hög hastighet och är mer jämnt. Däremot rör luften i gatukanjonerna sig långsamt och har en begränsad turbulens, vilket är vanligt för ett stabilt atmosfäriskt tillstånd där vertikal omblandning hindras av den stabila skiktningen.

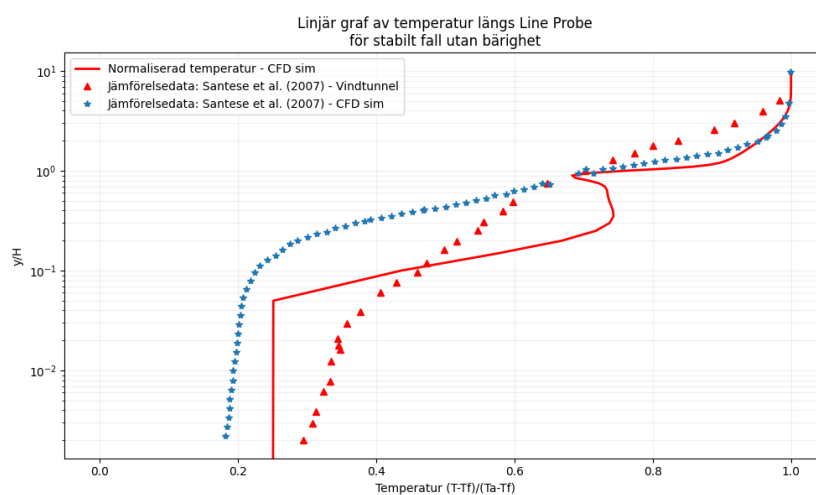


Figur 4: Vindhastighet utan bärlighet.

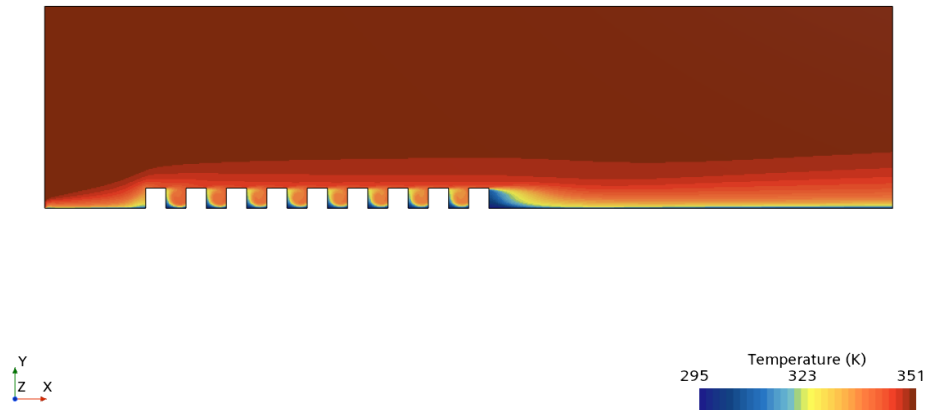


Figur 5: Modell över vindhastighet. Fall utan bärlighet.

Vid undersökning av temperaturen av samma fall noteras några skillnader mellan det simulerade fallet och referensdatan, se figur 6. Till skillnad från referensdatan, stiger temperaturen långsammare vid lägre höjder i simuleringen, det kan tyda på en begränsad vertikal omblandning i modellen som inte fullt återger experimentets konvektionseffekter. I simuleringen noteras ett lokalt minimum på temperaturen vid omkring $H \approx 0.1$. Denna temperatursänkning samt hur temperaturen förhåller sig till höjden visualiseras i figur 7.



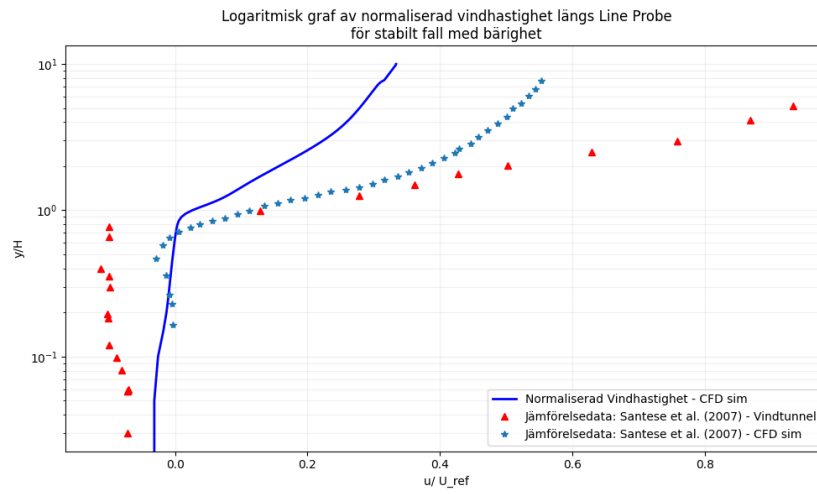
Figur 6: Temperaturförändring utan bärighet.



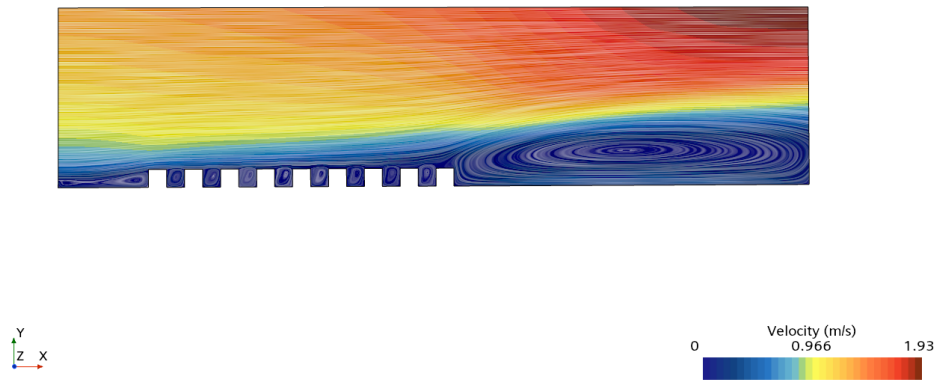
Figur 7: Modell över temperaturförändringar. Fall utan bärighet.

4.1.2 Stabilt fall med bärighet

När bärighet aktiveras i simuleringen kan en tydlig skillnad synas i flödesmönstret, se figur 8 och figur 9. Vid en lägre höjd är vindhastigheten högre jämfört med referensdatan, medan vid högre höjd är något lägre. Bärighetseffekten bidrar till en viss vertikal omblandning trots den stabila skiktningen, denna omblandning förblir däremot begränsad till lägre höjder.

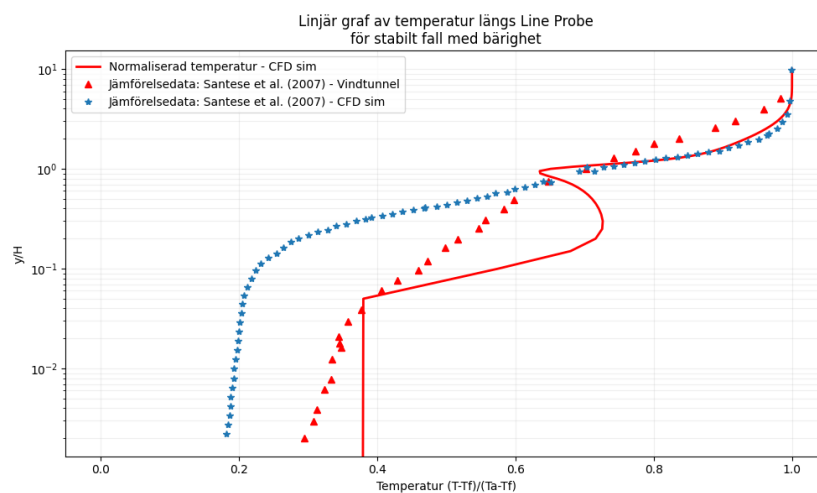


Figur 8: Vindhastighet med bärighet.

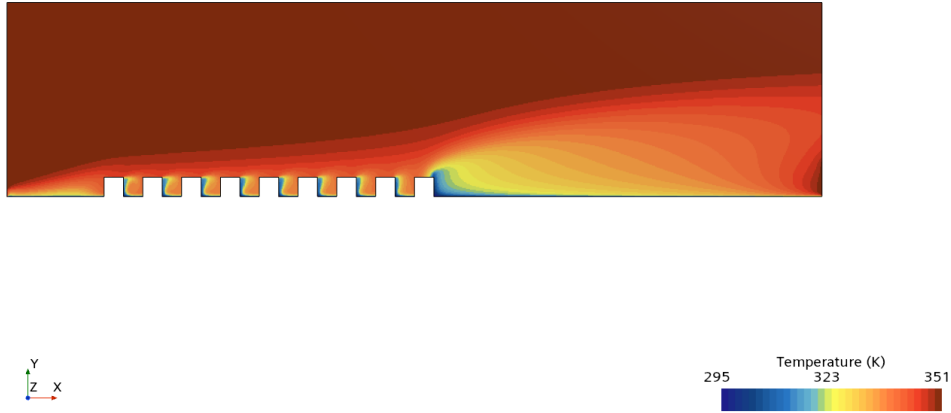


Figur 9: Modell över vindhastighet. Fall med bärighet.

Temperaturprofilen i figur 10 stämmer överens med referensdatan. Temperaturen ökar tydligt inom gatukanjonen och minskar vid hustaken, för att därefter återigen öka med höjden. Detta indikerar på att modellen med aktiverad bärighet bättre fångar de lokala temperaturskillnaderna, fastän viss avvikelse kan kvarstå vid lägre höjder. I figur 11 visualiseras den simulerade temperaturen.



Figur 10: Temperaturförändring med bärighet.



Figur 11: Modell över temperaturförändringar. Fall med bärighet

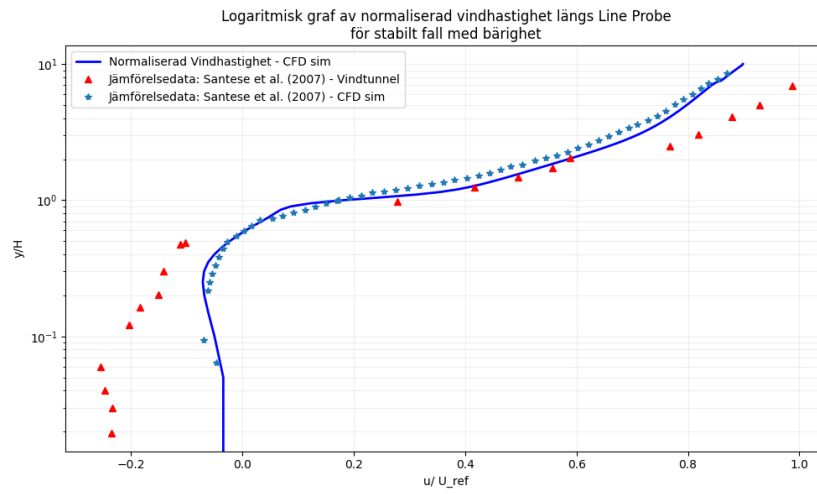
4.2 Simulering fall 2 ($R_b = 0$)

I andra simuleringsfallet utfördes ett neutralt fall med $R_b = 0$. I detta fallet fanns det ingen referensdata för temperaturprofilen.

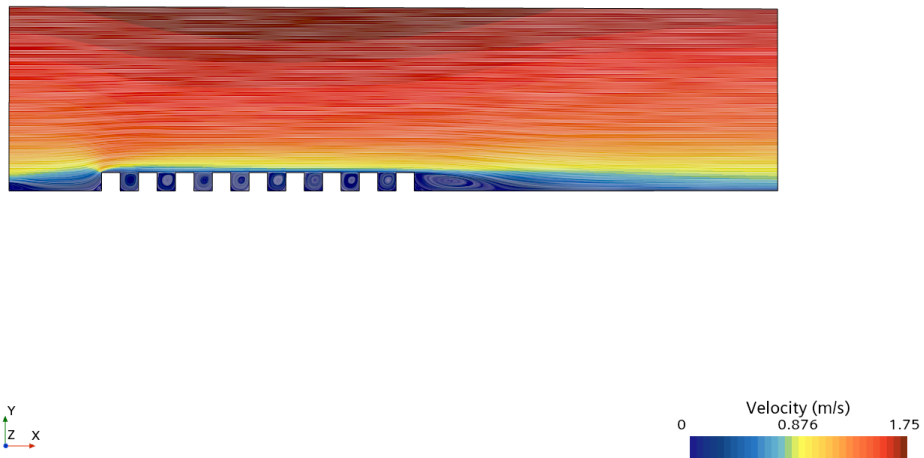
4.2.1 Neutralt fall med bärighet

Figur 12 visar den normaliserade vindhastighetsprofilen för det neutrala fallet med bärighet. Från simuleringen framgår det hur vindhastigheten nära marknivå underskattas i jämförelse med vindtunneexperimentet samt tidigare studier, det tyder på begränsad luftcirkulation i gatukanjonen. Vid högre höjder stämmer simuleringen bättre överens med referensdatan och visar förväntad ökning av vindhastigheten.

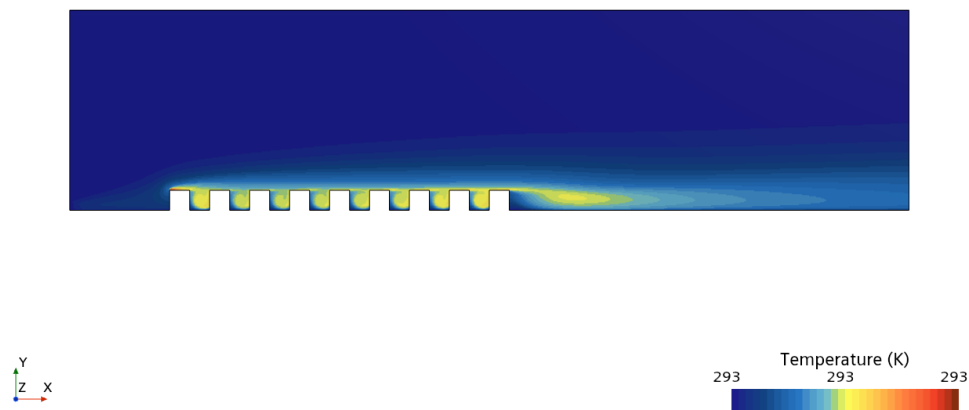
Temperaturfördelningen i figur 14 visar även detta, där temperaturen blir konstant kring 293 Kelvin. Den homogena temperaturen och bristen på vertikal temperaturgradient visar att konvektion inte uppstår, detta är typiskt för ett neutralt fall.



Figur 12: Hastighet med koppling till bärighet



Figur 13: Modell över vindhastighet. Fall med bärighet.



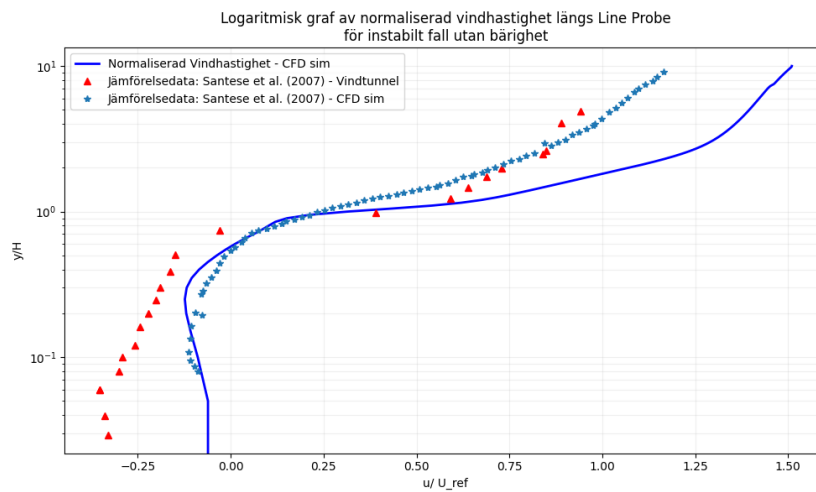
Figur 14: Modell över temperaturförändringar. Fall med bärighet

4.3 Simulering fall 3 ($R_b = -0.21$)

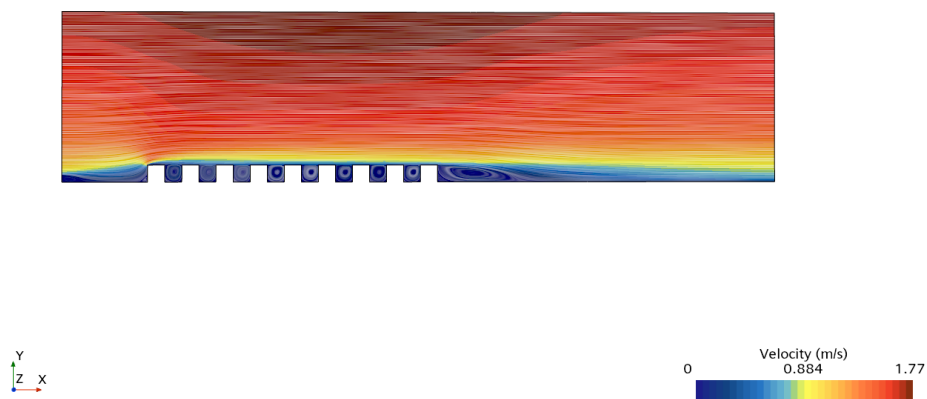
I simulering fall 3 presenteras det instabila fallet med $R_b = -0.21$. Först gjordes ett fall med koppling utan bärighet och sedan adderades koppling med bärighet till fallet.

4.3.1 Instabilt fall utan bärighet

I det instabila fallet, utan koppling med bärighet, är simuleringen inte kapabel till att återge de vertikala flöden som normalt uppstår vid stora temperaturdifferenser mellan mark och luft. Figur 15 och figur 16 visar att flödet förblir huvudsakligen horisontellt ovanför byggnaderna, med begränsad recirkulation i gatanjonerna. Detta beror på att den termiska drivkraften saknas, vilket leder till en underskattning av vertikala rörelser och turbulens nära marknivå.

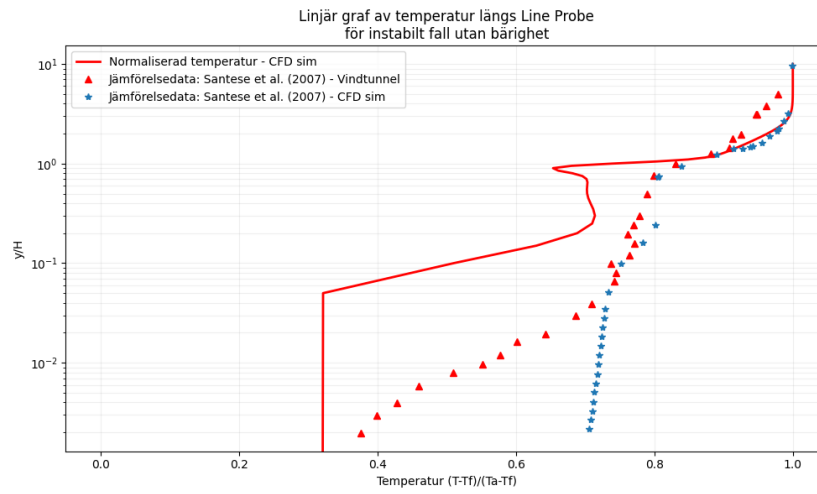


Figur 15: Vindhastighet utan bärighet.

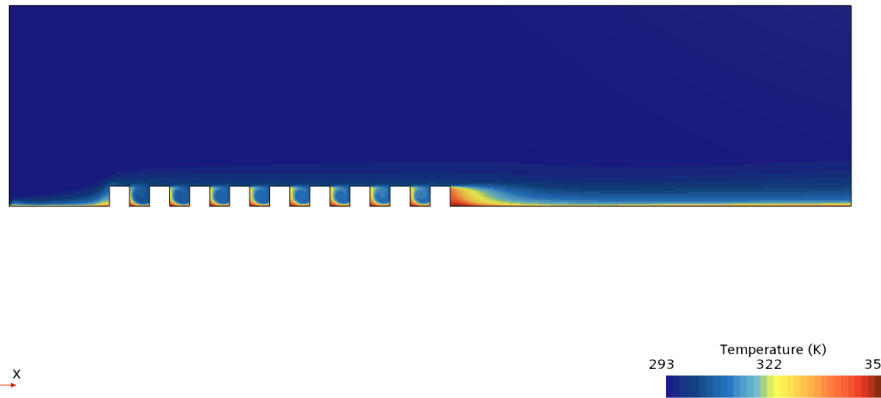


Figur 16: Modell över vindhastighet. Fall utan bärighet.

Temperaturprofilen i figur 17 och 18 visar en avvikelse från referensdatan. Temperaturökningen vid låga höjder underskattas och värme sprids främst horisontellt nära byggnadernas ytor. Detta är ett tydligt tecken på att konvektiv värmetransport som normalt skulle dominera under dessa förhållanden.



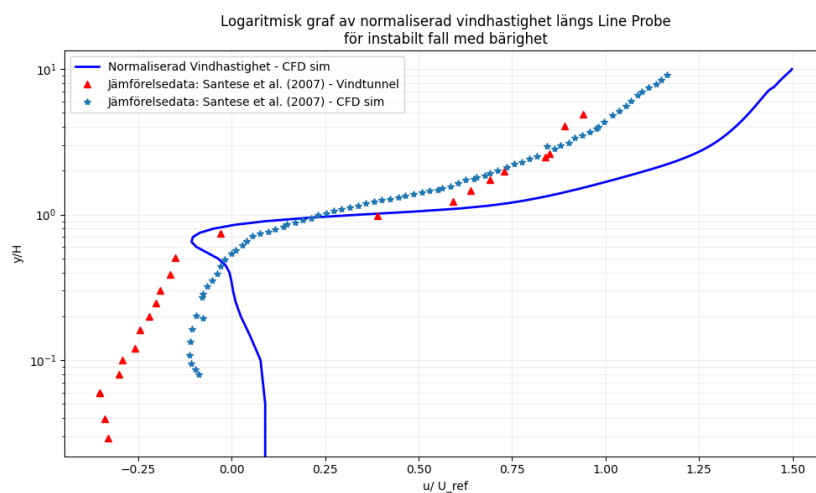
Figur 17: Temperaturförändring utan bärighet.



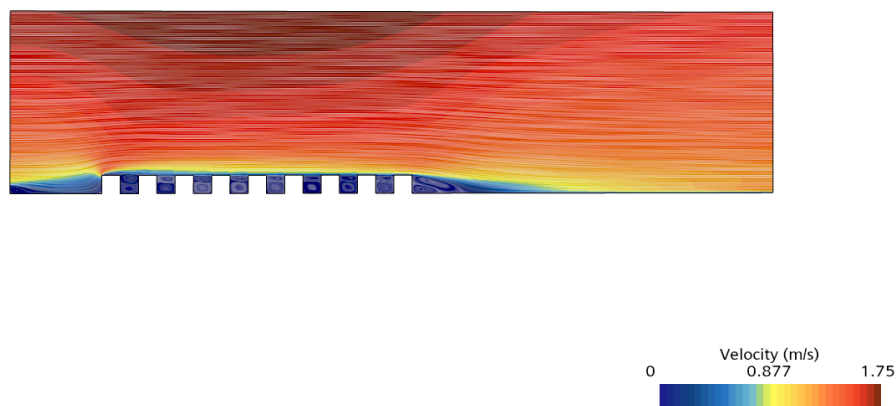
Figur 18: Modell över temperaturförändringar. Fall utan bärighet.

4.3.2 Instabilt fall med bärighet

I figur 19 nedan visas hur den instabila atmosfären ökar turbulent vilket ger en mer jämn vindprofil med lägre hastighet nära marken men en brantare ökning vid höjder. Detta kan man se i figur 20 där flödet accelererar ovanför byggnaderna och recirkulationszoner bildas nära marknivå.

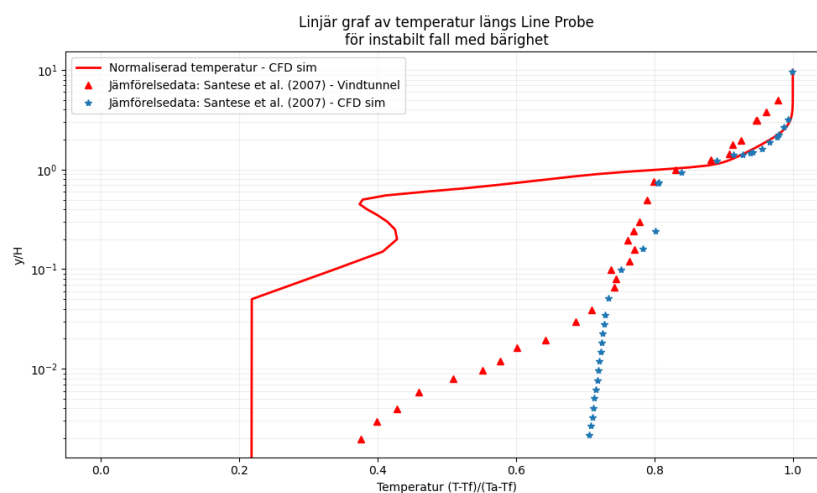


Figur 19: Vindhastighet med bärighet.

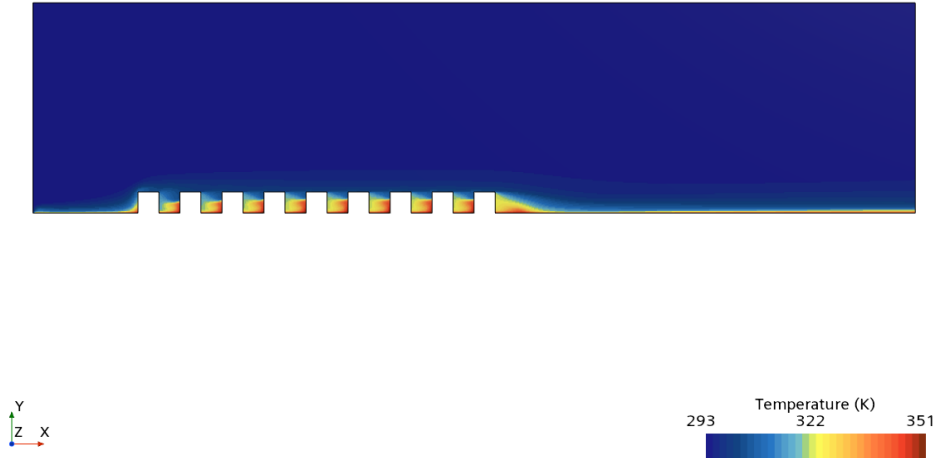


Figur 20: Modell över vindhastighet med bärighet.

Den normaliserade temperaturprofilen längs mätlinjen visas i figur 21. Den överensstämmer med referensdatan i det övre skiktet medan den har större avvikelser nära botten, vilket beror på starka temperaturgradienter och flödesförhållanden. I figur 22, där temperaturfältet i domänen illustrerar hur värmen koncentreras kring de uppvärmda byggnadsfasaderna och sprids vertikalt uppåt. Temperaturgradienten är tydlig och spänner från 293 Kelvin till 351 Kelvin.



Figur 21: Temperaturförändringar med bärighet



Figur 22: Modell över temperaturförändringar. Fall med bärighet.

5 Diskussion

Resultaten från de utförda simuleringarna visar hur atmosfärisk stabilitet, definierad av Richardson-talet, R_b , påverkar luftflödet och temperaturfördelningen i urbana stadsmiljöer. För det stabila fallet, $R_b = 0.79$, noterades en begränsad vertikal blandning, vilket överensstämmer med teorin om att varmare luft ovanför kallare luft hindrar konvektion. Det här resulterade i högre temperaturer i gatukanjonen samt lägre temperaturer ovanför byggnaderna, detta framgick dessutom i de simulerade temperaturprofilerna. Resultaten stämmer bra överens med tidigare studier och stärker teorin om hur en stabil skiktning bidrar till att värmen ackumuleras nära marknivå. Detta är något som kan bidra till den urbana värmeöeffekten i tätbebyggda områden.

För det neutrala fallet, $R_b = 0$, utfördes endast ett fall med bärighet då fallet utan bärighet hade genererat samma resultat enligt teorin. Bärighetseffekten är försumbar i ett neutralt fall vilket innebär att en sådan simulering hade haft en begränsad betydelse. Resultaten från simuleringen visade ett förväntat beteende. Konvektion uppstod inte och luftflödet drevs huvudsakligen av den mekaniska vinden. Temperaturfördelningen fortsatte vara jämn och hade inga vertikala gradienter, vilket bekräftar att när tillståndet är neutralt inte genererar några termiskt drivna flöden.

I det instabila fallet, $R_b = -0.21$, kom ett väldigt intressant resultat ut. Den varma markytan skapade vertikal blandning av luften och stigande luftströmmar, detta resulterade i en värmetransport upp genom gatukanjonerna. Den ökade turbulensen bidrog till en jämnare vertikal temperaturprofil. Däremot visades vissa avvikelser vid marknivån, det kan bero på svårigheter att numeriskt modellera de kraftiga temperaturgradienterna samt de flödesförhållanden nära ytan.

I jämförelse mellan simuleringar med och utan koppling med bärighet framgick det att effekterna bärighet har, är större på de instabila förhållandena. Utan koppling underskattas luftens rörelse men också de olika temperaturerna, vilket gav ett mindre realistiskt resultat. Av den orsaken är det viktigt att inkludera koppling med bärighet i simuleringarna för att bättre återge de urbana värmeöfenomenen.

5.1 Slutsats

I detta arbete används en enkel stadsmodell för att med hjälp av CFD-simuleringar undersöka temperatur- och hastighetsprofiler i urbana miljöer. Tre fall har undersökts - stabilt, neutralt och instabilt.

Resultatet visar att det instabila fallet ger störst urban värmeeffekt, då konvektionen och därmed den vertikala blandningen är som störst, vilket bidrar till en förstärkt värmespridning i gatukanjonen. I det stabila fallet begränsas luftens omblandning, vilket gör att värmespridningen ej bidrar till den urbana värmeeffekten.

Jämförelser mellan CFD-modellen och tidigare studier (Santese et al., 2007) gav att fallen med bärighet bäst återspeglade referensvärdenas temperatur- och hastighetsprofiler och CFD-modellen visade sig realistiskt representera dessa.

6 Referenser

Santese, F., Di Sabatino, S., Solazzo, E., & Britter, R. (2007). *Modelling urban heat island in the context of a Mediterranean city*. In C. Borrego & E. Renner (Eds.), *Developments in Environmental Science* (Vol. 6, pp. 55–63). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1474-8177\(07\)06016-0](https://doi.org/10.1016/S1474-8177(07)06016-0)

Zografos, K., Toparlak, Y., & Blocken, B. (2024). *CFD simulation of flow and dispersion in idealized urban street canyons: Effects of wall heating, buoyancy and atmospheric stability*. Chalmers University of Technology. https://research.chalmers.se/publication/542738/file/542738_Fulltext.pdf

7 Appendix

7.1 Python-kod för logaritmisk vindhastighetsprofil

```
1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3
4 u_star = 0.119
5 kappa = 0.4
6 d = 0.03486
7 y0 = 0.00328
8
9 def U(y):
10     return (u_star/kappa) * np.log((y - d) / y0)
11
12 y = np.linspace(d + 1e-6, 1.0, 100)
13
14 U_values = U(y)
15
16 df = pd.DataFrame({
17     "y (m)": np.round(y, 5),
18     "(y-d)/y0": np.round((y - d)/y0, 5),
19     "U(y) (m/s)": np.round(U_values, 5)
20 })
```

Listing 1: Beräkning av logaritmisk vindprofil