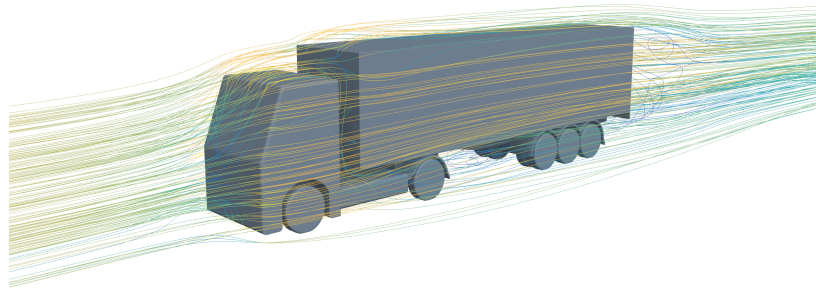




CHALMERS



Inverkan av friströmsturbulens på aerodynamiska prestanda hos vägfordon

Kandidatarbete i Maskinteknik & Teknisk Fysik

Adam Junfors
Måns Lillsäter
Felix Malmer Göransson
Joel Oskarsson
Oskar Rasmussen
Max Öberg

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2025
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE I MASKINTEKNIK & TEKNISK FYSIK

Inverkan av friströmsturbulens på aerodynamiska prestanda hos vägfordon

Adam Junfors
Måns Lillsäter
Felix Malmer Göransson
Joel Oskarsson
Oskar Rasmussen
Max Öberg



CHALMERS

Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Avdelningen för Fordonsteknik och autonoma system
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2025

Inverkan av friströmsturbulens på aerodynamiska prestanda hos vägfordon

Adam Junfors

Måns Lillsäter

Felix Malmer Göransson

Joel Oskarsson

Oskar Rasmussen

Max Öberg

© Adam Junfors, Måns Lillsäter, Felix Malmer Göransson,
Joel Oskarsson, Oskar Rasmussen, Max Öberg, 2025.

Handledare: Alexey Vdovin, Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper

Examinator: Simone Sebben, Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper

Kandidatarbete 2025

Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper

Chalmers Tekniska Högskola

SE-412 96 Göteborg

Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Strömningslinjer som visualiserar luftflödet runt lastbilsmodell i CFD.

Typsatt i L^AT_EX

Göteborg 2025

Inverkan av friströmsturbulens på aerodynamiska prestanda hos vägfordon
Adam Junfors, Måns Lillsäter, Felix Malmer Göransson,
Joel Oskarsson, Oskar Rasmussen, Max Öberg
Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Avdelningen för Fordonsteknik och autonoma system
Chalmers Tekniska Högskola

Abstract

This project was conducted to study the free-stream turbulence effect on the aerodynamic performance of on-road vehicles. In this particular report, the chosen vehicle is a scaled-down truck model. There are two main objectives with the project: to evaluate how two different passive turbulence generators, a cylinder and a grid, can create realistic high turbulence. The second objective is to evaluate how turbulence affects the effectiveness of aerodynamic design upgrades. In this report a roof fairing is used as an aerodynamic design upgrade. To accomplish the goal, both CFD and experiments in Chalmers wind tunnel were conducted. The six different configurations were tested in the Chalmers wind tunnel. The cylinder did not perform sufficiently since firstly it had a too large diameter and secondly, was placed too close to the truck model in the tunnel, resulting in not creating the expected turbulence. The configuration for the cylinder was therefore disregarded in the CFD simulations. In the CFD part of the project, a replica of the wind tunnel as well as a replica of the scaled-down truck model were used to create simulations that reflect the experiments conducted in the tunnel. The results from the CFD and wind tunnel were later evaluated and compared between the two different methods. The results show that the drag coefficient increases with a higher level of turbulence, though the roof fairing decreases the overall drag coefficient.

Nyckelord: CFD, turbulensgenerator, vindtunnel, lastbilsmodell, friströmsturbulens, luftmotståndskoefficient.

Sammandrag

Detta projekt har genomförts för att studera friströmsturbulensens inverkan på aerodynamisk prestanda hos vägfordon. I detta fall är den valda vägfordonstypen en nedskalad modell av en lastbil. Det finns två huvudsakliga syften med denna rapport: att evaluera hur två olika typer av turbulensgeneratorer, i form av en cylinder och ett rutnät, kan skapa realistisk turbulens som speglar verkliga förhållanden, samt att undersöka effektiviteten på aerodynamiska designförbättringar på fordonets prestanda. För att uppnå dessa mål användes både CFD-simuleringar samt experiment i Chalmers vindtunnel. Turbulensgeneratorn i form av en cylinder fungerade inte som tänkt då den hade en för stor diameter och var placerad för nära lastbilsmodellen under testerna. Det resulterade i den tänkta turbulensnivån som önskades inte uppnåddes och cylindern användes därför inte vidare i CFD-delen av projektet. I CFD användes repliker av Chalmers vindtunnel samt den nedskalade lastbilsmodellen för att skapa så lika förhållanden som möjligt mellan vindtunnel och CFD. Resultaten mellan CFD och vindtunnel jämfördes och visar att luftmotståndskoefficienten ökar med högre nivåer av turbulens medan luftavvisaren minskar luftmotståndskoefficienten överlag.

Förord

Denna rapport presenterar resultatet av vårt kandidatarbete som skrivits på Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper på Chalmers tekniska högskola under våren 2025. Projektet har inneburit både teoretiska och praktiska utmaningar, där vi har fördjupat oss inom aerodynamik. Vidare har arbetet gett oss möjligheten att tillämpa de kunskaper som vi fått med oss under utbildningen.

Författarnas tack

Vi vill tacka projektets handledare Alexey Vdovin för värdefull handledning, stort engagemang och konstruktiv feedback under hela arbetets gång. Vi vill också tacka Chalmers bibliotek för de föreläsningar och handledningstillfällen som har tillhandahållits.

Avslutningsvis vill vi tacka vår examinator Simone Sebben för hennes värdefulla insikter som har lett oss i rätt riktning under arbetets gång.

Författarna, Göteborg, Maj, 2025

Akronymer

Nedan är listan över akronymer som har använts genom hela denna avhandling listade i alfabetisk ordning:

CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
DNS	Direct Numerical Simulation
LES	Large Eddy Simulation
PISO	Pressure-Implicit Split-Operator
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
RMS	Root-Mean-Square
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
SIMPLEC	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations-Consistent
TKE	Turbulent Kinetisk Energi

Nomenklatur

Nedan är nomenklaturen för index, uppsättningar, parametrar och variabler som har använts genom hela denna avhandling.

Variabler

A	Tvärsnittsarea för lastbilen vid 0° , referensarea
A_B	Tvärsnittsarea för lastbilen vid olika vinklar
C_d	Luftmotståndskoefficient
C_p	Tryckkoefficient
C_s	Sidokraftskoefficient
F_d	Luftmotståndskraft
L	Karakteristisk längd, lastbilens längd
p	Tryck
p_∞	Friströmstrycket
Re	Reynoldstal
ρ	Densitet
μ	Viskositet
v	Hastighet
\bar{v}	Medelvärdet av v
v_∞	Friströmshastigheten
$\langle v \rangle$	RMS-medelvärdet av v



Innehåll

Akronymer	vii
Nomenklatur	viii
Figurer	xiii
Tabeller	xvii
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Mål	2
1.4 Avgränsningar	2
2 Teori	5
2.1 Inledande teori	5
2.1.1 Luftmotståndskoefficienten	5
2.1.2 Reynoldstal	6
2.1.3 Tryckkoefficient	6
2.2 Bernoullis ekvation	6
2.2.1 Förträngning	7
2.3 Friströmsturbulens	7
2.3.1 Turbulent kinetisk energi	7
2.3.2 Inverkan på aerodynamisk prestanda	8
2.4 Computational Fluid Dynamics	8
2.4.1 Reynolds-Averaged Navier-Stokes	8
2.4.2 Turbulensmodell $k - \epsilon$	8
2.5 Virvelavlösning	9
2.5.1 Påverkan av tryckoscillationer	9
3 Metod	11
3.1 CAD-modellerering	11
3.2 CFD	13
3.2.1 Inställningar	14
3.2.2 Mesh-studie	14
3.2.3 Konfigurationer	15
3.3 Vindtunneltest	16

3.3.1	Förberedelser och montering	16
3.3.2	Utförande	17
3.3.3	Behandling av data från vindtunneltest	19
4	Resultat och diskussion	21
4.1	Simuleringar	21
4.1.1	Mesh-Studie	21
4.1.2	Låg turbulens	22
4.1.3	Höjd turbulens	27
4.1.4	Jämförelser mellan låg och hög turbulens	31
4.2	Analys av vindtunnelldata	33
4.2.1	Korrektion av snedställningsvinkel	34
4.2.2	Approximering av projicerad frontalarea	34
4.2.3	Felanalys	35
4.2.4	Reynoldssweep	36
4.2.5	Cylindrisk turbulensgenerator	37
4.2.6	Rutnätsformad turbulensgenerators inverkan på C_d	37
4.2.7	Rutnätsformad turbulensgenerators inverkan på C_s	40
4.3	Jämförelse mellan vindtunnelresultat och CFD	41
4.4	Felkällor	42
4.4.1	Felkällor i vindtunneln	42
4.4.2	Felkällor i CFD	42
4.5	Förbättringar	43
4.5.1	Förbättringar av vindtunneltest	43
4.5.2	CFD	43
4.6	Etiska aspekter	44
4.6.1	Miljöpåverkan	44
4.6.2	Säkerhet	44
5	Slutsats	45
5.1	Analys och dragna slutsatser	45
5.2	Möjligheter till vidare arbete	45
	Litteraturförteckning	47

Figurer

3.2	CAD-modell av Chalmers vindtunnel. Samtliga mått anges i [mm] . . .	11
3.1	CAD-modell av lastbilsmodell med luftavvisare (övre). CAD-modell av lastbilsmodell utan luftavvisare (undre). Samtliga mått anges i [mm].	12
3.3	Teknisk mätskiss på den rutnätsformade turbulensgeneratoren. Samtliga mått anges i mm.	12
3.4	Teknisk mätskiss på den cylindriska turbulensgeneratoren.	13
3.5	CAD-modell av rutnätsformad turbulensgenerator.	13
3.6	CAD-modell av cylindrisk turbulensgenerator.	13
3.7	Baskonfiguration utan luftavvisare.	15
3.8	Baskonfiguration med luftavvisare.	15
3.9	Cylindrisk turbulensgenerator, lastbilsmodell utan luftavvisare. . . .	16
3.10	Cylindrisk turbulensgenerator, lastbilsmodell med luftavvisare rödmarkerad.	16
3.11	Rutnätsformad turbulensgenerator, lastbilsmodell utan luftavvisare rödmarkerad.	16
3.12	Rutnätsformad turbulensgenerator, lastbilsmodell med luftavvisare. .	16
3.13	Lastbilsmodell utan luftavvisare med garntuftar monterade med tejp.	17
3.14	Förberedd vindtunnelkonfiguration med lastbilsmodell fastmonterad i roterbar mätinstrumentsinfästning.	17
3.15	Snedställd lastbilsmodell med luftavvisare och garntuftar monterad bakom en cylindrisk turbulensgenerator.	18
3.16	Snedställd lastbilsmodell med garntuftar och utan luftavvisare bakom rutnätsformad turbulensgenerator.	18
3.17	Turbulensintensiteten visualiseras för flödet bakom cylinderformad turbulensgenerator.	19
3.18	Turbulensintensitet visualiseras för flödet bakom rutnätsformad turbulensgenerator.	19
4.1	Wall Y+ för baskonfigurationen.	22
4.2	Flödes hastigheten kring lastbilen utan luftavvisare från sidan i lågturbulent miljö.	23
4.3	Flödes hastigheten kring lastbilen med luftavvisare från sidan i lågturbulent miljö.	23
4.4	Detaljvy av flödet kring området mellan hytten och trailern för båda konfigurationerna. Utan luftavvisaren till vänster och med till höger. .	24
4.5	Strömningslinjer över taket på lastbilen utan luftavvisare.	24

4.6	Flödeshastigheten kring lastbilen ovanifrån för båda konfigurationerna i lågturbulent miljö. Till vänster är lastbilen utan luftavvisare och till höger är med luftavvisare.	25
4.7	Tryckkoefficienten på ytan av båda lastbilskonfigurationerna, utan luftavvisare till vänster och med luftavvisare till höger.	25
4.8	Visar turbulensintensiteten i ett område kring lastbilen under lågturbulent förhållande för båda konfigurationerna. Till vänster syns lastbilen utan luftavvisare och till höger med luftavvisaren.	26
4.9	Turbulensintensiteten inom vind-tunneln.	26
4.10	Flödeshastigheten kring lastbilen utan luftavvisare i miljö med höjd turbulens.	27
4.11	Flödeshastigheten kring lastbilen med luftavvisare i miljö med höjd turbulens.	27
4.12	Detaljvy av flödet kring området mellan hytten och trailern för båda konfigurationerna. Utan luftavvisare till vänster och med luftavvisare till höger.	28
4.13	Flödeshastigheten kring lastbilen ovanifrån för båda konfigurationerna i miljö med höjd turbulens. Till vänster är lastbilen utan luftavvisare och till höger är med luftavvisare.	28
4.14	Flödeshastigheten kring lastbilen ovanifrån för båda konfigurationerna i miljö med höjd turbulens. Till vänster är lastbilen utan luftavvisare och till höger är med luftavvisare.	29
4.15	Tryckkoefficienten på ytan av båda lastbilskonfigurationerna i miljö med höjd turbulens, utan luftavvisare till vänster och med luftavvisare till höger.	29
4.16	Turbulensintensiteten före, vid och efter turbulensgeneratoren.	30
4.17	Turbulensintensiteten som genereras av rutnätet inom vindtunneln.	30
4.18	Vindtunneln ovanifrån och illustrerar TKE som genereras av rutnätet.	31
4.19	Ackumulerade luftmotståndskoefficienten för lastbilen utan luftavvisare i låg- och högturbulent miljö. Den Röda grafen visar för lågturbulent och den blå visar högturbulent.	32
4.20	Ackumulerade luftmotståndskoefficienten för lastbilen med luftavvisare i låg- och högturbulent miljö. Den Röda grafen visar för lågturbulent och den blå visar högturbulent.	32
4.21	Tryckkoefficienten på bakdelen av släpet för konfiguration utan luftavvisare. Lågturbulens till vänster och högturbulens till höger.	33
4.22	Tryckkoefficienten på bakdelen av släpet för konfiguration med luftavvisare. Lågturbulens till vänster och högturbulens till höger.	33
4.23	Andragradspassning av uppmätt luftmotståndskraft med extrempunkt vid 2.516°	34
4.24	Linjär anpassning av uppmätt tvärsnittsarea beroende av snedställningsvinkel. Prickarna representerar datapunkterna från STAR-CCM+.	35
4.25	C_d för lastbilen utan luftavvisare och utan rutnätet i vindtunneln vid olika vindhastigheter.	36
4.26	Uppmätt luftmotstånd för snedställningsvinklar inom intervallet $[-2.5^\circ, 12.5^\circ]$ vid testning av cylindrisk turbulensgenerator.	37

4.27	Uppmätt C_d med och utan luftavvisare i vindtunnel.	38
4.28	Skillnaden i C_d mellan hög- och lågturbulenta förhållanden (med och utan rutnät) för lastbil med respektive utan luftavvisare.	39
4.29	Uppmätt C_d med och utan rutnät i vindtunnel.	39
4.30	Uppmätt C_s med och utan rutnät i vindtunnel.	41

Tabeller

1.1	Ungefärliga intervall av turbulensintensiteter för olika vägtyper. Värdena är hämtade från [4].	2
3.1	Fysikaliska modeller som använts i simuleringarna.	14
3.2	Egenskaper för luft vid 20°C som användes under CFD [15].	14
3.3	Simuleringskonfigurationer.	15
3.4	Mätserier och tillhörande vinklar och konfigurationer. För negativa vinklar gäller det att rotationen genomfördes i motsatt riktning jämfört med övriga.	18
4.1	Visar hur C_d beror av antalet celler i nätet enligt mesh-studien.	21
4.2	Tabellen visar de beräknade luftmotståndskoefficienterna för båda konfigurationerna under lågturbulenta förhållanden i CFD.	26
4.3	Beräknade luftmotståndskoefficienter för båda konfigurationerna under högturbulenta förhållanden i CFD.	31
4.4	Beräknade luftmotståndskoefficienter för båda konfigurationerna under låg- och högturbulenta förhållanden.	31
4.5	Framtagen projicerad frontalarea av lastbilen utan luftavvisare från StarCCM+, samt tillhörande snedställningsvinkel.	35
4.6	Mätserier med tillhörande maxosäkerheter δC_d och δC_s	36
4.7	Medelvärden av luftmotståndskoefficient och skillnad i luftmotståndskoefficient vid $\theta = \pm 0.5^\circ$	40
4.8	Luftmotståndskoefficienter och differenser för vindtunneltest och CFD. Samtliga värden är hämtade från tabeller 4.4 och 4.7.	41

1

Inledning

I en tid där energikonsumtionen ständigt ökar och behovet av förnybara energikällor växer, blir det allt viktigare att öka verkningsgraden. Detta beror dels på att de förnybara alternativen ska fungera så bra som möjligt i praktiken, och dels på att de tillgängliga resurserna skall kunna utnyttjas till fullo. Under 2022 utgjorde transportsektorn 31 % av den totala energikonsumtionen i EU, och vägtransport utgjorde i sin tur 73.6 % av denna andel [1]. Det är således högst relevant att eftersträva effektivisering av de fordon som används.

En starkt bidragande orsak till energiförluster för vägfordon är luftmotståndet. För en dieseldriven lastbil kan luftmotståndet utgöra omkring en tredjedel av de totala energiförlusterna, och för eldrivna lastbilar kan denna andel komma att utgöra upp till hälften [2]. Luftmotståndets bidrag är dessutom som mest relevant vid hastigheter över 50 km/h, vilket utgör den större delen av körningen vid fjärrtransporter med lastbil. Att minimera luftmotståndet kan alltså göra stora skillnader för den totala energikonsumtionen.

1.1 Bakgrund

Att förbättra ett fordon aerodynamiska egenskaper är ofta lättare sagt än gjort. Ett sätt att minska luftmotstånd är att montera komponenter som hjälper luftflödet att följa fordonet så länge som möjligt, då flödesseparation är en av de starkast bidragande orsakerna till ett högt tryckmotstånd [2]. Exempel på sådana komponenter för lastbilar är luftavvisare på hyttens tak och sidor, stänkskärmar, stötfångarspoilers och chassijolar. Det är även viktigt att minimera användandet av komponenter som har motsatt effekt. Dessa kan inkludera viltfångare, extraljus och lufthorn. Utöver justeringar av redan befintliga lastbilar är det även viktigt att utforma nya lastbilar så att de är aerodynamiskt optimerade. Oavsett om det gäller förbättringar av befintliga fordon eller utformning av nya, finns det en gemensam nämnare, nämligen en robust metod för testning.

Det finns idag främst två metoder för aerodynamiska tester: vindtunneltestning och datorsimuleringar. Aerodynamiska simuleringar hör till det vetenskapliga området Computational Fluid Dynamics (CFD) och är ett mycket kraftfullt verktyg i förbättringsprocessen. En stor fördel med CFD är att det går att få resultat mycket snabbare än med vindtunneltester, dels eftersom man slipper skapa fysiska prototyper och dels för att tillgängligheten är mycket högre vilket minimerar väntetiderna.

Tabell 1.1: Ungefärliga intervall av turbulensintensiteter för olika vägtyper. Värdena är hämtade från [4].

	Turbulensintensitet[%]
Stadsmiljö	1 – 5
Slät terräng	1 – 6
Väg med sidohinder	2 – 10
Motorväg	1 – 17

Vindtunneltester är dock fortfarande nödvändiga för att kunna verifiera att simuleringarna stämmer överens med en verklig referens. För att dessa jämförelser ska vara möjliga krävs det att förhållandena är lika. Idag uppnår man detta genom att främst undersöka flöden med mycket låg turbulens, eftersom dessa är mycket mer förutsägbara [3]. Normalt sett genomförs simuleringar och vindtunneltester med en turbulensintensitet kring 0.1 %. Detta speglar sällan verkligheten, då luftflödet längs vägarna oftast är betydligt mer turbulent. Beroende på olika vägförhållanden kan turbulensintensiteten nå nivåer över 15 %. I tabell 1.1 presenteras exempel på vad turbulensintensiteten kan vara för olika vägtyper. Det är således inte alls säkert att något som visat sig vara en förbättring under idealiserade förhållanden är en förbättring i praktiken. Att konsekvent kunna återskapa förhållanden med högre turbulens, både i vindtunnel och CFD är därför något som skulle hjälpa utvecklingen av aerodynamiska förbättringar nämnvärt. En ökad förståelse för hur höjd turbulens påverkar luftmotståndet hos fordon samt inverkan från aerodynamiska förbättringar är ytterligare aspekter som skulle främja detta arbete.

1.2 Syfte

Huvudsyftena med detta projekt är att skapa en ökad förståelse för hur det går att ta hänsyn till friströmsturbulens vid aerodynamiska tester, samt ge en bild över hur ökad friströmsturbulens kan påverka prestandan hos vägfordon.

1.3 Mål

Projektet har två huvudsakliga mål. Det första är att utvärdera huruvida högturbulenta förhållanden kan uppnås för två olika turbulensgeneratorer: en cylinder och ett rutnät. Fokus för detta mål är repeterbarhet mellan vindtunneltester och CFD. Utöver detta ska turbulensnivåns effekt på en känd aerodynamisk förbättring utvärderas med målet att skapa en bild av hur friströmsturbulens kan påverka designändringars effektivitet.

1.4 Avgränsningar

Även om samtliga vägfordon påverkas av luftmotstånd, så är det lastbilar som tack vare sin storlek påverkas mest. I mån av den tid och de resurser som fanns till-

gängliga begränsades således projektet till en generisk lastbilsmodell utformad för att fungera väl i den tillgängliga vindtunneln [5]. Denna modell kom att testas med och utan tillhörande takluftavvisare, i både vindtunnel och CFD. Konfigurationerna som testades begränsades till de befintliga turbulensgeneratorerna: ett rutnät utformat för vindtunnelns inlopp och en cylinder. Vindtunneltesterna begränsades av säkerhetsmässiga skäl till en vindhastighet på 35 m/s. För att uppnå goda simuleringsresultat krävs tidskrävande simuleringar. Simuleringsarbetet begränsades således primärt till att återskapa de förhållanden som testats i vindtunneln. Prioriteringsordningen för dessa var simuleringar med och utan luftavvisare: utan galler, med galler och sist med cylinder.

2

Teori

I kapitel 2 introduceras och förklaras ämnesrelevant teori, koncept och begrepp varpå projektet baseras. Nedan definieras teoretiska flödesmodeller, fenomen inom strömningsmekanik, numeriska metoder samt simulering.

2.1 Inledande teori

Att beskriva strömningsmekaniken i luftströmmen kring en lastbil är ett komplext problem. För analytiska lösningar löses vanligtvis Navier-Stokes ekvationer som är den konstitutiva ekvationen för strömningsmekanik i fluider. Där en fluid definieras genom molekylernas möjlighet till rörelse i förhållande till varandra; således betraktas både gaser och vätskor som fluider inom strömningsproblem [6].

Navier-Stokes ekvationer

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \\ \mu \nabla^2 \mathbf{v} - \nabla \mathbf{p} + \rho \mathbf{f} = \rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} \end{cases} \quad (2.1)$$

Den komplicerade geometrin kring en lastbil medför att analytiska lösningar inte kan finnas. Detta gör att CFD-metoder och vindtunneltester behöver användas för att numeriskt lösa problemet. För att bedöma aerodynamiken studeras parametrar som luftmotståndskoefficienten, reynoldstal och tryckkoefficienten.

2.1.1 Luftmotståndskoefficienten

Luftmotståndskoefficienten (C_d) är ett dimensionslöst tal som sammanflätar faktorerna som påverkar luftmotståndet [7]. Koefficienten kan användas för att jämföra prestandan för olika konfigurationer eller objekt under förutsättningen att flödesförhållandet inte förändras. Den definieras som,

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho v^2 A}, \quad (2.2)$$

där A är tvärsnittsarean på objektet, v är flödeshastigheten, ρ är fluidens densitet och F_d är luftmotståndskraften på objektet [7].

2.1.2 Reynoldstal

Reynoldstalet (Re) är ett dimensionslöst tal som beskriver flödesförhållandet och används för att identifiera när flödet övergår från laminär till turbulent strömning. Vid låga reynoldstal tenderar flöden att vara laminära och flödet följer utmed ytan. Vid högre reynoldstal uppstår turbulens och beroende på hur högt reynoldstal skiljer sig den turbulenta luftvaken [7]. Reynoldstalet ges av kvoten mellan den totala kraften och den viskösa kraften,

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}. \quad (2.3)$$

Där L är den karakteristiska längden på objektet, v är flödes hastigheten, ρ är fluidens densitet och μ är fluidens viskositet [7].

2.1.3 Tryckkoefficient

Tryckkoefficienten (C_p) är ett dimensionslöst tal som beskriver det relativa trycket i ett flödesfält och definieras genom,

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho v_\infty^2}. \quad (2.4)$$

Där p är trycket, p_∞ är trycket i friströmmen, ρ är densiteten och v är hastigheten i friströmmen.

2.2 Bernoullis ekvation

Eftersom vindtunneln idealiskt kan ses som ett slutet system kan Bernoullis princip tillämpas på flödet. Principen kan endast tillämpas på isentropiska flöden och uppger att en ökning i flödes hastigheten även medför en minskning i tryck [8] enligt relationen,

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{konstant}. \quad (2.5)$$

Ekvationen är en förenklad version av Bernoullis princip där den potentiella energin antas ha en försumbar påverkan på flödet. Särskilda punkter i flödet där flödet är stillastående kallas för stagnationspunkter och det följer även att trycket är som högst här [8].

När tvärsnittsarean av flödet minskar fås konsekvent en ökning av flödes hastigheten och minskning av trycket kring objektet. Minskningen av tvärsnittsarean kommer antingen från att geometrin av vindtunneln förändras eller att ett objekt delvis blockerar flödet, vilket kallas förträngning.

2.2.1 Förträngning

Förträngning (eng. Blockage) avser en minskning av fluidströmmens tvärsnittsarea som uppstår när den projicerade arean av ett objekt i fluidens flödesriktning blockerar en del av flödets totala area. När luften tvingas flöda genom ett trängre område ökar hastigheten enligt Bernoullis ekvation, vilket ändrar förhållandena. En korrektionsfaktor för C_d kan tillämpas för att korrigera felet som uppstår vid förändring av vindtunnelns tvärsnittsarea. En korrektionsfaktor som kan användas är:

$$C_{Dtrue} = C_{Dind} \left(1 - \frac{A}{S}\right)^{1.288}. \quad (2.6)$$

Där C_{Dtrue} är den korrigerade luftmotståndskoefficienten, C_{Dind} är den uppmätta luftmotståndskoefficienten, A är testobjektets projicerade area i flödets riktning och S är vindtunnelns tvärsnittsarea.

2.3 Friströmsturbulens

Friströmsturbulens är slumpmässiga tredimensionella hastighetsvariationer som finns i varje fluidström. Friströmsturbulens förekommer naturligt i vind och alla objekt påverkas av dess effekt. Turbulensen skapas genom virvlar som påverkar objekten längre ner i strömmen, exempelvis påverkas fordon av den naturliga vinden samt flöden över de övriga fordonen runt om. Även vindtunnlar som är designade för att skapa minimala turbulensnivåer har en liten mängd friströmsturbulens [9].

2.3.1 Turbulent kinetisk energi

Den turbulenta kinetiska energin (TKE) i luftströmmen är andelen av den totala kinetiska energin som enbart innehåller turbulenta effekter. Den turbulenta hastighetskomponenten fås genom Reynoldsdekomponering som $v'_i = v_i - \bar{v}_i$ och TKE per massenhet definieras [3]:

$$\text{TKE} = \frac{1}{2}[(v'_x)^2 + (v'_y)^2 + (v'_z)^2]. \quad (2.7)$$

Friströmsturbulensintensiteten (TI) definieras genom ekvationen:

$$\text{TI} = \frac{\langle v \rangle}{v_\infty}. \quad (2.8)$$

Där v_∞ är maxhastigheten i friströmmen och $\langle v \rangle$ är RMS-medelvärdet som kan beräknas utifrån TKE genom:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{1}{3}[(v'_x)^2 + (v'_y)^2 + (v'_z)^2]} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \text{TKE}. \quad (2.9)$$

Turbulensmagnituden beror på hur det tidigare flödet har verkat. Intensitet går att dela upp i hög och låg intensitet, där mer än 10% är klassad som hög turbulens och låg turbulens klassas som när intensiteten är under 0.5% [9]. Turbulensintensiteten i en vindtunnel är i regel låg [3]. Med aktiva turbulensgeneratorer kan man höja

turbulensintensiteten upp till $\sim 45\%$. Passiva turbulensgeneratorer, som exempelvis rutnät, når dock endast upp till turbulensintensiteter på $\sim 3\%$. Eftersom att denna studie endast undersöker passiva turbulensgeneratorer kommer dessa nivåer för enkelhetens skull hädanefter att hänvisas till som höga, trots att det motsäger konventionen.

2.3.2 Inverkan på aerodynamisk prestanda

En tidigare studie [10] av friströmsturbulens inverkan på en sfär visar att en förhöjd nivå av friströmsturbulens i regel ökar sfärens C_d . Förklaringen till detta är enligt [10] en ökad tryckgradient mellan sfärens bakre del och det kringliggande flödet, vilket i grund och botten orsakas av ett ökat rörelsemängdsutbyte mellan den virvelbildande regionen i sfärens vak och kringliggande turbulenta flöde.

När det gäller specifikt lastbilar visar en studie av två olika modeller [11] att C_d generellt blir högre vid förhöjda turbulensnivåer. Studien visar även att den modell med bättre aerodynamiska egenskaper vid låga turbulensnivåer påverkas mindre när dessa nivåer höjs.

2.4 Computational Fluid Dynamics

Till följd av att Navier-Stokes ekvationerna inte är analytiskt lösbara krävs en numerisk metod. Detta kan genomföras genom CFD (Computational Fluid Dynamics). CFD är programvara som med numeriska metoder approximerar lösningar till flödes- och värmeproblem. Navier-Stokes ekvationerna diskretiseras och löses således numeriskt genom en finit volymmetod i programvaran. [12]

2.4.1 Reynolds-Averaged Navier-Stokes

Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) är en metod som tillämpas inom turbulensmodeller för CFD-beräkningar. Metoden används för att beskriva medelvärdesbildade turbulenta flöden inom strömningsmekanik. Genom att genomföra en reynoldsdekomponering, $\mathbf{v} = \bar{\mathbf{v}} + \mathbf{v}'$, och tillämpa medelvärdesoperatoren på Navier-Stokes fås en RANS-modell [12].

2.4.2 Turbulensmodell $k - \varepsilon$

En turbulensmodell som används inom CFD är $k - \varepsilon$ modellen. Modellen bygger på RANS och består av två transportekvationer för att erhålla ett genomsnittligt beteende på turbulenta flöden. Den första ekvationen, k , används för att beräkna turbulent kinetisk energi och den andra ekvationen, ε , beskriver dissipationshastigheten [12].

2.5 Virvelavlösning

Virvelavlösning är ett fenomen inom aerodynamik där virvlar periodiskt bildas i fluiden och avlägsnas från ett objekt i ett fluidflöde. Virvlarna bildar oscillerande tryckvariationer vilket skapar krafter på objektet i normalriktning till flödet. Ett virvelmönster kan tydligt ses vid specifika flödesförhållanden och kännetecknas av periodiska virvlar i objektets luftvak, vilket kallas för Von Kármáns virvelgata. Virvlarna bakom objektet medför att det finns en lågtrycksvak vilket ökar luftmotståndet.

2.5.1 Påverkan av tryckoscillationer

Tryckoscillationerna som genereras av virvelavlösningarna resulterar i oscillerande tvärkrafter på objektet. Krafterna skapar praktiska problem, exempelvis aerodynamisk instabilitet, opålitliga mätdata från vindtunneltester samt vibrationer hos testobjektet.

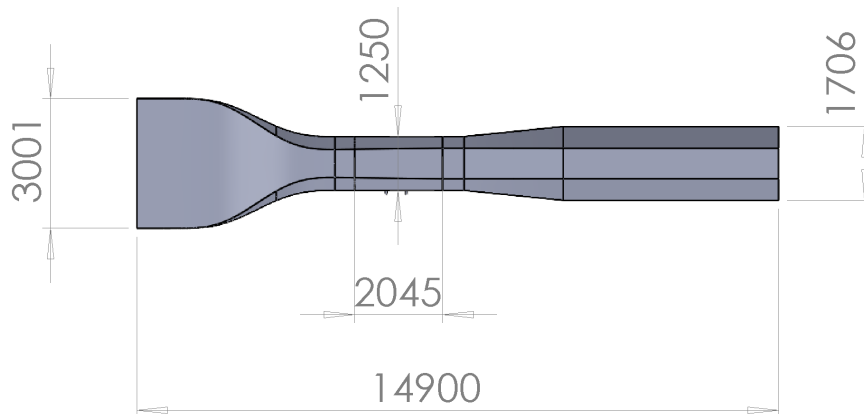
3

Metod

Under följande avsnitt behandlas arbetsprocessens fyra huvuddelar: Litteraturstudie, CFD-beräkningar, Vindtunneltester och Analys av resultat samt rapportering.

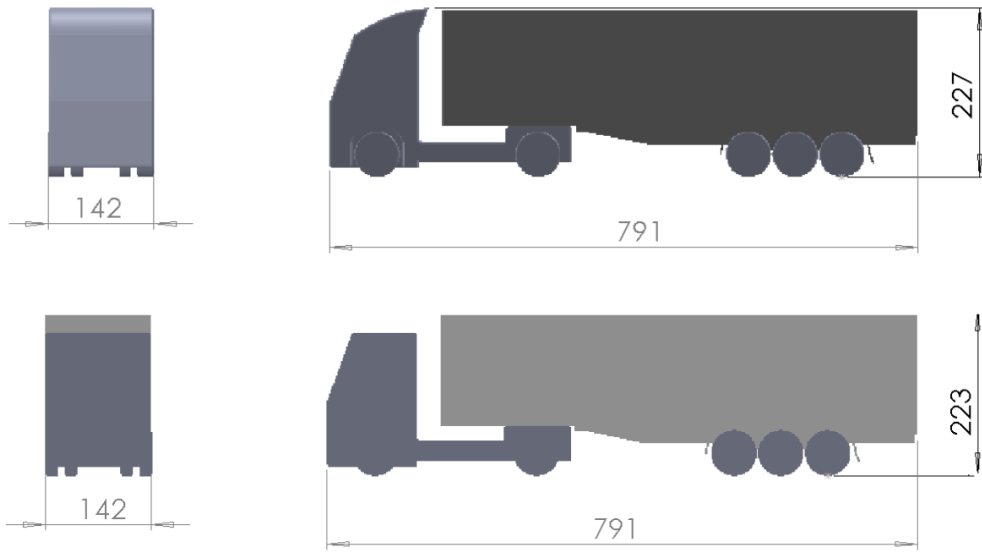
3.1 CAD-modellerering

Innan simulering av aerodynamisk påverkan på lastbilen kunde genomföras, behövde en 3D-modell framställas. För framtagande av CAD-modellen valdes programvaran Dassault Systèmes Catia-V5 med grund i gruppmedlemmarnas tidigare erfarenheter och programvarans tillgänglighet. Endast CAD-modeller av turbulensgeneratorerna behövde framställas då tidigare examensarbete tagit fram modeller av lastbilen, med och utan vindavvisare (se figur 3.1), samt modell av Chalmers vindtunnel (se figur 3.2) [5].

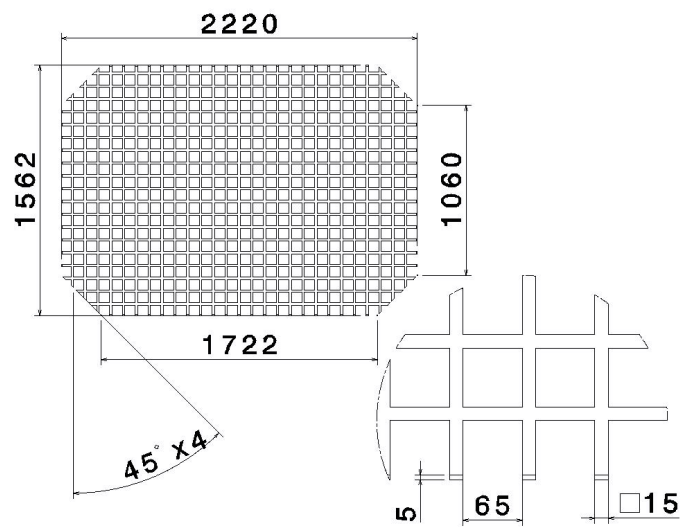


Figur 3.2: CAD-modell av Chalmers vindtunnel. Samtliga mått anges i [mm]

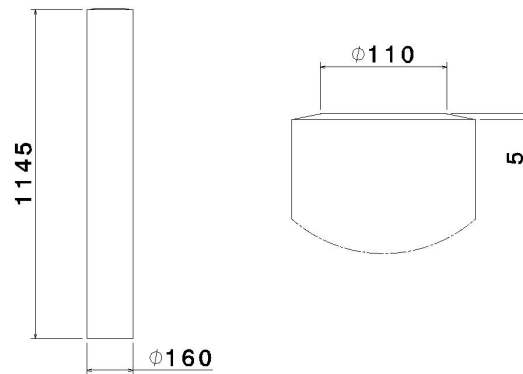
Mätning av dimensioner och allmänna proportioner gjordes i Chalmers Strömningslaboratorium [13] och dokumenterades i form av tekniska ritningar (se figur 3.3 & 3.4). Utifrån tagna mätdata framställdes två extruderade CAD-modeller av turbulensgeneratorerna (se figur 3.5 & 3.6). Ingen hänsyn togs till kantutjämning eller geometrisk inexacthet då avvikelserna ansågs vara försumbara.



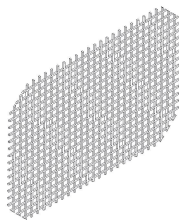
Figur 3.1: CAD-modell av lastbilsmodell med luftavvisare (övre). CAD-modell av lastbilsmodell utan luftavvisare (undre). Samtliga mått anges i [mm].



Figur 3.3: Teknisk mätskiss på den rutnätsformade turbulensgeneratoren. Samtliga mått anges i mm.



Figur 3.4: Teknisk mätskiss på den cylindriska turbulensgeneratoren.



Figur 3.5: CAD-modell av rutnätsformad turbulensgenerator.



Figur 3.6: CAD-modell av cylindrisk turbulensgenerator.

3.2 CFD

Arbetet med CFD utfördes med Siemens Simcenter Star-CCM+ och inleddes med en period av inläring. Detta genomfördes med Siemens egna träningsprogram Siemens Xcelerator Academy [14].

Simuleringar och beräkningar utfördes för olika konfigurationer av luftflödet. Dels när strömningen är lågturbulent, för att använda som referensfall, och sedan vid högturbulent luftflöde. Det högturbulenta luftflödet induceras på två olika sätt. Dels med ett rutnät och även med en cylinder, som placeras framför lastbilsmodellen i programvaran. I mån av tid kommer dessutom aerodynamiska effekter när luftflödet inkommer i linje med lastbilsmodellens normal, jämfört med snedställning av lastbilsmodellen, att undersökas i simulering.

Vid efterbearbetning av simuleringsresultat betraktades viktiga parametrar och visualiseringar jämfördes. Dessa var luftmotståndskoefficient, tryckfördelning, hastighetsprofiler, stagnationspunkter och separationspunkter.

3.2.1 Inställningar

För att simulera i Star-CCM+ krävs att diverse fysikaliska modeller ansätts för att kunna genomföra simuleringen. De fysikaliska modellerna som använts presenteras nedan i tabell 3.1.

Tabell 3.1: Fysikaliska modeller som använts i simuleringarna.

Fysikaliska Modeller
Solution Interpolation
Cell Quality Remediation
Two-Layer All y+ Wall Treatment
Wall distance
Realizable K-Epsilon Two-Layer
Reynolds-Averaged Navier-Stokes
Turbulent
Steady
Constant Density
Three Dimensional
Gradients
Coupled Flow
Gas

För att skapa en realistisk jämförelse mellan simuleringar och fysiska tester användes luftens egenskaper vid 20°C då det ansågs vara en ungefärlig omgivningstemperatur i vindtunneln under simuleringarna, se tabell 3.2. Däremot kan temperaturen vid simuleringar inte alltid stämma överens med verkligheten. Detta beror på att luftens temperatur i vindtunneln stiger relativt kraftigt vid längre körningar.

Tabell 3.2: Egenskaper för luft vid 20°C som användes under CFD [15].

Egenskap	Värde
Densitet (ρ)	1.189 kg/m ³
Dynamisk viskositet (μ)	18,1 × 10 ⁻⁶ N · s/m ²

3.2.2 Mesh-studie

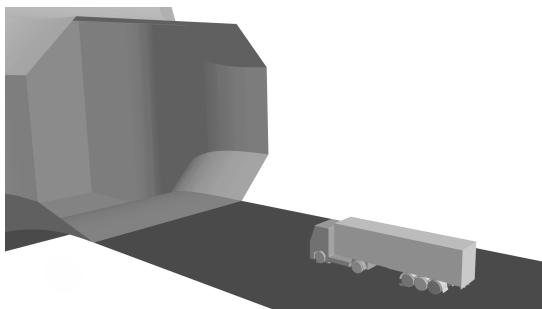
För att identifiera hur fint eller grovt nät som kan användas vid simuleringar genomfördes en mesh-studie. I mesh-studien testades ett antal olika nät med ökande antal celler. Målet var att identifiera en gräns där ökat antal celler inte längre bidrog till ökad precision hos lösningen. Antalet celler eftersträvades att hållas lågt då beräkningarna är dyra tidsmässigt och ett ökat antal celler medför längre beräkningstider.

Luftmotståndskoefficienten, C_d , studerades för sex olika nät där antalet celler varierade mellan 10- och 70-miljoner. Värdet på C_d beräknades som ett medelvärde över de sista 500 iterationerna via Star-CCM+.

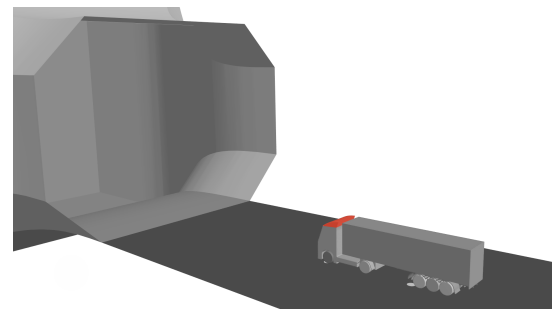
Utöver Luftmotståndskoefficienten studerades även värdet på Wall-Y+ i simuleringen. Turbulensmodellen $k-\varepsilon$ kom att tillämpas för att beskriva hur turbulensflöde rörde sig nära och i gränsskiktet på modellen. För att försäkra sig om att modellens funktion för simuleringarna behövde värdet på Wall-Y+ vara inom intervallet $\sim 30-200$ [14].

3.2.3 Konfigurationer

Inledningsvis fastställdes två baskonfigurationer (se figur 3.7 & 3.8) som utgjordes av lastbilmodellen i en vindtunnel utan turbulensgenerator. Lastbilen placerades centrerat i vindtunnelmodellens testsektion för att möjliggöra enkel replikering vid verkliga vindtunneltester. Konfigurationerna kördes både för lastbilmodellen med och utan aerodynamisk förbättring.



Figur 3.7: Baskonfiguration utan luftavvisare.



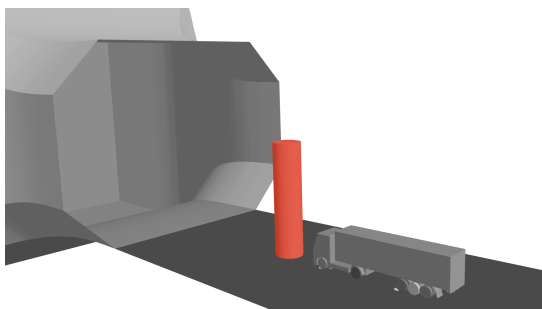
Figur 3.8: Baskonfiguration med luftavvisare.

Utöver baskonfigurationerna konstruerades 4 ytterligare konfigurationer vilket möjliggjorde analys av två olika turbulensgeneratorers påverkan på lastbilmodellens aerodynamiska egenskaper (se tabell 3.3).

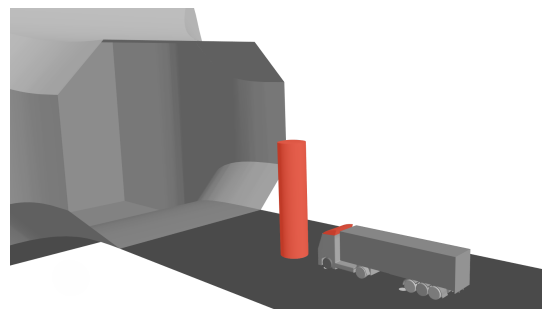
Tabell 3.3: Simuleringskonfigurationer.

#	Konfiguration	Figur
1	Lastbil (basfall)	3.7
2	Lastbil med luftavvisare (basfall)	3.8
3	Lastbil och cylinder som turbulensgenerator	3.9
4	Lastbil med luftavvisare och cylinder som turbulensgenerator	3.10
5	Lastbil och rutnät som turbulensgenerator	3.11
6	Lastbil med luftavvisare och rutnät som turbulensgenerator	3.12

Simulering av turbulens fastställdes genom två passiva konfigurationer. Den första konfigurationen utgick från baskonfigurationen, och utöver det placerades en cylinder framför lastbilmodellen för att inducera virvelavlösning (se fig 3.9 & 3.10).

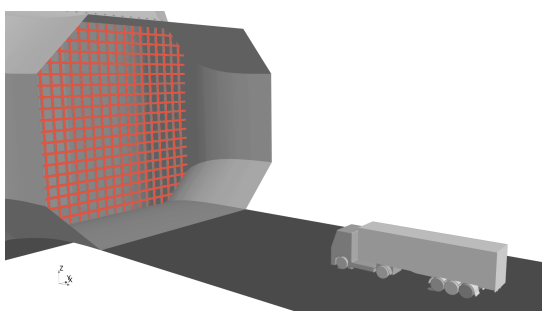


Figur 3.9: Cylindrisk turbulensgenerator, lastbilsmodell utan luftavvisare.

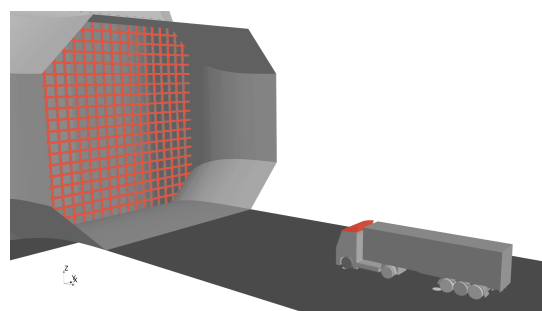


Figur 3.10: Cylindrisk turbulensgenerator, lastbilsmodell med luftavvisare rödmarkerad.

Den andra konfigurationen bestod av den rutnätsformade turbulensgeneratoren placerad vid inloppet av vindtunneln (se fig 3.11 & 3.12). Syftet var att generera en artificiell friströmsturbulens vilket sedan kunde jämföras med de övriga simuleringarna och vindtunneltesterna.



Figur 3.11: Rutnätsformad turbulensgenerator, lastbilsmodell utan luftavvisare rödmarkerad.



Figur 3.12: Rutnätsformad turbulensgenerator, lastbilsmodell med luftavvisare.

3.3 Vindtunneltest

Den experimentella delen av projektet bestod av tester i Chalmers vindtunnel [13]. Lastbilsskaldmodellen placerades i vindtunneln och kördes i olika konfigurationer som presenteras senare i avsnittet. Modellen fixerades på en roterbar plattform för att studera den aerodynamiska påverkan vid olika infallsvinklar mot flödet. Krafter och moment uppkomna av luftflödet mättes genom mätinstrument i infästningen av den roterande infästningsplattan.

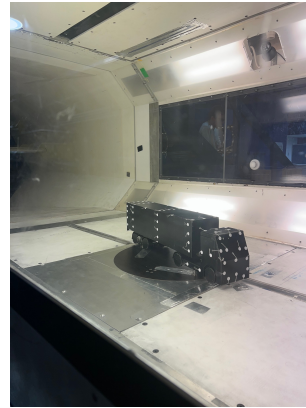
3.3.1 Förberedelser och montering

Innan testerna genomfördes behövde lastbilsmodellen förberedas. För att förenkla visuell analys av flödet kring lastbilsmodellen monterades garntuftar med tejp (se fig 3.13). Syftet var att kunna avgöra var flödet övergick från laminärt till turbulent. Beroende på vald konfiguration behövde lastbilsmodellen ändras genom att

montera eller demontera luftavvisaren, samt om vindtunnelkonfigurationen innehöll en cylindrisk-, en rutnätsformad-, eller ingen turbulensgenerator (se fig 3.14). Efter korrekt konfiguration hade fastställts och monterats, påbörjades utförandet.



Figur 3.13: Lastbilsmodell utan luftavvisare med garntuftar monterade med tejp.



Figur 3.14: Förberedd vindtunnelkonfiguration med lastbilsmodell fastmonterad i roterbar mätinstrumentsinfästning.

3.3.2 Utförande

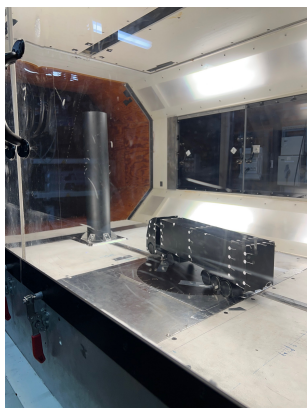
Utförandet av varje mätserie började med att relevant konfiguration installerades. Därefter nollställdes kraftmätningen för att säkerställa att installationen inte orsakat systematiska mätfel. Därefter startades vindtunneln från styrdatorn med en förutbestämd vindhastighet på 35 m/s. Den verkliga hastigheten i testsektionen registrerades vid varje mätning, och bevakades kontinuerligt under testförloppet. Fläkthastigheten anpassades vid behov för att hålla hastighet så nära 35 m/s som möjligt. Krafterna kontrollerades kontinuerligt vid varje mätpunkt och tilläts stabiliseras före varje mätning registrerades. Efter mätningen registrerats ändrades infallsvinkeln genom rotation av plattformen, varpå nästa mätning genomfördes. Vid slutet av varje mätserie stoppades vindtunneln. När vindhastigheten nått 0 m/s noterades den kvarvarande kraften. Denna bedömdes representera det maximala felet som uppstått på grund av rotationen av plattformen och andra externa störningskällor. Därefter installerades nästa konfiguration, varpå processen genomfördes på nytt. Varje registrerat mätvärde är ett genomsnitt av 1000 mätningar gjorda under 1 s. Nästintill samtliga mätseriers konfigurationer och vinklar presenteras i tabell 3.4.

Tabell 3.4: Mätserier och tillhörande vinklar och konfigurationer. För negativa vinklar gäller det att rotationen genomfördes i motsatt riktning jämfört med övriga.

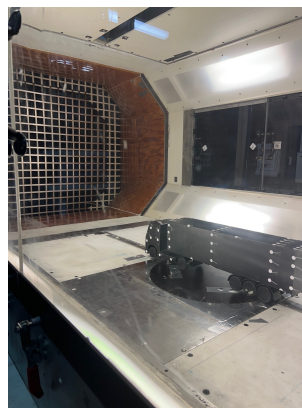
Mätserie	Konfiguration (turbulensgenerator/luftavvisare)	θ_0 [°]
1	Ingen/utan	0,1,2,3,4,5,10,15
2	Ingen/utan	0,1,2,3,4,5,10,15
3	Ingen/utan	0,-1,-2,-3,-4,-5,-10,-15
4	Ingen/med	0,1,2,3,4,5,10,15
5	Ingen/med	0,1,2,3,4,5,10,15
6	Cylinder/med	0,1,2,3,4,5,10,15
7	Cylinder/utan	0,1,2,3,4,5,10,15
8	Rutnät/utan	0,1,2,3,4,5,10,15
9	Rutnät/med	0,1,2,3,4,5,10,15

Utöver dessa mätserier genomfördes även en mätserie utan luftavvisare och utan turbulensgenerator, med syfte att undersöka luftmotståndskoefficientens hastighetsberoende. Den första konfigurationen undersöktes för både positiv och negativ rotation med målet att ett eventuellt fel i vinkelgraderingen på plattformen skulle kunna upptäckas och bestämmas. De första konfigurationerna testades två gånger, med undantag för de negativa vinklarna. Av tidsmässiga skäl tvingades upprepning av senare mätserier att utebli.

Under mätseriernas förlopp observerades, fotograferades och videoinspelades lastbilsmodellen för att möjliggöra analys av synliga vibrationer och garntuftarnas beteende. Detta gjordes för att kunna visualisera när luftflödet separerade från lastbilen (se fig 3.15 & 3.16).

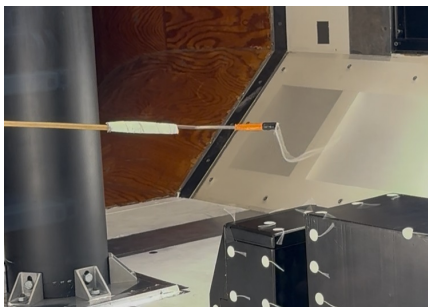


Figur 3.15: Snedställd lastbilsmodell med luftavvisare och garntuftar monterad bakom en cylindrisk turbulensgenerator.

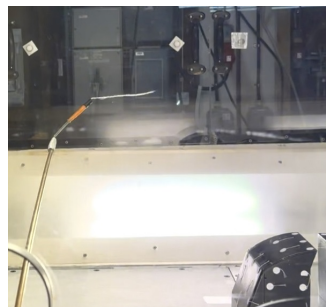


Figur 3.16: Snedställd lastbilsmodell med garntuftar och utan luftavvisare bakom rutnätsformad turbulensgenerator.

En längre garntuft monterad på kortsidan av ett smalt stag användes för att avgöra turbulensintensiteten vid flera positioner i vindtunneln för båda turbulensgeneratorerna (se fig 3.17 & 3.18). Denna mätmetod gav inga numeriska data, men förväntades ge förståelse över var flödets separationspunkter uppstod, en grov uppskattning gällande turbulensintensitetsnivåer samt var turbulensgeneratorns turbulenta vak fanns. Turbulensintensiteten bedömdes genom visuell tolkning av hur kaotiska tuffens rörelser var.



Figur 3.17: Turbulensintensiteten visualiseras för flödet bakom cylinderformad turbulensgenerator.



Figur 3.18: Turbulensintensitet visualiseras för flödet bakom rutnätsformad turbulensgenerator.

3.3.3 Behandling av data från vindtunneltest

Det första steget i databehandlingen var att göra en kvalitativ bedömning av vardera mätserie, vilket gjordes i anslutning till mätningarna. Nästa steg var att bestämma felet i vinkelgraderingen på plattformen. Detta gjordes genom anpassning av ett andragradspolynom till mätserie 2 och 3. Genom att bestämma minimum för detta polynom bestämdes vinkelfelet, med bakgrunden att luftmotståndet måste vara som minst vid 0. Därefter beräknades C_d och C_s utifrån sambandet (2.2). För beräkningen användes uppmätta värden på hastighet från vindtunneln, samt densitet och kraft. Referensarean som användes i vindtunneln var identisk till den för simuleringarna, $A = 0.031 \text{ m}^2$. Dessa värden behövde därefter korrigeras för att ta hänsyn till modellens blockage av vindtunneln. För detta användes ekvation (2.6). Testsektionens tvärsnittsarea var 2.25 m. Lastbilens projicerade area mot flödets riktning vid olika vinklar, A_B mättes för samtliga vinklar θ_0 i STAR-CCM+. För att kompensera för vinkelfelet användes sedan en linjär anpassning, eftersom datorkraften behövde prioriteras till simuleringarna. Sedan uppskattades felet i koefficienterna genom tillämpning av felfortplantningsformeln

$$\delta f = \sum_i \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \delta x_i \right|, \quad (3.1)$$

på ekvation (2.2). Felen som användes var standardavvikelsen för hastigheten och densiteten för varje mätserie, samt den noterade residualen för kraften. Den sistnämnda antogs vara jämnt fördelad över samtliga mätpunkter. Areafelet för blockeringskorrektionen valdes att försummas eftersom denna faktor redan är en uppskattning. Slutligen beräknades differenser mellan C_d med och utan luftavvisare för mätserierna med och utan rutnät, och vice versa.

4

Resultat och diskussion

Under följande avsnitt presenteras resultatet från vindtunneltester och simuleringar som kördes i programmet STAR-CCM+. Båda metoderna testade lastbilskonfigurationerna i lågturbulent och högturbulent miljö genom användandet av en turbulensgenerator. Den ansamlade datan analyseras och simuleringarna jämfördes mot vindtunneldatan för att evaluera om luftavvisarens påverkan även gäller vid högturbulenta förhållanden och vilka effekter den kan få på flödet och dess parametrar.

4.1 Simuleringar

Här presenteras resultat och diskussioner kring de genomförda simuleringarna för alla relevanta konfigurationer. Inledningsvis diskuteras resultatet av mesh-studien för att sedan lyfta upp de låg- och högturbulenta simuleringarna. Slutligen diskuteras turbulensens inflytande och rutnätets påverkan.

4.1.1 Mesh-Studie

Genomförandet av mesh-studien påvisade att ett nät med cirka 48,7 miljoner celler gav tillräckligt precisa simuleringar då ökningen av antalet celler därefter inte förändrades avsevärt. Cellantal samt det beräknade C_d presenteras i tabell 4.1 för jämförelser.

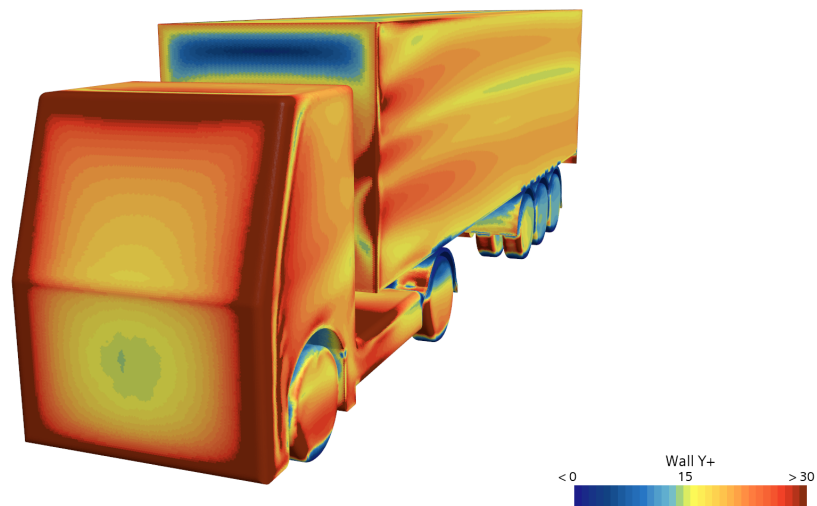
Tabell 4.1: Visar hur C_d beror av antalet celler i nätet enligt mesh-studien.

#	Antal miljoner celler	C_d
1	10,9	0,551
2	17,4	0,479
3	25,3	0,505
4	35,0	0,527
5	48,7	0,540
6	67,5	0,547

Det valda nätet är egentligen en kompromiss då projektet är tidsbegränsat och tiden det tar för datorn att beräkna ett större cellantal ökar snabbt. Ett nät med högre antal celler ger i teorin mer precisa simuleringar mot kostnaden av simuleringstid. Realistiskt sett är precisionen redan på tredje värdesiffran av C_d ifrågasättbar för både vindtunneltester och simuleringar. Även om det teoretiskt är möjligt att simulera den noggrannheten är det inte särskilt relevant då både vindtunnel och simuleringar

bör vara av samma precision för att kunna jämföras väl. Ytterligare förfining av nätet kan även orsaka diskretiseringsfel då datorer i grunden alltid har ett visst numeriskt fel som växer i förhållande till cellstorlekens minskning.

Värdet på Wall Y^+ för baskonfigurationen visas i figur 4.1. Värdet ligger lite under 30 i mitten av lastbilen och ökar när avståndet till kanten minskar. Resultatet är förväntat då Wall Y^+ värdet är mindre vid stagnationspunkter då lufthastigheten minskar, medan värdet blir större vid kanten på grund av acceleration. Nätet som användes blev en kompromiss då värdet idealt skall vara ~ 30 - 200 . Däremot ansågs värdet vara acceptabelt då konvergens uppnåddes för samtliga simuleringar.

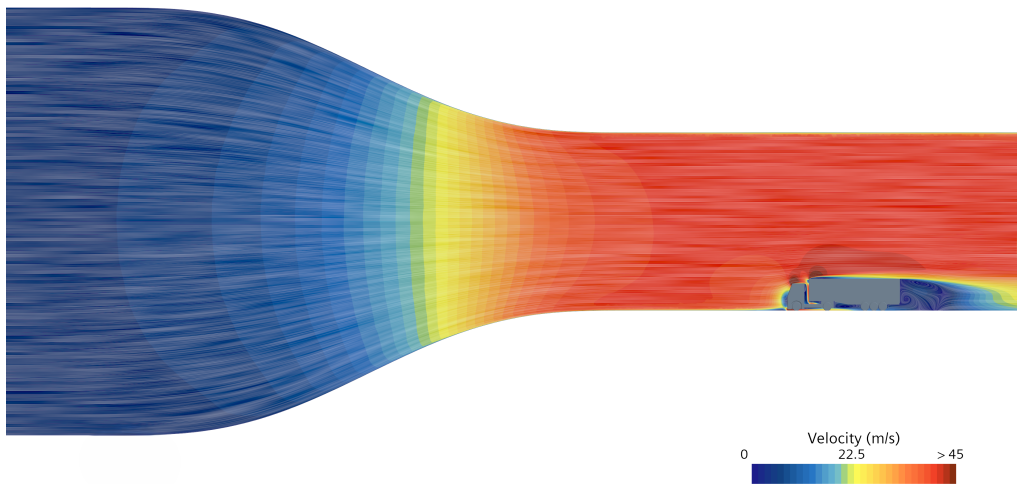


Figur 4.1: Wall Y^+ för baskonfigurationen.

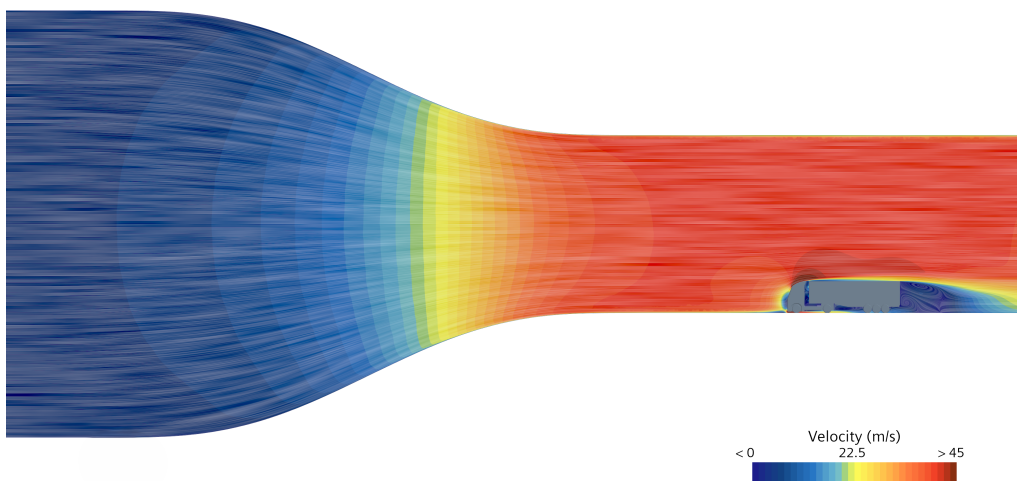
I figur 4.1 illustreras värdena på wall- y^+ över lastbilens yta. Det går tydligt att urskilja områden där värdena är över den önskade lägre gränsen samt att en majoritet av ytan har wall- y^+ värden runt 15-30. Detta är inte helt optimalt då k - ϵ -modellen fallerar vid för låga värden vilket kan medföra att simuleringar inte konvergerar och inte ger lika tillförlitliga lösningar. Simuleringarna som genomfördes hade däremot inga konvergensproblem och wall- y^+ värden över 15 ger ändå relativt bra approximation för log-lagsbeteendet i wall- y^+ .

4.1.2 Låg turbulens

Resultatet av de två lågturbulenta simuleringarna presenteras samt diskuteras för att sedan kunna jämföras mot de högturbulenta och vindtunneltesterna. Figurerna 4.2 och 4.3 visar flödes hastigheten av vinden kring lastbilen i vindtunnelns testsektion.

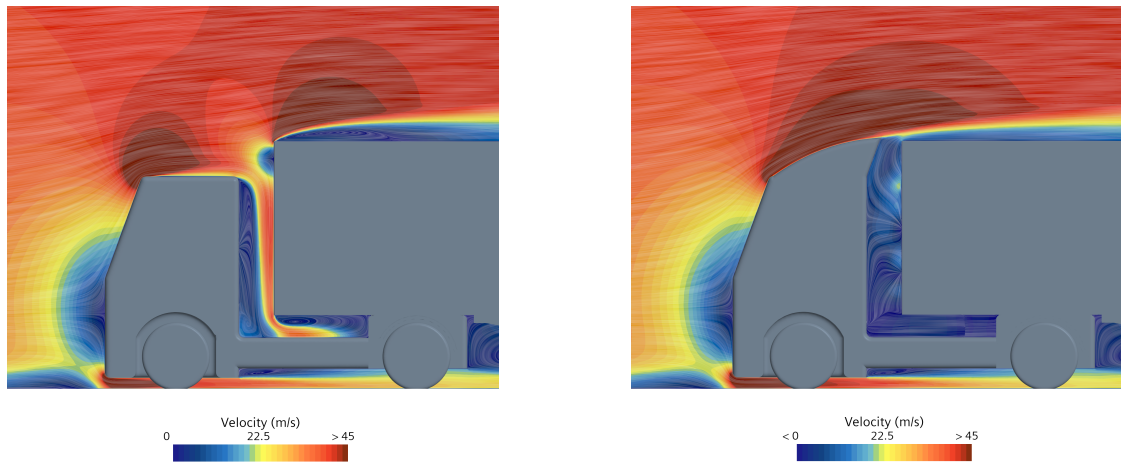


Figur 4.2: Flödes hastigheten kring lastbilen utan luftavvisare från sidan i lågturbulent miljö.



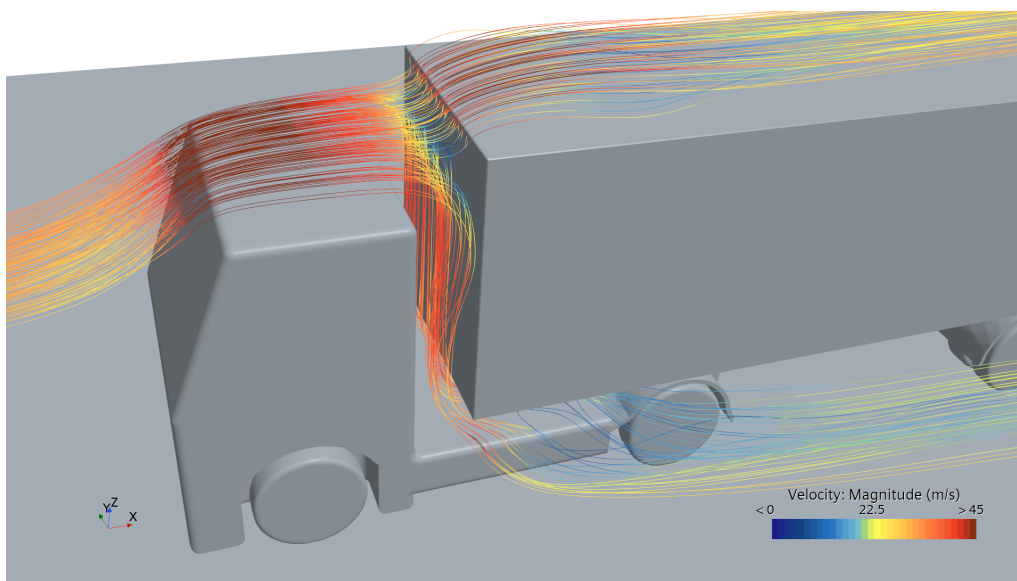
Figur 4.3: Flödes hastigheten kring lastbilen med luftavvisare från sidan i lågturbulent miljö.

Luftavvisaren ger en tydlig förändring av flödet över hytten samt mellan hytt och trailer. Luftavvisaren accelererar luften över framkanten av trailern istället för att flöda ner mellan hytt och trailer. Flödet visas inzoomat i figur 4.4 för att enklare visa skillnaden.

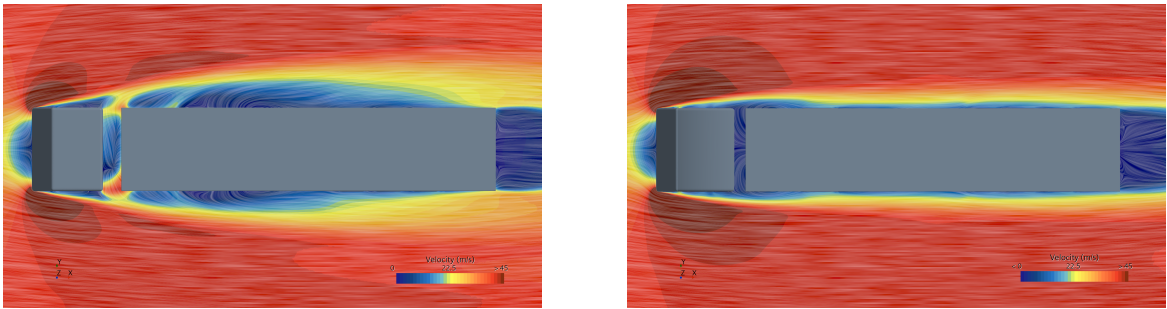


Figur 4.4: Detaljvy av flödet kring området mellan hytten och trailern för båda konfigurationerna. Utan luftavvisaren till vänster och med till höger.

I figur 4.5 illustreras hur flödet över truckens hytt utvecklas. Luften som strömmar ner bakom hytten flödar sedan ut längs sidan av lastbilen, vilket skapar en separationszon längs med truckens sidor som visas i figur 4.6. Flödet kring sidorna av lastbilen förändras markant av luftavvisaren. Separationerna är drastiskt mindre, vilket medför att flödet följer lastbilens kropp närmare och mer strömlinjeformat.

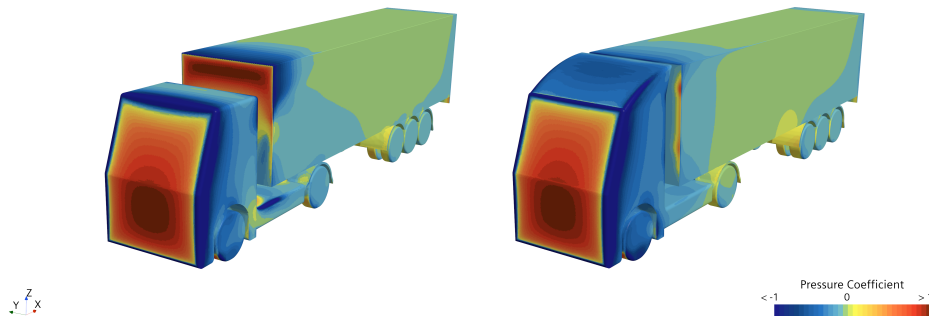


Figur 4.5: Strömningslinjer över taket på lastbilen utan luftavvisare.



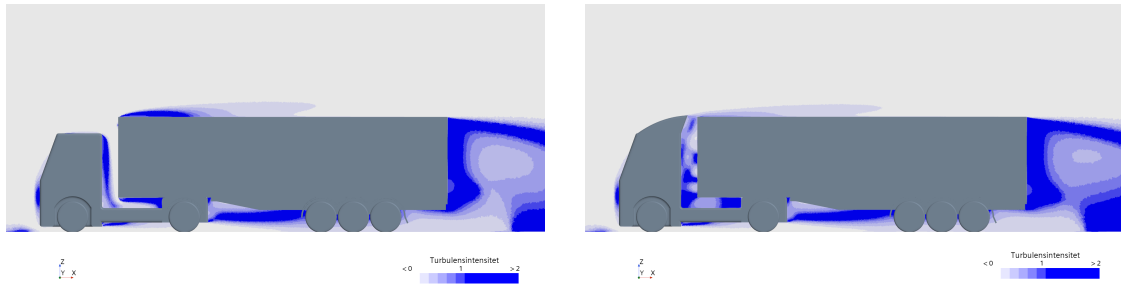
Figur 4.6: Flödes hastigheten kring lastbilen ovanifrån för båda konfigurationerna i lågturbulent miljö. Till vänster är lastbilen utan luftavvisare och till höger är med luftavvisare.

Två stagnationspunkter kan tydligt identifieras i figur 4.4, en gemensam för båda konfigurationerna fram på trucken och en som enbart finns på trucken utan luftavvisare fram på trailerns framkant. Figur 4.7 visar hur tryckkoefficienten varierar över truckens yta för båda konfigurationerna. Stagnationspunkterna kan även identifieras ur C_p som områden där $C_p = 1$.

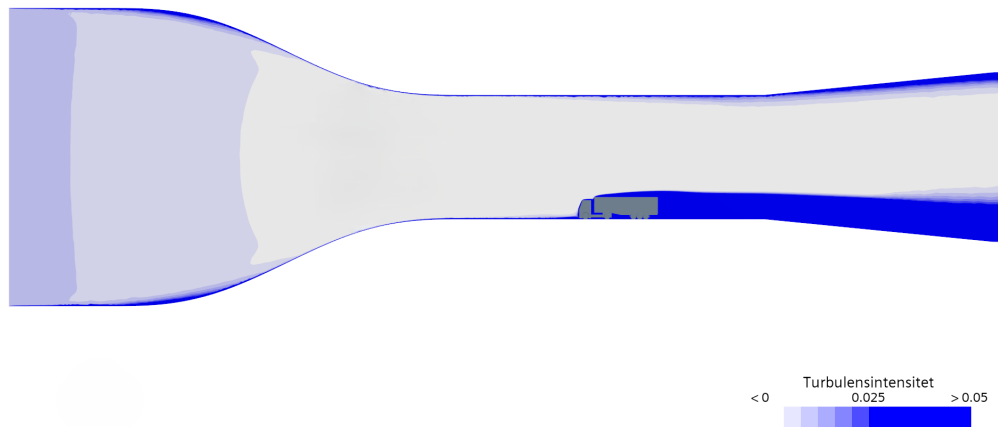


Figur 4.7: Tryckkoefficienten på ytan av båda lastbilskonfigurationerna, utan luftavvisare till vänster och med luftavvisare till höger.

Turbulensintensiteten runt lastbilen i vindtunneln visas i figuren 4.9 för konfigurationen utan luftavvisare. I figur 4.8 visas att turbulensnivåerna är tydligt låga i friströmmen men ökar kraftigt vid interaktion med lastbilen. I lastbilens vak är turbulensen istället hög, vilket förväntades utifrån teori.



Figur 4.8: Visar turbulensintensiteten i ett område kring lastbilen under lågturbulent förhållande för båda konfigurationerna. Till vänster syns lastbilen utan luftavvisare och till höger med luftavvisaren.



Figur 4.9: Turbulensintensiteten inom vind-tunneln.

Hytten utan luftavvisare visar på ett mer turbulent flöde i utrymmet mellan hytten och trailern samt att en kraftig separation bildas ovanför trailerns framkant vilket skapar en kraftig recirkulationsvirvel och turbulens. Med luftavvisaren är separationen från trailern mindre och recirkulationsvirveln ovanför trailern bildas inte. När luftavvisaren introduceras blir flödet mer stabilt och strömlinjeformat vilket är aerodynamiskt fördelaktigt, vilket också framträder i de beräknade luftmotståndskoefficienterna.

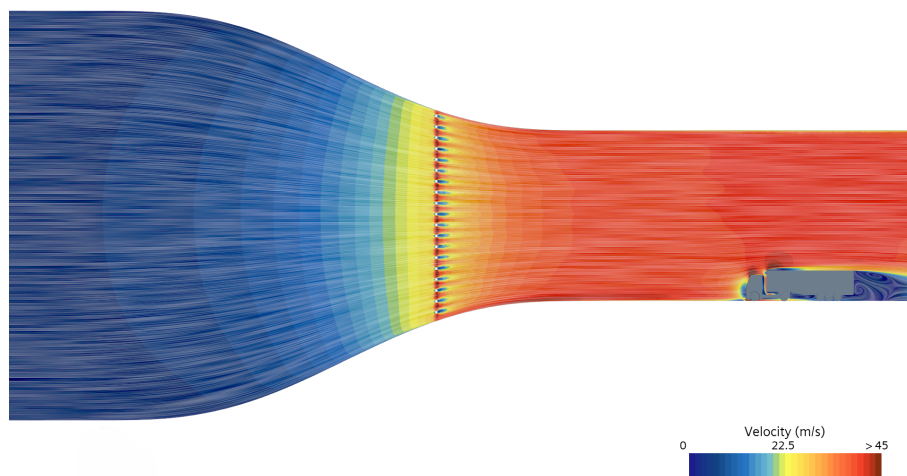
Tabell 4.2: Tabellen visar de beräknade luftmotståndskoefficienterna för båda konfigurationerna under lågturbulenta förhållanden i CFD.

Konfiguration	C_d
Utan luftavvisare	0,496
Med luftavvisare	0,365
$ \Delta C_d $	0,131

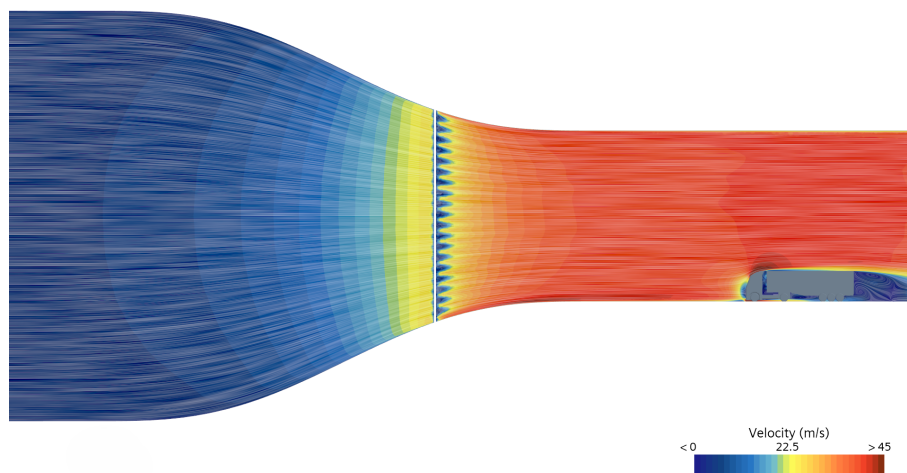
Luftavvisaren har en tydlig effekt på luftmotståndskoefficienten av lastbilen. Eftersom båda konfigurationerna har approximativt samma tvärsnittsarea korresponderar ett lägre värde på C_d direkt mot en förbättring av aerodynamisk prestanda och lägre luftmotståndskrafter.

4.1.3 Höjd turbulens

Nedan presenteras resultaten för simuleringarna med höjd turbulens. Figurerna 4.10 samt 4.11 visar flödes hastigheten runt lastbilen och i vindtunnelns testsektion. Luftflödet runt rutnätet blir påverkat men återvänder snabbt till relativt likformigt flöde.

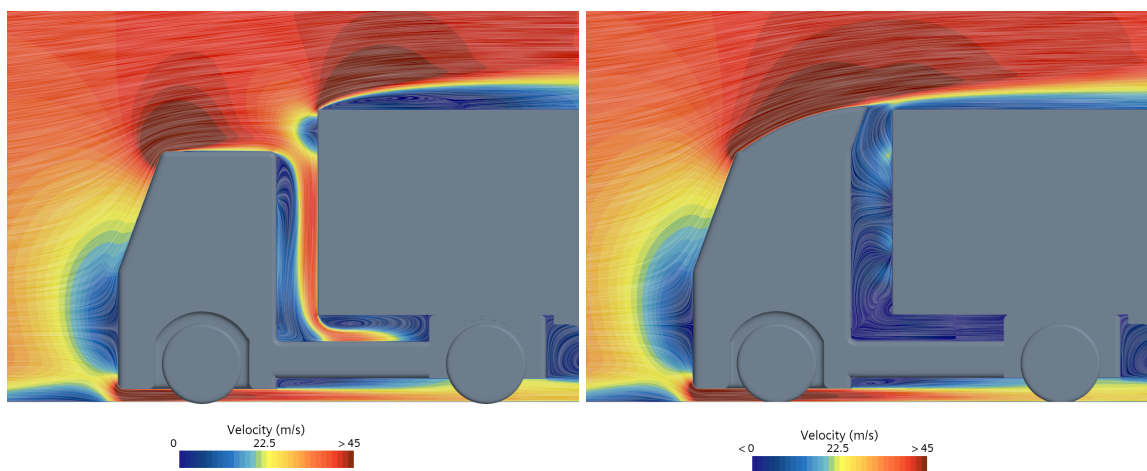


Figur 4.10: Flödes hastigheten kring lastbilen utan luftavvisare i miljö med höjd turbulens.



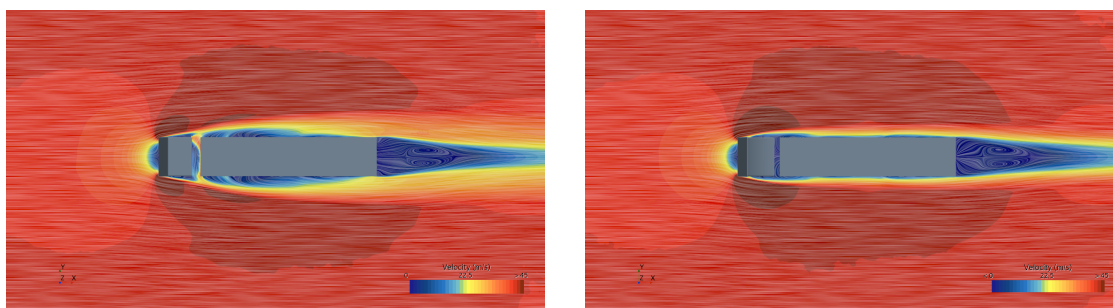
Figur 4.11: Flödes hastigheten kring lastbilen med luftavvisare i miljö med höjd turbulens.

För att enklare kunna visualisera flödes hastigheten mellan hytt och trailer för simulationerna utan luftavvisare samt med luftavvisare visas en inzoomad vy i figur 4.12. Figuren visar att för båda konfigurationerna sker stagnation av den inkommande luften på fronten av lastbilsmodellen. För fallet utan luftavvisare skapas även stagnation för luftflödet som träffar toppen av framsidan på släpet. Detta resulterar i att högt tryck bildas och separation uppstår. Figuren illustrerar även att luftflödet leds mellan hytt och trailer, vilket skapar ökad turbulens. För konfiguration med luftavvisare sker ingen stagnation vid framsidan av släpet eftersom luftavvisaren leder bort luften. Resultatet blir att stagnationspunkter på framsidan av släpet undviks och leder till mindre separation på ovensidan.



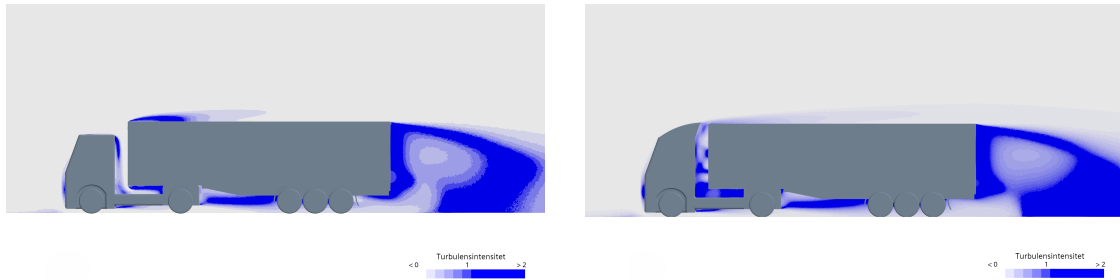
Figur 4.12: Detaljvy av flödet kring området mellan hytten och trailern för båda konfigurationerna. Utan luftavvisare till vänster och med luftavvisare till höger.

I figur 4.13 visas flödes hastigheterna ovanifrån för båda konfigurationerna. För lastbilsmodellen utan luftavvisare sker större separation på sidan jämfört med modellen med luftavvisaren. En anledning är att luft leds mellan hytten och släpet som sedan strömmar ut på sidan av lastbilen. Detta leder då till ökad separation och större vak som orsakas av konfigurationen utan luftavvisare.



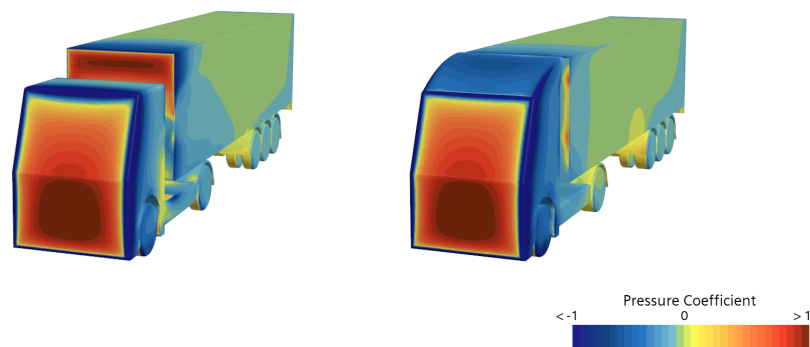
Figur 4.13: Flödes hastigheten kring lastbilen ovanifrån för båda konfigurationerna i miljö med höjd turbulens. Till vänster är lastbilen utan luftavvisare och till höger är med luftavvisare.

I figur 4.14 illustreras turbulensintensitet för båda konfigurationerna. För fallet utan luftavvisare är intensiteten hög vid övergången mellan hytt och släp. Vid konfiguration med luftavvisaren minskar intensiteten vid detta område och flödet effektiviseras. Intensiteten är högre vid undersidan längst bak på släpet för fallet utan luftavvisare. Detta innebär att separationen på baksidan sker tidigare vilket resulterar i större vak.



Figur 4.14: Flödes hastigheten kring lastbilen ovanifrån för båda konfigurationerna i miljö med höjd turbulens. Till vänster är lastbilen utan luftavvisare och till höger är med luftavvisare.

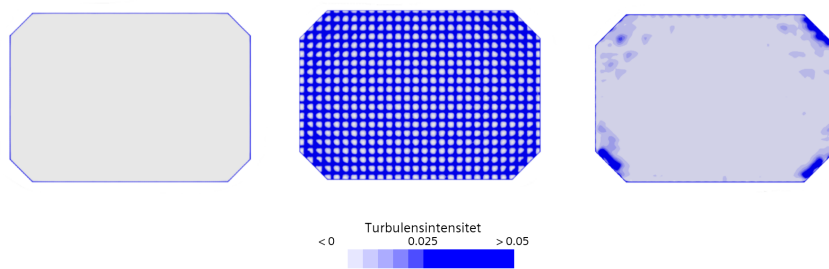
Tryckkoefficienten över båda konfigurationernas ytor visas i figur 4.15. Figuren bekräftar vad som redan konstaterades i föregående figurer. För konfigurationen utan luftavvisare är högtrycksområdena runt fronten och toppen av framsidan på släpet, vilket orsakas av stagnation för luftflödet. Detta betyder att luftavvisaren tar bort högtrycksområdet vid framsidan av släpet och där sker istället en acceleration som resulterar i lågtryck.



Figur 4.15: Tryckkoefficienten på ytan av båda lastbilskonfigurationerna i miljö med höjd turbulens, utan luftavvisare till vänster och med luftavvisare till höger.

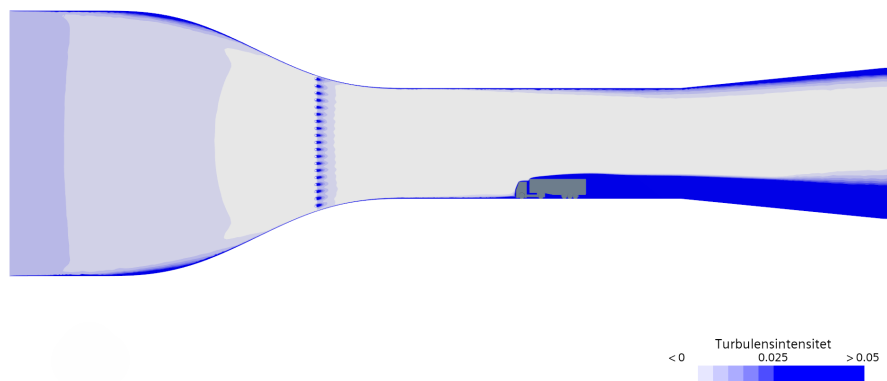
Turbulensintensiteten för rutnätturbulensgeneratoren visas både före, vid själva rut-

nätet samt precis efter rutnätet i tunnelns testsektion, se figur 4.16. Turbulensintensiteten är som lägst innan själva turbulensgeneratoren och ökar marginellt efter turbulensgeneratoren. Resultatet visar att rutnätet fungerar delvis men en större ökning av turbulensintensitet förväntades. En anledning till den låga ökningen kan vara att Wall Y^+ värdet runt rutnätet var för lågt. Detta kan leda till att $k-\varepsilon$ modellen inte löser väggsiktet på rutnätet korrekt.

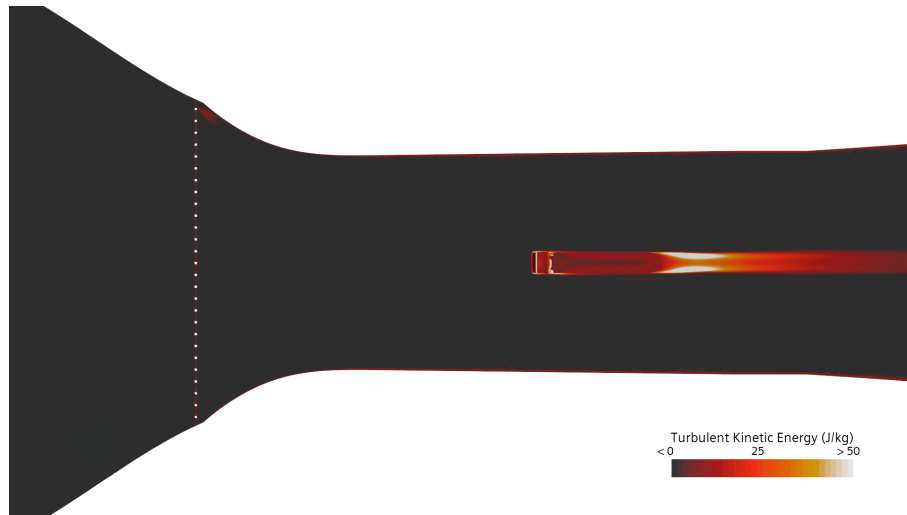


Figur 4.16: Turbulensintensiteten före, vid och efter turbulensgeneratoren.

Ökningen av turbulensintensiteten efter rutnätet var marginell och varade inte speciellt länge, se figur 4.17. Detta beror troligtvis på att simuleringarna kördes i steady state och med Reynolds-averaged Navier-Stokes. Med dessa inställningar modelleras bara genomsnittligt beteende under simuleringstiden och innebär att turbulensen inte utvecklas tillräckligt för att nå lastbilsmodellen. Inom vindtunneln syns även att TKE runt rutnätet inte ökas stort, se figur 4.18. Anledningen beror troligtvis på att meshstorleken efter rutnätet är för stor.



Figur 4.17: Turbulensintensiteten som genereras av rutnätet inom vindtunneln.



Figur 4.18: Vindtunneln ovanifrån och illustrerar TKE som genereras av rutnätet.

Beräknade värden för C_d från de högturbulenta simuleringarna visas nedan i tabell 4.3. Även med mindre än förväntad ökning av turbulens finns det en tydlig skillnad mellan luftmotståndskoefficienten för konfigurationerna.

Tabell 4.3: Beräknade luftmotståndskoefficienter för båda konfigurationerna under högturbulenta förhållanden i CFD.

Konfiguration	C_d
Utan luftavvisare	0,502
Med luftavvisare	0,384
$ \Delta C_d $	0,118

4.1.4 Jämförelser mellan låg och hög turbulens

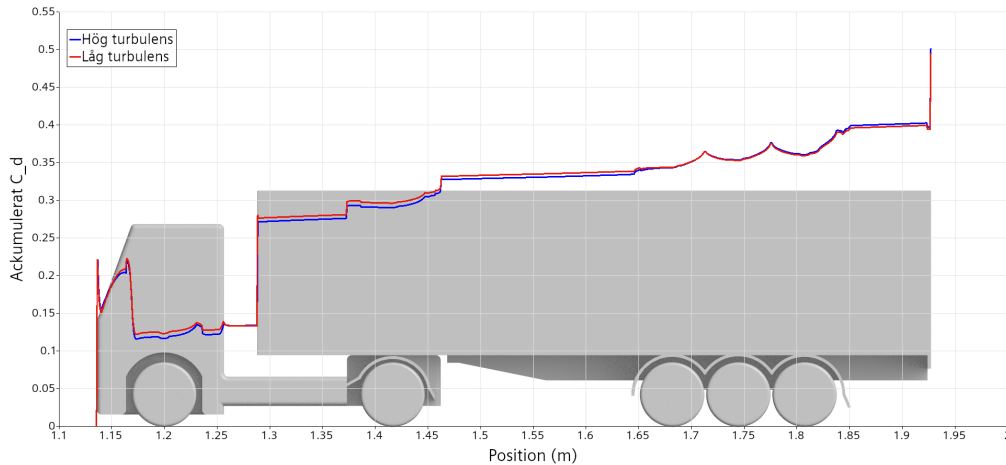
Nedan presenteras resultaten för konfigurationerna i lågturbulens jämfört med högturbulens, se tabell 4.4. Skillnaden i luftmotståndskoefficienten mellan högturbulenta och lågturbulenta simuleringar var högre för konfigurationen med luftavvisaren. Det innebär att påverkan av C_d med luftavvisare är känsligare för variationer i turbulensnivå. Luftavvisaren i mer högturbulent miljö resulterar därför i mindre förbättring. Däremot kan resultaten vara missvisande och därför inte representativa för verklig jämförelse. Anledningen beror på att rutnätet inte fungerade som tänkt.

Tabell 4.4: Beräknade luftmotståndskoefficienter för båda konfigurationerna under låg- och högturbulenta förhållanden.

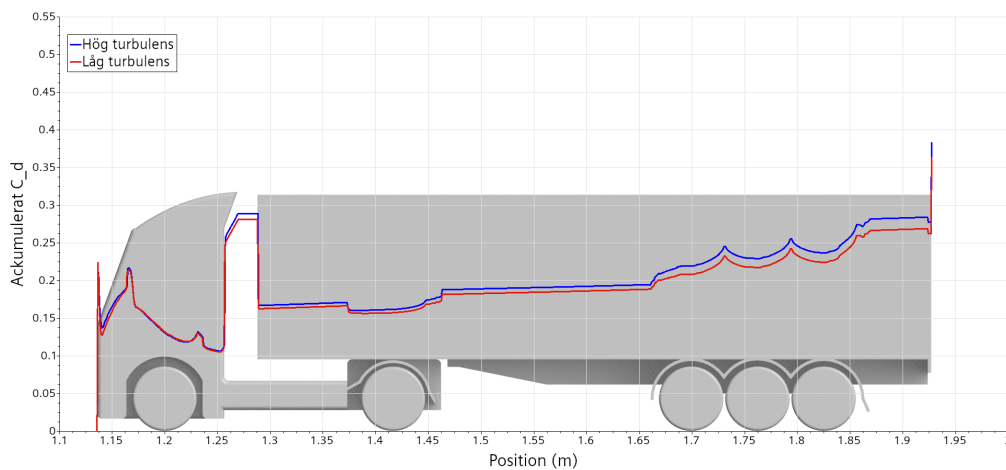
Konfiguration	C_d , låg turbulens	C_d , hög turbulens	$ \Delta C_d $
Utan luftavvisare	0,496	0,502	0,006
Med luftavvisare	0,365	0,384	0,019
$ \Delta C_d $	0,131	0,118	

4. Resultat och diskussion

Den ackumulerade luftmotståndskoefficienten visas nedan för configurationerna utan luftavvisare i figur 4.19 och figur 4.20 visar den ackumulerade luftmotståndskoefficienten med luftavvisare. Luftmotståndskoefficienten följer varandra jämnt i båda figurerna. Det tyder på att luftmotståndet uppkommer på samma sätt för både låg- och högturbulenta förhållanden. Däremot är luftmotståndskoefficienten lägre för fall när luftavvisare användes, vilket innebär att den bidrar till ett lägre luftmotstånd.



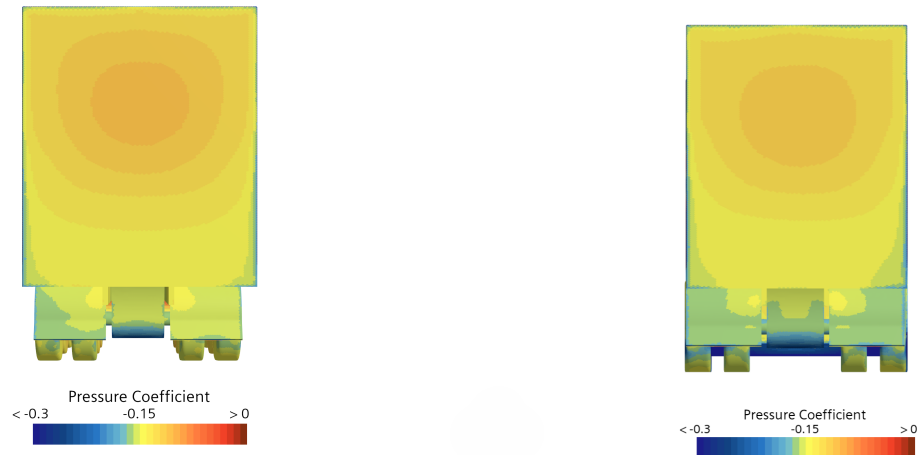
Figur 4.19: Ackumulerade luftmotståndskoefficienten för lastbilen utan luftavvisare i låg- och högturbulent miljö. Den Röda grafen visar för lågturbulent och den blå visar högturbulent.



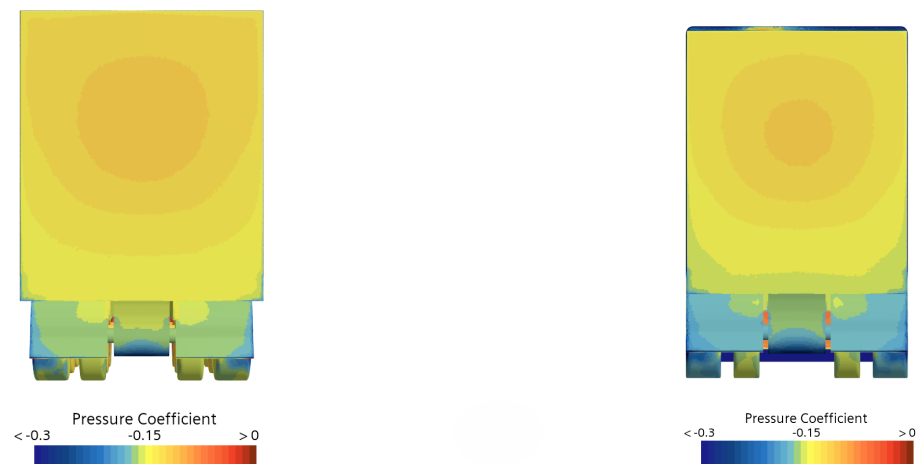
Figur 4.20: Ackumulerade luftmotståndskoefficienten för lastbilen med luftavvisare i låg- och högturbulent miljö. Den Röda grafen visar för lågturbulent och den blå visar högturbulent.

Resultaten för tryckkoefficienten för simulationerna utan luftavvisare visas nedan i figur 4.21 och tryckkoefficienten för simulationerna med luftavvisare visas nedan i figur 4.22. I båda figurerna visas lågturbulenta fallet till vänster och högturbulenta till höger. I figurerna syns att trycket på lastbilens bakdel är något högre för lågturbulenta fall än för högturbulenta. Däremot beror troligtvis detta på numeriska

fel i simuleringen eftersom rutnätet inte fungerade bra som turbulensgenerator med valda inställningar. Det kan även bero på att de lågturbulenta fallen skapar en större vak bakom lastbilen vilket resulterar i högre omvända hastigheter som skapar det högre trycket. På samma sätt syns det att vaken som bildas bakom de högturbulenta skapar mindre omvända hastigheter och därför mindre tryck än för lågturbulenta.



Figur 4.21: Tryckkoefficienten på bakkdelen av släpet för konfiguration utan luftavvisare. Lågturbulens till vänster och högturbulens till höger.



Figur 4.22: Tryckkoefficienten på bakkdelen av släpet för konfiguration med luftavvisare. Lågturbulens till vänster och högturbulens till höger.

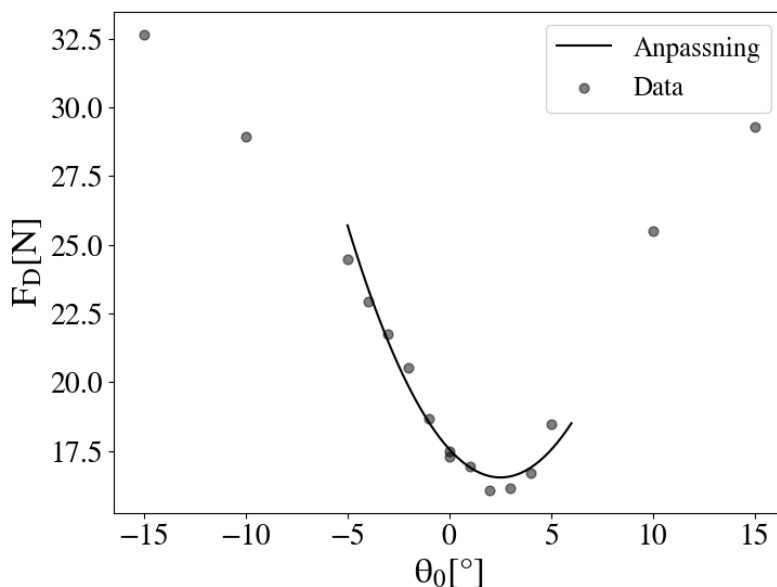
4.2 Analys av vindtunneldata

I detta avsnitt presenteras resultaten av vindtunneltestet och efterföljande databehandling. Resultaten presenteras i den ordning som bestämts falla mest naturligt

från databehandlingen, snarare än i den ordning mätningarna utfördes.

4.2.1 Korrektion av snedställningsvinkel

De inledande mätningarna, som utfördes utan turbulensgenerator och utan luftavvisare, och utfördes för vinklarna $\theta_0 = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15^\circ$ i positiv respektive negativ riktning, illustreras i figur 4.23. Det andragradspolynom som anpassats till datapunkterna i området $\theta_0 \in [-5, 5]$ har ett minimum vid $\theta_0 = 2.516^\circ$. Eftersom luftmotståndskraften väntas vara lägst vid 0° dras slutsatsen att graderingen på plattformen i vindtunneln är $\sim 2.5^\circ$ fel. Detta stärks ytterligare av att kraften bör vara lika vid en given vinkel, oavsett om rotationen är positiv eller negativ, vilket inte är fallet i figur 4.23. Efter justering av samtliga vinklar med 2.5° försvinner detta problem. Till följd av detta kommer samtliga resultat härnäst presenteras mot den korrigerade vinkeln, $\theta = \theta_0 - 2.5^\circ$. Denna anpassning skulle alternativt kunnat genomföras med C_d i stället för F_d . Detta testades och ledde till ett minimum vid 2.419° . Denna skillnad tros bero på att C_d även beror på hastighet och luftdensitet, vilka inte är helt konstanta. Eftersom F_d ej beror på dessa bedömdes denna anpassning mer tillförlitlig.



Figur 4.23: Andragradsanpassning av uppmätt luftmotståndskraft med extrempunkt vid 2.516° .

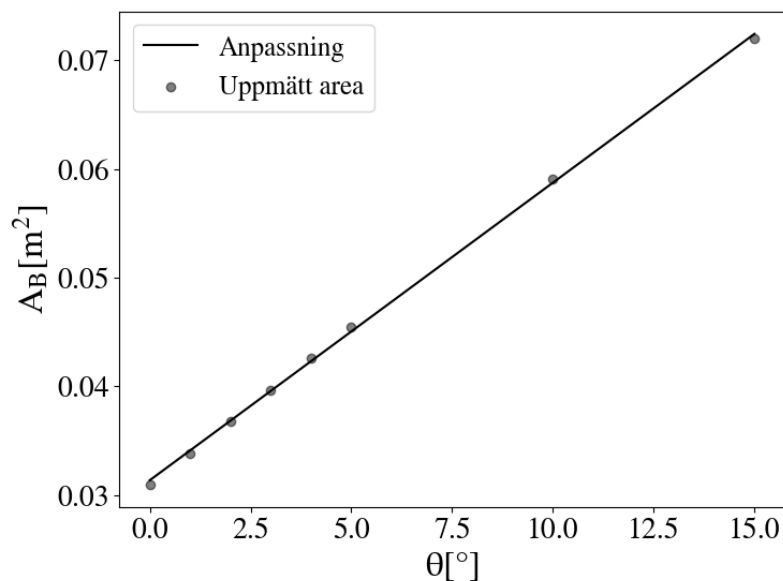
4.2.2 Approximering av projicerad frontalarea

Mätvärden för lastbilsmodellens frontalarea togs fram från projicerade areor i Siemens Simcenter StarCCM+ för valda vinklar (se tabell 4.5). För beräkning av C_d används fortfarande den projicerade vinkeln för 0° men för blockeringskorrektion finns det ett behov av att ha den i flödesled blockerade ytan i tunneln.

Tabell 4.5: Framtagen projicerad frontalarea av lastbilen utan luftavvisare från StarCCM+, samt tillhörande snedställningsvinkel.

Vinkel [°]	Area [m ²]
0	0,031
1	0,034
2	0,037
3	0,040
4	0,043
5	0,045
10	0,059
15	0,072

Till följd av att den metod som användes för mätning av areor i StarCCM+ var tidskrävande, och att datortiden behövdes till annat, utnyttjades en linjär anpassning för att bestämma arean för vinklarna efter korrektionen. Denna anpassning illustreras i figur 4.24. Från diagrammet kan ett tydligt linjärt samband mellan area och snedställning observeras. Med hjälp av funktionen beräknades varje area, som senare användes för att beräkna blockeringskorrektionen för C_d och C_s .



Figur 4.24: Linjär anpassning av uppmätt tvärsnittsarea beroende av snedställningsvinkel. Prickarna representerar datapunkterna från STAR-CCM+.

4.2.3 Felanalys

Felfortplantningsformeln tillämpades för att uppskatta maxfelet i koefficienterna i samtliga fall med undantag för cylindern och analysen av hastighetsberoendet. Felfortplantningen uteblev för cylindern med anledning av att de observationer som gjorts medför osäkerheter som gör feluppskattningen otillförlitlig. För hastighetsberoendet uteblir feluppskattningen då metoden för att fastställa osäkerheten

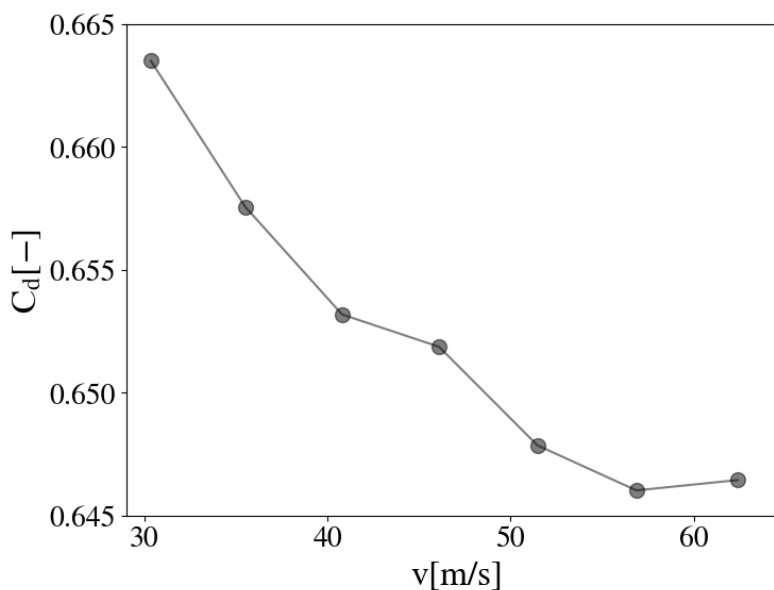
i hastighet ej fungerar för icke konstant hastighet. Vidare kan det konstateras att kraftresidualen från den första mätserien var såpass stor att den indikerade ett systematiskt fel som därefter kunde åtgärdas. Datan från denna mätserie var därför irrelevant att analysera. Samtliga beräknade osäkerheter presenteras i tabell 4.6. Eftersom osäkerheten varierar något beroende på vinkeln har det största värdet valts ut att representera den maximala osäkerheten för mätserien.

Tabell 4.6: Mätserier med tillhörande maxosäkerheter δC_d och δC_s .

Konfiguration(turbulensgenerator/luftavvisare)	δC_d	δC_s
Ingen/utan	0,013	0,015
Ingen/med	0,009	0,008
Rutnät/utan	0,020	0,023
Rutnät/med	0,014	0,018

4.2.4 Reynoldssweep

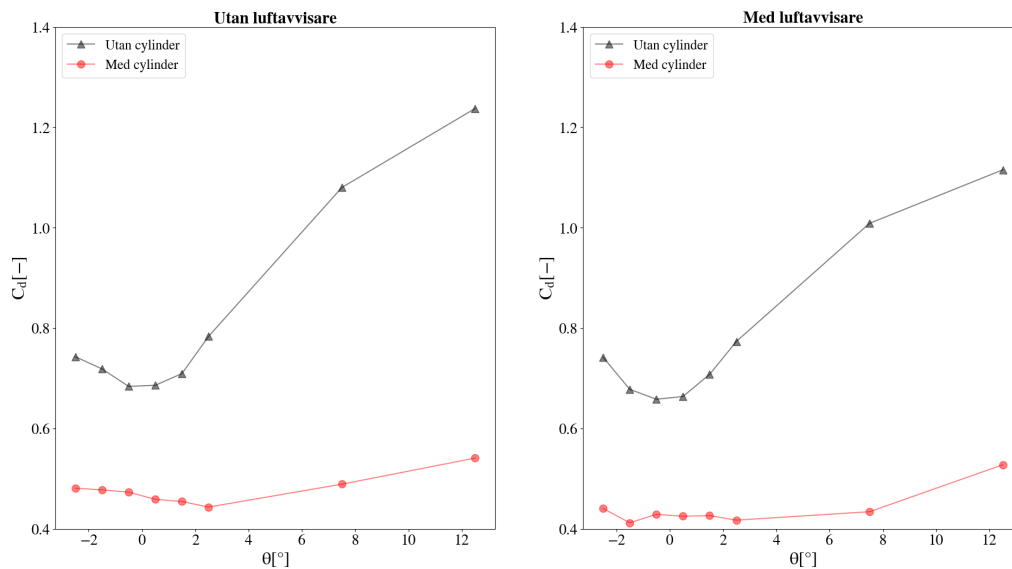
Resultatet av C_d vid olika vindhastigheter presenteras i figur 4.25. Luftmotståndskoefficienten visar sig minska för högre hastigheter än 35 m/s, vilket var hastigheten för resterande mätningar. Skillnaden är som störst $\sim 1.5\%$, vilket indikerar att koefficienten är relativt hastighetsoberoende vid hastigheten som användes vid undersökningen. Mätpunkter för hastigheter lägre än 30 m/s exkluderades, då de uppmätta krafterna var i samma storleksordning som de slumpmässiga variationer orsakade av slumpmässigt brus och störfaktorer som noterades vid mättillfället. Krafterna var alltså i samma storleksordning som osäkerheten.



Figur 4.25: C_d för lastbilen utan luftavvisare och utan rutnätet i vindtunneln vid olika vindhastigheter.

4.2.5 Cylindrisk turbulensgenerator

Den cylindriska turbulensgeneratoren skapade ett högturbulent flöde men uppnådde inte den eftersökta effekten. Förhoppningen var att kraftiga tryckoscillationer skulle skapas och ge upphov till oscillerande sidokrafter på lastbilmodellen samt skapa en Von Kármán vortex-gata. Turbulensgeneratoren hade för stor diameter, var placerad för nära lastbilmodellen och flödes hastigheten var för hög för att önskad effekt skulle uppstå. Detta medförde att hela lastbilmodellen hamnade i cylinderns vak och gjorde luftmotståndet relativt oberoende av snedställningsvinkeln vid lägre vinkelantal (se fig. 4.26). På grund av detta blev vidare analys av luftavvisarens prestanda med mera för projektets syfte irrelevant. För att bespara tid beslutades det att inte genomföra simuleringar i CFD med den cylindriska turbulensgeneratoren, då det i bästa fall skulle innebära en liknande effekt som uppmättes i vindtunneltestet och skapa ointressanta data. Fortsättningsvis tillämpas endast den rutnätsformade turbulensgeneratoren för att inducera turbulens.



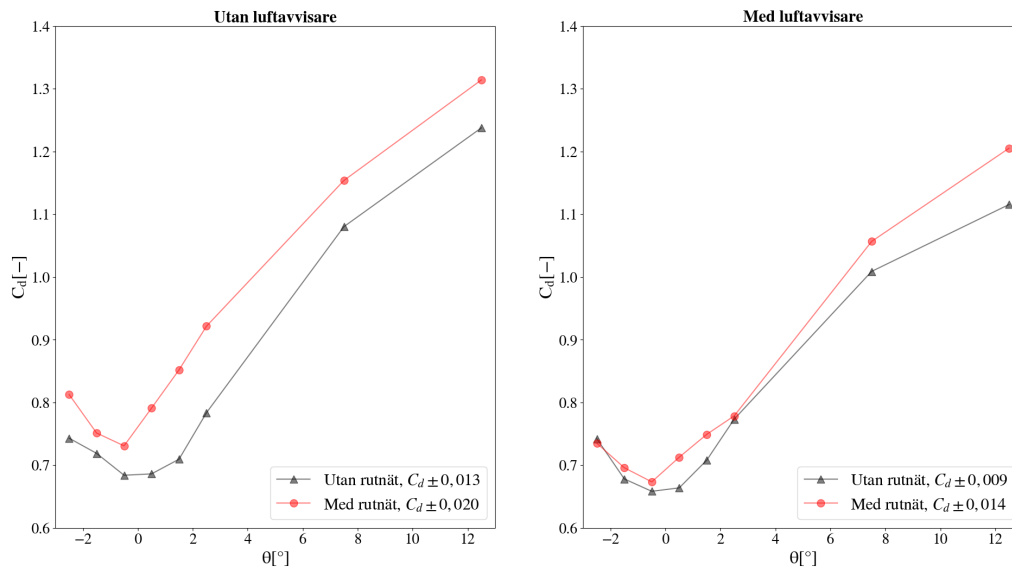
Figur 4.26: Uppmätt luftmotstånd för snedställningsvinklar inom intervallet $[-2.5^\circ, 12.5^\circ]$ vid testning av cylindrisk turbulensgenerator.

4.2.6 Rutnätsformad turbulensgenerators inverkan på C_d

Utifrån de observationer som gjordes med hjälp av de olika garntuftarna fastställdes det visuellt att rutnätet ökade turbulensintensiteten. Eftersom numeriska värden för turbulensintensiteten ej bestämts kommer turbulensnivån från rutnätet i fortsättningen att beskrivas som förhöjd. Från tidigare studier kan den däremot antas ej överskrida 4% [4].

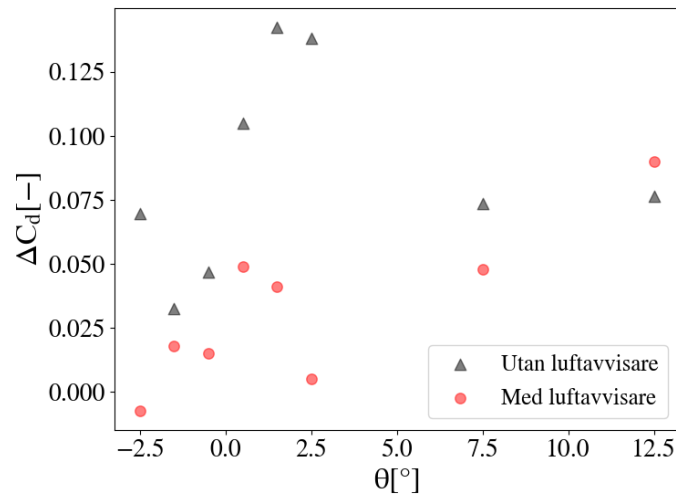
Från figur 4.27 kan den förhöjda turbulensens inverkan på lastbilens C_d avläsas. För fallet utan luftavvisare avläses skillnaden mellan med och utan rutnät vara konsekventa runt 0,05-0,1. Med luftavvisare är skillnaden mer otydlig. Rutnätet resulterade i ett högre C_d , förutom för den lägsta vinkeln. Om man tar osäkerheten

i beaktning är det däremot inte omöjligt att C_d egentligen är högre med rutnätet även i detta fall. För vissa vinklar är skillnaderna så pass små att det rent numeriskt inte heller är otänkbart att rutnätet orsakat en minskad luftmotståndskoefficient när luftavvisaren är monterad. Detta är dock fysikaliskt orimligt, eftersom turbulensen bör höja C_d . Om detta vore fallet borde inte heller värdena för förhöjd turbulens konsekvent till den grad som går att observera i figur 4.27.



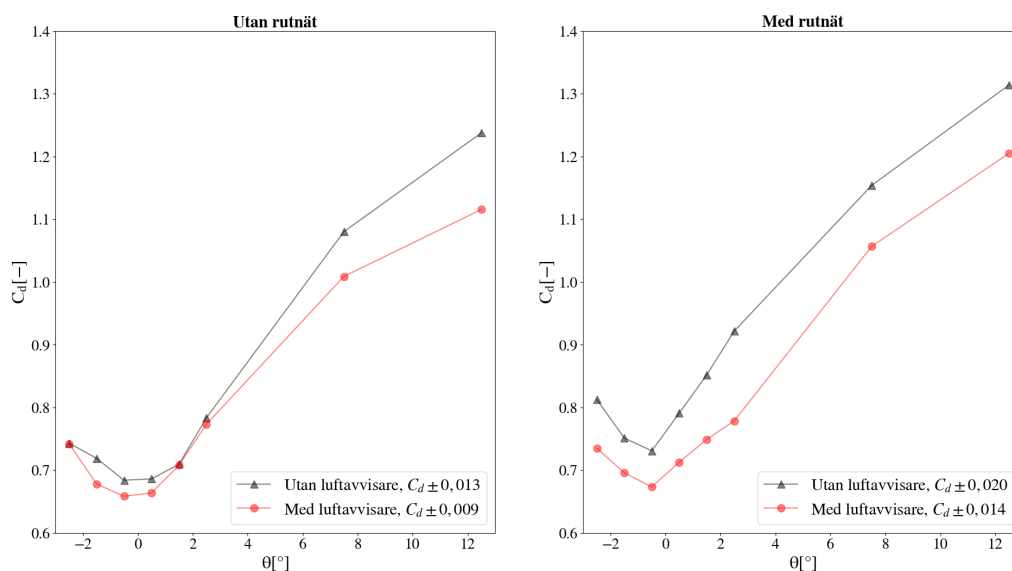
Figur 4.27: Uppmätt C_d med och utan luftavvisare i vindtunnel.

Om man tittar närmare på differenserna går det att iaktta ytterligare aspekter. I figur 4.28 kan man se differenserna mellan med och utan rutnät för både med och utan luftavvisare. Det blir här tydligt att differenserna mellan med och utan rutnät blir nämnvärt mindre med luftavvisaren än utan. Denna slutsats kan sägas vara ganska säker, trots att de flesta av värdena kan tänkas ligga inom varandras felmarginal. Motiveringen till detta är först och främst att nästintill samtliga differenser är lägre med luftavvisaren än utan. Från figur 4.28 är det svårt, om inte omöjligt, att observera något samband mellan vinkel och differens. Med det sagt är det samtidigt tydligt att differenserna ändras beroende på vinkel. Datan indikerar att differenserna kan bli olika för samma vinkel beroende på vilken rotationsriktningen är. Detta bör antingen bero på slumpmässiga variationer, eller på asymmetrier hos lastbilsmodellen. Det går inte heller att säga huruvida vissa vinklar konsekvent ger en högre differens. Mest sannolikt är att differenserna varierar på grund av slumpmässiga faktorer snarare än vinklarna.



Figur 4.28: Skillnaden i C_d mellan hög- och lågturbulenta förhållanden (med och utan rutnät) för lastbil med respektive utan luftavvisare.

Mätpunkterna bedöms vara för få för att tillämpning av statistiska verktyg ska vara tillförlitligt. Från figur 4.28 går det dock att se antydning till ytterligare en trend, utöver de som redan konstaterats. Utöver att differensen i regel blir lägre när luftavvisaren är monterad, verkar detsamma gälla för variationen i differensen mellan olika vinklar. Som ovan konstaterat är mätpunkterna för få för att betrakta detta som en statistisk trend. Däremot är det fysikaliskt rimligt. Eftersom ökad turbulensintensitet innebär ett mer slumpartat flöde, bör det även leda till fler slumpmässiga variationer i C_d . Om luftavvisaren reducerar känsligheten för turbulens, bör den även rimligen reducera inverkan från turbulensens slumpartade effekter.



Figur 4.29: Uppmätt C_d med och utan rutnät i vindtunnel.

I figur 4.29 kan effekten av luftavvisaren avläsas. Vid lågturbulenta förhållanden är skillnaden mellan konfigurationerna lägre men skillnaden mellan dem visar en

ökning med snedställningsvinkeln. Datapunkterna är dock få vilket skapar osäkerhet om skillnadens faktiska storlek. Om man kontrasterar detta med högturbulenta förhållanden med rutnät får luftavvisaren en låg ökning medan utan luftavvisare får en mer märkbar ökning. Luftavvisaren visar således på en låg känslighet för högturbulenta förhållanden medan avsaknaden av luftavvisare är desto mer känslig.

För att kunna jämföra dessa resultat med CFD-resultaten kan både absoluta värden och differenser jämföras. Eftersom CFD-simuleringarna endast genomförts utan snedställning bör motsvarande konfiguration representera vindtunneltestet vid jämförelse. I tabell 4.7 presenteras de värden som senare kommer att jämföras. I och med att värde för exakt 0° saknas kommer i stället ett medelvärde för $\pm 0.5^\circ$ att användas.

Tabell 4.7: Medelvärden av luftmotståndskoefficient och skillnad i luftmotståndskoefficient vid $\theta = \pm 0.5^\circ$.

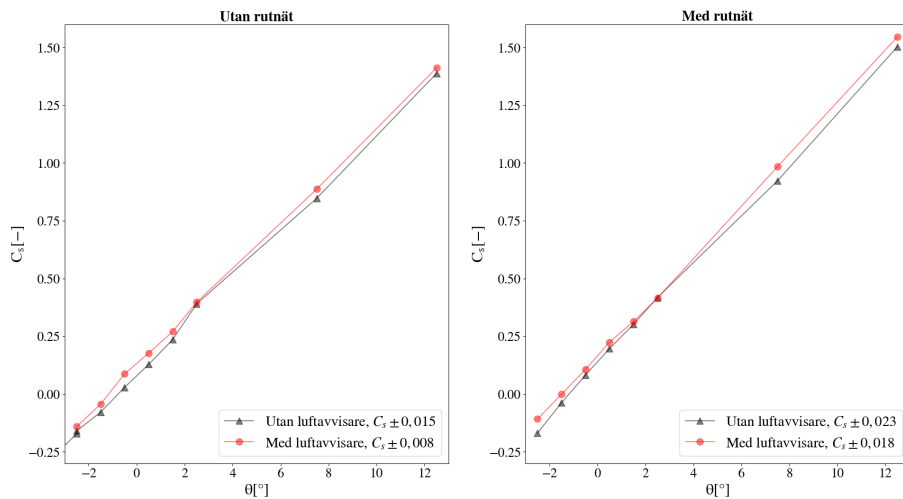
Konfiguration	C_d , låg turbulens	C_d , hög turbulens	$ \Delta C_d $
Utan luftavvisare	0,685	0,761	0,076
Med luftavvisare	0,661	0,693	0,032
$ \Delta C_d $	0,024	0,068	

De värden som presenteras i tabell 4.7 indikerar att vid 0° snedställning medför luftavvisaren att skillnaden mellan låg- och högturbulent flöde mer än halveras. Det verkar även som att den förhöjda turbulensen höjer luftavvisarens inverkan mer än trefaldigt.

I relation till tidigare kunskap om hur friströmsturbulens påverkar C_d verkar dessa resultat rimliga. De upptäckter som presenteras kort i avsnitt 2.3.2 verkar även gälla för lastbilsmodellen. Konfigurationen som presterar bäst i lågturbulenta förhållanden alltså den med luftavvisare-påverkades nämnvärt mindre när turbulensintensiteten ökades.

4.2.7 Rutnätsformad turbulensgenerators inverkan på C_s

För C_s återfinns resultatet i figur 4.30. Sambandet med snedställningsvinkeln uppvisar sig linjärt för båda konfigurationerna i både hög- och lågturbulenta fall. Luftavvisaren har ett högre värde på C_s än utan, men värdena ligger nära varandra och med god marginal innanför felmarginalerna för att det ska gå att dra tydliga slutsatser.



Figur 4.30: Uppmätt C_d med och utan rutnät i vindtunnel.

4.3 Jämförelse mellan vindtunnelresultat och CFD

Genom att jämföra C_d från vindtunneldata vid 0° snedställningsvinkel mot de CFD-framtagna värdena på C_d går det att observera att luftmotståndskoefficienten från vindtunneltesterna är konsekvent högre än vid CFD-mätningarna oberoende av om konfigurationen innefattar luftavvisare eller ej (se tabell 4.8). Jämförelser bör således fokusera på differenser mellan konfigurationerna.

Om C_d för konfigurationen med och utan rutnät ska jämföras blir ΔC_d således ett mer relevant mått, eftersom det absoluta värdet av C_d konsekvent skiljer sig markant. I tabell 4.8 presenteras utöver samtliga värden på C_d även samtliga differenser.

Tabell 4.8: Luftmotståndskoefficienter och differenser för vindtunneltest och CFD. Samtliga värden är hämtade från tabeller 4.4 och 4.7.

Vindtunnel	C_d , låg turbulens	C_d , hög turbulens	$ \Delta C_d $
Utan luftavvisare	0,685	0,761	0,076
Med luftavvisare	0,661	0,693	0,032
$ \Delta C_d $	0,024	0,068	
CFD			
Utan luftavvisare	0,496	0,502	0,006
Med luftavvisare	0,365	0,384	0,019
$ \Delta C_d $	0,131	0,118	

Det första som är värt att notera är att rutnätet konsekvent ökar luftmotståndskoefficienten i både vindtunneln och CFD. Sett till hur luftavvisaren påverkar ändringen i C_d , så visar data från vindtunneln att luftavvisaren konsekvent minskar den ökade turbulensens inverkan på koefficienten. Som tidigare konstaterat i avsnitt 4.5.6 är skillnaden i genomsnitt drygt dubbelt så stor utan luftavvisare som med. Resultaten från simuleringarna visar å andra sidan att differensen mellan hög och låg

turbulens är högre med luftavvisaren än utan, vilket direkt motstrider resultatet från vindtunneln. Detta är i kombination med illustrationen av turbulensintensitet i simuleringarna, en indikation på simuleringen inte lyckas återskapa den turbulens som rutnätet genererar på ett verklighetstroget sätt. Trots detta är C_d konsekvent högre med rutnätet än utan. Vad som kan tänkas orsaka detta diskuteras i närmare detalj i avsnitt 4.7.2.

4.4 Felkällor

Under detta kapitel kommer de felkällor som kan uppstå under projektets gång. Dessa felkällor tas upp både för vindtunneln och för CFD. Vidare bör skillnaden i C_d mellan CFD och vindtunnel tas upp. Att vindtunnelresultaten konsekvent är högre är i linje med de resultat som erhöles när lastbilsmodellen ursprungligen skapades och testades[5]. Förklaringarna till detta var då att infästningspunkterna i vindtunneln utsattes för flödet, att marken inte rörde sig relativt lastbilen i vindtunneln och att lastbilen i vindtunneln var något upphöjd från marken, vilket bedömdes påverka flödet under lastbilen. Eftersom simuleringarna i detta projekt i stället genomförts så likt vindtunneltestet som möjligt, bör inte delen om den rörliga marken gälla. Däremot tros de andra felkällorna kvarstå och fortsatt gälla, eftersom modellen inte höjts från marken i simuleringen. Infästningspunkterna har inte heller lagts till i simuleringarna.

4.4.1 Felkällor i vindtunneln

Den största felkällan i vindtunneltestet är känsligheten i mätutrustningen. Trots försiktighet vid rotationen av plattformen ansamlades i regel ett mätfel på $\sim 0.1 N$ under en typisk mätserie. Utöver detta var lastbilens infästning utsatt för flödet under lastbilen, vilket högst troligt bidragit till förhöjda värden på framförallt luftmotståndskraften. På grund av platsbrist i vindtunnelns testsektion behövde lastbilsmodellen demonteras och monteras många gånger, vilket ökade risken för förändringar i dess position och därmed mätdatafel. En annan uppenbar felkälla är felet i vinkelgraderingen på rotationsplattformen. Även om detta fel kunde korrigeras vid databehandlingen medförde det ett flertal oönskade problem. Exempelvis erhöles inget experimentellt värde för C_d vid exakt 0° . Vidare erhöles värden för färre vinklar än som var önskat.

4.4.2 Felkällor i CFD

Vid simulering kan det framkomma ett flertal olika felkällor. Eftersom STAR-CCM+ är ett iterativt program kan det uppkomma små beräkningsfel som kan komma att göra skillnad i beräkningarna. Då de konstitutiva differentialekvationerna approximeras algebraiskt kan diskretiseringsfel uppstå samt att datorer inherent har en begränsad flyttalsprecision, vilka kan komma att bidra till numeriska fel under iteration. Diskretiseringsfel kan dock lösas med ett finare nät och flyttalsprecisionen för moderna datorer är väldigt bra.

Arean för lastbilsmodellen med luftavvisare är något större än lastbilsmodellen utan luftavvisare, skillnaden är liten att den har försumrats vid beräkning av C_d . Den area som har använts för samtliga beräkningar är 0.031 m^2 .

Samtliga simulationer är simulerade i steady-state och med RANS-modellen. RANS tar ett medelvärde i beräkningarna och kan vara en bidragande faktor till att resultaten för högturbulens inte stämmer överens med verkligheten. Inställningar som användes för simuleringarnas mesh är även en orsak till uppkomna fel. Turbulensen som skapades med rutnätet försvann relativt snabbt, därav kan fler celler efter turbulensgeneratorn ha medfört förbättrade resultat. Fel i simulering av luftflödet nära lastbilens ytor kan ha orsakats av valda inställningar på mesh.

4.5 Förbättringar

För att skapa en bättre förståelse för hur friströmsturbulens påverkar faktiska vägfordon behövs flertalet undersökningar som går bortom avgränsningarna för detta projekt. Det finns dock många förbättringar som ligger inom projektets ramar. Dessa diskuteras i följande avsnitt.

4.5.1 Förbättringar av vindtunneltest

De största problemen som uppenbarade sig vid analys av vindtunnelresultaten var att datamängden var liten, vilket gjorde det svårt att bestämma tydliga trender. Polynom Anpassningar till resultaten hade troligen gett en bättre bild än de linjer som återfinns i graferna. Mängden datapunkter gjorde dock att detta ej var gångbart. Bayesianisk regression testades för två av mätserierna, med polynomgrad upp till och med 7. Samtliga visade tydliga tecken på över- eller underanpassning, varför anpassningarna utelämnats ur både metod och resultat. Vidare medförde som tidigare konstaterat vinkelfelet ett antal problem. Det till analys tillgängliga vinkelspektrumet minskades som följd, och medförde svårigheter vid jämförelse med simuleringsresultaten. En förbättring vore således att ta hänsyn till detta vinkelfel redan vid mätning.

4.5.2 CFD

Det finns olika förbättringsmöjligheter i detta projekt, främst inom CFD-delen där val av andra modeller hade varit fördelaktiga för att få mer realistiska resultat som liknar dem från vindtunneln. Även med samma valda modeller hade förbättringar kunnat göras, framförallt med avseende på valt mesh. För att simulera flödet runt lastbilsmodellen mer korrekt hade Wall Y^+ värdet behövt vara större, speciellt på framsidan av släpet. För att minska upplösningen av turbulensen som skapades av rutnätet hade fler antal celler efter turbulensgeneratorn behövts. Ifall tiden inte hade varit en avgörande faktor hade även LES-simulationer kunnat utföras istället för att endast utföra steady-state-simulationer. LES hade potentiellt kunnat simulera den passiva turbulensen bättre än vad nuvarande modeller gör och på så sätt ge bättre, mer verklighetstrogna resultat.

4.6 Etiska aspekter

CFD-simuleringar och aerodynamiska vindtunneltester är viktiga verktyg vid analys av fordons strömningsmekanik, men detta medför etiska aspekter som miljöpåverkan, överkonsumtion och säkerhet.

4.6.1 Miljöpåverkan

Lastbilstransport är en stor bidragare till transportsektorns utsläpp. Eftersom luftmotståndet utgör en betydande del av det totala rullmotståndet vid långfärdskörning, är aerodynamiken en avgörande faktor för fordonens bränsleförbrukning och därmed miljöpåverkan. Genom att öka förståelsen för aerodynamik hos vägfordon och dess applikationer kan både testning för lastbilar inom industrin bli mer verklighetstrogen och applicerbar och således göra effektiviseringsarbete av lastbilars aerodynamik enklare.

Utöver detta är både CFD-simuleringar och vindtunneltester energikrävande processer. Genom noggrann planering och effektiva testsessioner kan testtiden, särskilt i vindtunneln, minskas vilket leder till en betydande energibesparing.

4.6.2 Säkerhet

Vindtunnlar kan driva luftflöden med mycket hög hastighet. Vid vindtunneltesterna, exempelvis vid reynoldssweepen, kördes vindtunneln i hastigheter på över 60 m/s. Om gruppen inte tar hänsyn till lämplig säkerhetsutrustning och rekommenderade säkerhetsprotokoll vid vindtunnelbruk, kan både turbulensgeneratorn och lastbils-skalmodellen agera som projektiler vilket kan skada både vindtunneln, mätutrustning och testpersonal.

5

Slutsats

5.1 Analys och dragna slutsatser

De slutsatser som kan dras av projektet är flertaliga, om än begränsade när det kommer till omfattning utanför de undersökta förhållandena. Från det testet som gjordes i vindtunnel går det tydligt att se att en förhöjd turbulensnivå höjer lastbilens luftmotståndskoefficient. Vidare kan det observeras att luftavvisaren fortfarande sänker luftmotståndskoefficienten när turbulensintensiteten höjs. Det finns heller inget som tyder på att små variationer i infallsvinkel påverkar detta, eftersom samma observationer gjorts för ett spektrum av vinklar. Introduktion av passiva turbulensgeneratorer vid vindtunneltester verkar således inte orsaka problem när det gäller repeterbara resultat. Avslutningsvis gällande slutsatserna från vindtunneltestet kan det konstateras att luftavvisaren, utöver att fortsatt sänka luftmotståndskoefficienten vid förhöjd turbulens, dessutom lyckas reducera turbulensens inverkan på luftmotståndet. Utan luftavvisare uppvisar lastbilmodellen liknande tendenser som en sfär vid förhöjd turbulens. Eftersom orsaken till sfärens ökade C_d enligt tidigare studie[10] beror på att turbulensen påverkar tryckgradienten mellan sfärens vak och kringliggande flöde, förmodas de uppvisade effekterna bero på direkt relaterade fenomen. Luftavvisaren bör leda till senare flödesseparation och därav en mindre intensiv vak, vilket tros vara anledningen till att luftavvisaren minskar turbulensens inverkan på C_d .

Simuleringsarbetet gav olyckligtvis inte resultat konsekventa med resultaten från vindtunneln. Den enda egentliga slutsats som kan nås är att verklighetstroga simuleringar av fysiska rutnätsformade passiva turbulensgeneratorer inte verkar gå att genomföra med de modeller som använts.

5.2 Möjligheter till vidare arbete

Som tidigare nämnt har inte projektet resulterat i önskvärda simuleringsresultat. Ett av projektets syften var att undersöka huruvida de passiva turbulensgeneratorer som använts i vindtunneln går att återskapa i CFD. Resultaten visade att rutnätet, vilket var den turbulensgenerator som faktiskt fungerade i vindtunneln, med de valda inställningarna inte kunde simuleras på ett verklighetstroget sätt. Att vidare justera inställningarna enligt de förbättringsförslag som diskuteras i avsnitt 4.5.2 bedöms därför vara ett naturligt nästa steg.

Det finns även en myriad av aspekter som bör undersökas vidare, och som faller utanför projektets ramar. Projektet har exempelvis begränsats till en 18 gånger nedskalad lastbilsmodell, utan rörlig mark. Det största problemet detta orsakat är att det Reynoldstal som kan uppnås är 18 gånger mindre än vad en fullstor lastbil uppnår vid samma hastigheter. För att kunna konstatera huruvida de observationer som gjorts även gäller i verkligheten skulle alltså tester i större skala behöva genomföras.

Vidare förblir den exakta turbulensintensiteten som rutnätet ger upphov till okänd. Att bestämma denna nivå exakt skulle medföra att efterföljande projekt där rutnätet används för att generera friströmsturbulens skulle kunna nå mer specifika slutsatser.

Litteratur

- [1] Statistics Explained, *Final energy consumption in transport - detailed statistics*, sept. 2024. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Final_energy_consumption_in_transport_-_detailed_statistics (hämtad 2025-03-26).
- [2] Volvo Trucks, *Aerodynamikens betydelse*, 2022. URL: <https://www.volvotrucks.se/sv-se/news/magazine-online/2022/nov/aerodynamikens-betydelse.html> (hämtad 2025-02-09).
- [3] A. Sadan och V. S. Poloni, "Towards on-road aerodynamics," examensarb., Chalmers University of Technology, 2022.
- [4] S. Wordley och J. Saunders, *On-road Turbulence*. DOI: 10.4271/2008-01-0475.
- [5] A. Dineff, A. Upadhyaya, K. N. Rao, P. van Hoorn och V. Gudihal, "Aerodynamic investigations of a simplified truck under high yaw wind conditions," examensarb., Chalmers tekniska högskola, Göteborg, Sverige, 2021.
- [6] J. N. Reddy, *An Introduction to Continuum mechanics, Second Edition*, 2:a upplagan. New York, USA: Cambridge University Press, 2013, ISBN: 978-1-107-02543-1.
- [7] N. Hall, *Drag of a Sphere*, 2023. URL: <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/drag-of-a-sphere/> (hämtad 2025-04-26).
- [8] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 7. uppl. New York, NY, USA: Tata Mcgraw Hill Education, 2011, ISBN: 8-0-07-352934-9.
- [9] T. M. P.W. Bearman, *Effect of free stream turbulence on the flow around bluff bodies*, 1983. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0376042183900027> (hämtad 2025-03-31).
- [10] I. Rodriguez, O. Lehmkuhl och M. Soria, "On the effects of the free-stream turbulence on the heat transfer from a sphere," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, årg. 164, 2021, All Open Access, Green Open Access. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120579. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85094597273&doi=10.1016%2fj.ijheatmasstransfer.2020.120579&partnerID=40&md5=99e66cde1a3d1ff3af29f2da506d88cd> (hämtad 2025-05-12).
- [11] Z. Nikolov, "Effect of upstream turbulence on truck aerodynamics," examensarb., LiU, Linköpings universitet, 2017. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1113140/FULLTEXT01.pdf> (hämtad 2025-05-22).
- [12] H. K. Versteeg och W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, 2. uppl. Harlow, England: Pearson Education Limited, 2007, ISBN: 978-0-13-127498-3.

- [13] Chalmers tekniska högskola, *Chalmers Strömningslaboratorium*, 2023. URL: <https://www.chalmers.se/infrastrukturer/chalmers-%20stromningslaboratorium/> (hämtad 2025-02-11).
- [14] Siemens, *Siemens Xcelerator Academy*, 2025. URL: <https://training.plm.automation.siemens.com/index.cfm> (hämtad 2025-02-11).
- [15] C. Nordling och J. Österman, *Physics Handbook, for Science and Engineering*, 9. utg. Studentlitteratur, 2020, ISBN: 9789144128061.

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2025

www.chalmers.se



CHALMERS