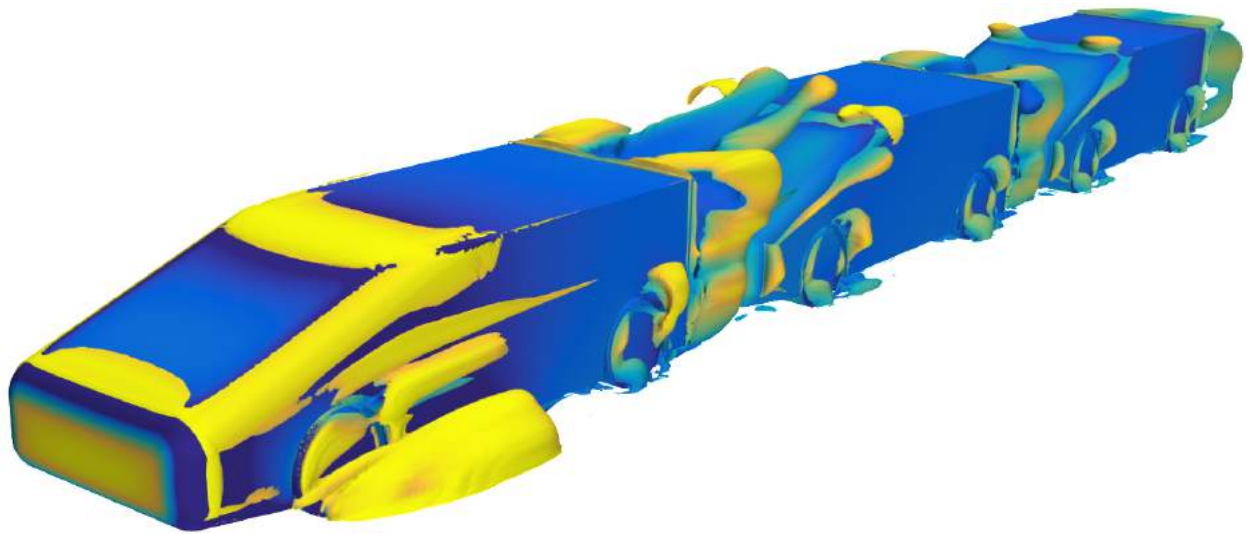




CHALMERS



Aerodynamiska effekter vid platooning: En simuleringsstudie på Windsormodellen i olika formationer

Kandidatarbete inom Maskinteknik

ALBIN BJÖRKMAN

PAULA EK

ANTON JANSSON

CARL LARSSON

CARL STORCKENFELDT NOAH WIRSÉN

KANDIDATARBETE: MMSX20-19-13

**Aerodynamiska effekter vid platooning:
En simuleringsstudie på Windsormodellen i olika formationer**

Albin Björkman

Paula Ek

Anton Jansson

Carl Larsson

Carl Storckenfeldt

Noah Wirsén



CHALMERS

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Avdelningen för fordonsteknik och autonoma system
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2019

Aerodynamiska effekter vid platooning: En simuleringsstudie på Windsormodellen i olika formationer

Albin Björkman
Paula Ek
Anton Jansson
Carl Larsson
Carl Storckenfeldt
Noah Wirsén

© Albin Björkman, Paula Ek, Anton Jansson, Carl Larsson, Carl Storckenfeldt, Noah Wirsén, 2019.

Handledare: Johannes Törnell, Doktorand, Fordonsteknik och autonoma system, Chalmers Tekniska Högskola

Examinator: Simone Sebben, Docent, avdelningschef Fordonsteknik och autonoma system, Chalmers Tekniska Högskola

Kandidatarbete MMSX20-19-13
Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Avdelningen för fordonsteknik och autonoma system
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Omslag:
Exempelbild av visualiserad strömning över tre Windsormodeller i kolonn.

Tryckeri /Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Göteborg, Sverige 2019

Abstract

The concept of driving vehicles in tight formations is called platooning. Driving with short distance in between the cars is problematic due to the security risk, therefore the development of platooning and autonomous vehicles is working hand in hand. As a result of platooning, potential benefits is reduced air resistance, which decreases the fuel consumption. Furthermore there is potential cost efficiency made by carriers.

Previous studies are conducted in wind tunnels with scaled models to analyse the flow phenomena. Performing wind tunnel tests can be both expensive and time consuming, which is why using Computational Fluid Dynamics (CFD) can be of interest. In this study the aerodynamic effects for three vehicle will be analysed using Star-CCM+. The main computational models that will be used are Reynolds Averaged Navier Stokes and $k-\epsilon$ turbulence. The tests are done using a Windsor model with wheels. Two test series will be performed. First with changing distances between the vehicles and second with an applied crosswind. In the second case, three different distances between the vehicle will be tested. The collected data will be used to identify trends, if possible.

The purpose of the study is to identify favourable trends in both test series. In the first series, where no crosswind is applied, the overall trend shows that the two trailing cars have most favourable positions. In the second, with applied crosswind, the biggest changes are seen for car number two and three. These experience the highest increase in drag, hence are the least favourable positions. As a result platooning can have very positive effects on the drag, but are very sensitive for non optimal conditions.

Sammanfattning

Platooning är ett koncept där fordon kör i grupp med korta avstånd sinsemellan. Idag är det en säkerhetsrisk att ligga nära framförvarande fordon, därför sker utvecklingen parallellt med självkörande fordon. Potentiella fördelar med platooning är bland annat att det kan leda till reducerat luftmotstånd vilket bidrar till minskad bränsleförbrukning. Detta är också fördelaktigt för exempelvis transportsektorn ur ett kostnads- och miljöperspektiv.

Tidigare studier är genomförda i vindtunnel med skalmodeller för att analysera flödesfenomen vid platooning. Testerna i vindtunnel kan vara dyra och tidskrävande vilket gör att det är av intresse att analysera platooning med Computational Fluid Dynamics (CFD) - analys. I denna studie kommer de aerodynamiska effekterna vid platooning av en kolonn med tre fordon analyseras med Star-CCM+. De huvudsakliga modellerna som används är Reynolds Averaged Navier Stokes och $K-\epsilon$ turbulens. Fordonsmodellen som används i simuleringarna är en Windsormodell med hjul. Simuleringsstudien är indelad i två testserier, den första serien med varierande avstånd och den andra med varierande sidvind för tre olika intervall. Rådata från simuleringarna bearbetas och analyseras för att upptäcka trender.

I studien åskådliggörs gynnsamma trender för båda dessa testserier. I simuleringarna utan sidvind är den övergripande trenden att de två bakomvarande bilarna besitter de mest gynnsamma placeringarna. När en sidvind appliceras observeras en motsatt trend. Där har istället den ledande bilen den mest förmånliga placeringen. Då sidvind appliceras ökar luftmotståndet alltid för varje placering bakåt i kolonnen. Platooning är därmed ett känsligt koncept som har potential att ge stora förbättringar på aerodynamiken om alla omkringliggande faktorer är optimala.

Ett stort tack till vår handledare Johannes Törnell
som under projektets gång väglett oss.

Ytterligare tack riktas till Emil Ljungskog och Magnus Urquhart
som stöttat oss då Johannes haft förhinder.

Nomenklatur

(u, v, w)	Hastighet i x,y,z-riktning
\bar{q}	Genomsnittligt värde för enhet över ett tidsintervall
β	Intensiv storhet
Δ	Förändring
$\frac{D}{Dt}$	Materiederivata
\mathbf{F}	Kraftvektor
\mathbf{n}	Normalvektor
\mathbf{Q}	Vektor med källtermer i fluid
\mathbf{V}	Hastighetsvektor
\mathbf{V}_r	Vektor för referenshastighet
\mathbf{W}	Vektor med flödesvariabler i fluid
μ	Dynamisk viskositet
∇	Gradientoperator
ρ	Densitet
τ_w	Skjuvspänning
τ'_{ij}	Reynolds-spänning
A_p	Projicerad area
a_s	Ljudets hastighet
B	Extensiv storhet
C	Godtycklig konstant
C_D	Luftmotståndskoefficient
$C_D^{\%}$	Procentuell förändring av C_D jämfört med referens
C_f	Ytfriktion
C_{Dref}	Referensvärdet på luftmotståndskoefficienten, vad som uppmäts på en ensam bil
F_c	Konvektivt flöde

F_v	Visköst flöde
g	Gravitationskonstant
$K-\epsilon$ metod	Metod för turbuensmodellering
kv	Kontrollvolym
ky	Kontrolllyta
L	Karaktäristisk längd
m	Massa
Ma	Fluidens machtal
p	Tryck
q	En godtycklig egenskap
Re	Reynolds tal
t	Tid
U	Fluidens friströmshastighet
V	Hastighet hos fluiden i rummet
z	Koordinat i vertikalled
ANSA	Automatic Net generation for Structural Analysis, Pre-processing mjukvara
CAD	Computer Aided Design
CATIA	CAD-mjukvara för modell
CFD	Computational Fluid Dynamics
DNS	Direct Numerical Simulation
Mesh	Ett nät av volymselement
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
Star-CCM+	Mjukvara för modellering av fluider
Windsormodell	En förenklad bilmodell som kan användas för vindtunnel och CFD-studier

Innehåll

Nomenklatur	ix
1 Introduktion	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Problembeskrivning	2
1.4 Avgränsningar	2
2 Teori	3
2.1 Fluidodynamik	3
2.1.1 Reynolds transportteorem	3
2.1.2 Flödeskaraktäristik	4
2.1.3 Inkompressibelt och kompressibelt flöde	4
2.1.4 Bernoullis ekvation	4
2.1.5 Navier Stokes-ekvationerna	5
2.1.6 Drag- och lyftkraft	6
2.1.7 Separation och vak	6
2.2 Numerisk beräkning av fluidodynamik	7
2.2.1 Den fysiska modellen	8
2.2.2 Den numeriska metoden	8
2.2.3 Nätets generering	9
3 Metod	11
3.1 Modellens geometri	12
3.2 CFD-simulering	12
3.3 Efterbearbetning av rådata	15

4 Resultat och Diskussion	17
4.1 Referensbil	17
4.2 Avstånd	19
4.2.1 Kolonn med 0,2 meter avstånd	20
4.2.2 Kolonn med 1 meter avstånd	25
4.2.3 Kolonn med 1,33 meter avstånd	28
4.2.4 Kolonn med 1,67 meter avstånd	31
4.2.5 Kolonner med 2,33, 3 och 5 meter avstånd	34
4.2.6 Sammanfattning av kolonnkörning	37
4.3 Sidvinds påverkan på kolonnkörning	38
4.3.1 Analys av CD-värden	39
4.3.2 Tryckfördelning i kolonnen	40
4.3.3 Flödeskaraktäristik	45
4.3.4 Sammanfattning av kolonnkörning med sidvind	48
5 Slutsats	51
6 Felkällor	53
7 Framtida arbeten	55
Litteraturförteckning	57
A Kompletterande bilder för avståndssimuleringarna	I
B Kompletterande bilder för sidvindssimuleringarna	V

1

Introduktion

Med stigande oljepriser och ett växande klimathot drivs utvecklingen inom fordonsbranschen mot att minska bränsleförbrukningen. Vägtransport står för mer än 70% av växthusgasutsläppen inom transportsektorn i Europa [7]. Dagens förbränningsmotorer är utifrån dess maximala fysikaliska verkningsgrad relativt effektiva och ytterligare effektiviseringar ger marginella effekter [9]. Större bränslebesparingar kan därför göras genom att minska friktionsförluster mot marken eller formmotstånd. Vid högre hastigheter utgör det aerodynamiska formmotståndet de största förlusterna och uppgår till ungefär 70% vid en hastighet på 110 km/h [1]. För de aerodynamiska formmotståndet utgör tryckskillnaderna 90%, medan de kvarstående 10% utgörs av friktionsförluster mot karossen.

För att minska formmotståndet har idéer om att köra grupper av fordon med korta avstånd sinsemellan, även kallat platooning, intresserat forskare sedan 70-talet [15]. Genom att hålla korta avstånd, exempelvis en billängd, minskar tryckskillnaderna mellan bilens front och bakände (vidare benämnt bas). Att köra i en grupp ger även synergieffekter för det ledande fordonet. Om det bakomvarande fordonet exempelvis är placerat med en billängd till bilen framför, resulterar detta i minskad tryckskillnad över det ledande fordonet. Detta resulterar i minskade förluster [1]. Platooning kan alltså vara ett verktyg för att bekämpa klimatpåverkan enligt mål 13 i de globala målen, fastställda av FN [23]. Att köra nära bilen framför medför dock en stor säkerhetsrisk. Utvecklingen av platooning sker därför parallellt med utvecklingen av självkörande fordon [18]. Skulle platooning tillämpas på autonoma lastbilar hade det gett ekonomiska besparingar, inte bara genom bränslebesparing utan även genom slopad kostnad för chaufförer [21]. Vidare samarbetar flera stora aktörer inom fordonsindustrin med att ta fram teknik som ska göra det möjligt att använda platooning utan förändringar i den nuvarande infrastrukturen [6].

Vindtunnlar används ofta för att analysera flödesproblem. Att genomföra tester med fullskaliga modeller i vindtunnlar är dyrt och tidskrävande. Vid analys av fler än ett fordon i en vindtunnel saknas idag kapaciteten för att på ett korrekt sätt beskriva de aerodynamiska effekterna. Det har gjorts tester med en skalad modell som kallas Windsormodellen i vindtunnlar vid Coventry University för att undersöka effekterna av platooning [15]. En annan metod för att studera aerodynamiken är med Computational Fluid Dynamics (CFD)-simuleringar, vilket är en numerisk beräkningsmetod för att analysera strömningsproblem.

1.1 Bakgrund

I tidigare studier har fokus legat på att undersöka olika parametrar som påverkar luftmotståndet över bilarna, bland annat olika vindriktningar och omformning av modellen. Det varierar även

om modellen har hjul eller inte. De flesta studier har haft ett konstant internt avstånd mellan bilarna. En studie gjord vid Coventry University [15], undersöktes 27 fall av tre bilar i en kolonn, med varierande takformen på de olika bilarna. Dessa uppställningar gjordes med ett konstant avstånd mellan bilarna på en fjärdedels billängd och en flödes hastighet på 40 m/s. Som nämnt tidigare använder flera av dessa studier den så kallade Windsormodellen. I Coventrys fall används en Windsormodell utan hjul.

Windsormodellen är en förenklad modell av en personbil som är designad för att efterlikna de aerodynamiska egenskaperna hos en bil [20]. Alla framåtriktade kanter har stora radier för att förhindra separation i flödet på fronten och övriga kanter är skarpa [24]. Originalmodellen har ett vinkelrätt bakparti och inga hjul. Det finns flera varianter på Windsormodellen, med eller utan hjul, där lutningen på bakpartiet kan varieras. Det finns även andra förenklade modeller som används för att undersöka flödesfenomen däribland Ahmedmodellen, MSM-modellen och NRSCC/SAE-modellen [10].

1.2 Syfte

Syftet med studien är att med hjälp av CFD undersöka hur olika avstånd mellan bilarna och hur sidvindar påverkar aerodynamiken vid platooning.

1.3 Problembeskrivning

Med CFD ska platooning med Windsormodellen simuleras. Det ska köras två serier av simuleringar, en med varierande avstånd mellan bilarna och en med varierande sidvind för tre olika avstånd. Resultatet ska sedan analyseras för att hitta trender och undersöka vilka formationer som är mest gynnsamma och varför. Då simuleringsuppställningarna överensstämmer kommer resultat jämföras med en tidigare studie gjord vid Coventry University [15].

1.4 Avgränsningar

Studien avgränsas till att enbart behandla aerodynamiska effekter vid platooning. Detta innebär att aspekter som säkerhet och kontrollsystem exkluderas från studien. Vidare kommer den så kallade Windsormodellen, en förenklad skalmmodell av en vanlig personbil, att användas. Modellen kommer endast att ha ett utförande, med vinkelrätt bakparti och hjul som roterar i simuleringarna.

Beräkningsresurserna för studien är begränsade. En förenklad modell kommer att användas där vägen antas rak och att bilarna kör i en rak linje med konstant hastighet. Alla beräkningar görs med antagandet att systemet är i steady state, det vill säga att systemet är oberoende av tiden. Sidvinden antas hela tiden ha en konstant attackvinkel mot karossen.

2

Teori

Kapitlet är indelat i två huvudavsnitt. I det första avsnittet presenteras grundläggande teori för flödesfenomen i form av ekvationer med tillhörande beskrivning. Det andra avsnittet fokuserar på beräkningsteori.

2.1 Fluidodynamik

Fluidodynamik är läran om fluiders rörelse och hur fluiden interagerar med andra fluider eller solider. I kapitlet presenteras grundläggande teori som krävs för analys av de flödesfenomen som uppkommer vid platooning.

2.1.1 Reynolds transportteorem

För att analysera ett volymsbestämt system används Reynolds transportteorem. Kontrollvolymen är en godtycklig region som avgränsas av kontrolllytor. Reynolds transportteorem definieras enligt

$$\frac{d}{dt}(B_{syst}) = \frac{d}{dt}(\int_{kv} \beta \rho dV) + \int_{ky} \beta \rho (\mathbf{V}_r \cdot \mathbf{n}) dA \quad (2.1)$$

där kv står för kontrollvolym, ky för kontrolllyta, ρ för fluidens densitet, \mathbf{V}_r är den relativa hastigheten och \mathbf{n} är normalvektorn ut från kontrolllytan. B_{syst} är den extensiva storheten, vilket innebär att storleken är additiv för delar av systemet. De extensiva storheterna för Reynolds transportteorem är massa, energi och rörlsemängd. β kännetecknas av att storheten är oberoende av systemets storlek och bestäms ur

$$\beta = \frac{dB}{dm}. \quad (2.2)$$

Ekvation 2.1 beskriver en egenskap i systemets förändring per tidsenhet som summan av ändringar per tidsenhet i kontrollvolymen och förändringarna per tidsenhet av in- och utflöden genom kontrolllytan. Ur Reynolds transportteorem erhålls kontinuitetsekvationen och ekvationen för rörelsemängd. Låt $B = m$ och $\beta = dm/dm = 1$ vilket ger kontinuitetsekvationen för en kontrollvolym

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{syst} = 0 = \frac{d}{dt}(\int_{kv} \rho dV) + \int_{ky} \rho (\mathbf{V}_r \cdot \mathbf{n}) dA. \quad (2.3)$$

Impulssatsen för en deformierbar kontrollvolym erhålls då $B = m\mathbf{V}$ och $\beta = d\mathbf{V}/dm = \mathbf{B}$

$$\frac{d}{dt}(m\mathbf{V})_{syst} = \sum \mathbf{F} = \frac{d}{dt}(\int_{kv} \mathbf{V} \rho dV) + \int_{ky} \mathbf{V} \rho (\mathbf{V}_r \cdot \mathbf{n}) dA \quad (2.4)$$

där \mathbf{F} är en kraftvektor och \mathbf{V} är hastighetsvektorn.

2.1.2 Flödeskaraktäristik

Ett flöde kan karaktäriseras med hjälp av Reynoldstalet som definieras enligt

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (2.5)$$

där ρ är fluidens densitet, U dess hastighet relativt objektet det flöder kring, L en karakteristisk längdskala samt μ den dynamiska viskositeten. Övergången mellan laminärt till turbulent flöde varierar beroende på geometri och omslagspunkten sker vid Re_{krit} . Kring en plan yta gäller att det kritiska Reynoldstalet är runt 10^6 [25].

Laminärt flöde sker vid små Reynoldstal, där all rörelse sker i skikt i strömningsriktningen. Flödet är stabilt och välordnat, olikt turbulent flöde. Turbulens har ingen tydlig definition utan karakteriseras av ett antal egenskaper. Turbulent flöde är oregelbundet och tidsberoende, med ständiga förändringar i rum och tid. Vidare är flödet tredimensionellt med förhöjda diffusiva egenskaper som syftar till att utjämna skillnader som exempelvis temperatur och rörelsemängd. Turbulens uppkommer som en konsekvens av instabiliteter i medelflödet. Rörelseenergin i flödets absorberas av turbulenta virvlar och omvandlas till värme, vilket benämns som dissipation. Slutligen är turbulens en flödesegenskap, vilket betyder att alla fluider kan vara turbulenta [25].

2.1.3 Inkompressibelt och kompressibelt flöde

När en gas strömmar kring en kropp vid låga hastigheter kommer den komprimeras. Denna densitetsförändring kommer dock vara tillräckligt liten för att anses vara försumbar. Om hastigheten sedan ökar kommer en del av energin gå till att komprimera gasen vilket kommer resultera i en lägre kraft på det omströmmade objektet [12]. För att avgöra huruvida gasens densitet kan anses vara konstant beräknas Machtalet. Machtalet beskriver förhållandet mellan gasens hastighet och ljudets hastighet vid rådande förhållanden enligt

$$Ma = \frac{U}{a_s} \quad (2.6)$$

där U kännetecknas av fluidens friströmshastighet och a_s beskriver ljudets hastighet. Om $Ma \leq 0,3$ kommer gasen antas vara inkompressibel [25].

2.1.4 Bernoullis ekvation

Bernoullis ekvation är en energirelation mellan två punkter i en fluid. Punkterna måste vara placerade på samma strömlinje och dess fysikaliska skillnader beskrivs i form av kinetisk energi, reversibelt tryckarbete och potentiell energi. Bernoullis ekvation kan beskrivas enligt

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{1}{2} (V_2^2 - V_1^2) + g(z_2 - z_1) = C \quad (2.7)$$

där p_1 och p_2 beskriver de statiska trycken, V_1 och V_2 fluidens hastigheter samt z_1 och z_2 punkternas höjdskillnad. Ekvationens högerled, C , kännetecknas av eventuella energiförluster mellan de båda punkterna. Om energin kvarstår densamma kommer konstanten C vara noll. I verkligheten uppkommer alltid förluster eftersom alla fluider är viskösa och upplever friktion.

Vanligen tillämpas ekvationen som en förenkling från verkligheten där förlusterna kan bortses från. Övriga restriktioner och antaganden som görs är steady state och inkompressibelt flöde [25].

Steady state är en fysikalisk modell som beskriver ett system som oberoende av tiden, vilket innebär att en godtycklig egenskap q i systemet alltid uppfyller

$$\frac{dq}{dt} = 0, \quad \forall t. \quad (2.8)$$

Då steady state är en förenklad modell så är det rimligt att ifrågasätta dess validitet. Dock finns studier som visar att resultaten från stabila och instabila turbulenta flödesekvationer är väldigt snarlika vid simulering av aerodynamiken runt en bil, med enbart 2% skillnad i luftmotstånd [14]. Denna studie använder Ahmedmodellen, vilken inte är helt olik Windsormodellen, varför liknande felmarginaler rimligtvis kan antas. Med de ovanstående antaganden följer från ekvation 2.7 att hastigheten ökar då trycket sjunker. Det största trycket uppkommer i stagnationpunkten, alltså då hastigheten är noll [25].

2.1.5 Navier Stokes-ekvationerna

Navier Stokes flödesekvationer innehåller en fullständig lösning för en Newtonsk samt inkompressibel fluid [25]. En Newtonsk fluid innebär att skjuvkraften i fluiden som utövas på en yta är proportionell mot dess hastighetsgradienten enligt

$$\tau_w = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.9)$$

där τ_w är skjuvspänningen och μ den viskösa koefficienten för fluiden som beaktas [25]. Navier Stokes ekvation uttrycks som

$$\rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \rho \mathbf{g} \quad (2.10)$$

där D/Dt är materiellerivatnan och består av en lokal samt konvektiv acceleration [25].

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \quad (2.11)$$

där den första termen beskriver förändringen i tiden (lokal acceleration) och de tre sista termerna beskriver förändringen i rummet (konvektiv acceleration). I Navier Stokes ekvation (2.10) uttrycker första termen ∇P tryckgradienten, $\mu \nabla^2 \mathbf{V}$ står för de viskösa effekterna och $\rho \mathbf{g}$ för effekter från gravitationen.

Turbulensens kaotiska karaktär kan beskrivas med RANS- (Reynolds Averaged NavierStokes) ekvationen. Tryck och hastighetskomponenterna beskrivs som summan av medelvärdet och en fluktuation. Genom att använda de nya uttrycken för hastigheten och trycket i ekvation (2.10) samt tidsmedelvärdera ekvationen fås slutligen

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{\mathbf{V}}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{\mathbf{V}}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\mathbf{V}}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{\mathbf{V}}}{\partial z} \right) = -\nabla \bar{P} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \overline{(\mathbf{V}u)}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{(\mathbf{V}v)}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{(\mathbf{V}w)}}{\partial z} \right) \quad (2.12)$$

där \mathbf{V} är hastighetsvektorn [25].

2.1.6 Drag- och lyftkraft

Tryck är ett mått på molekylernas rörelseenergi inom en fluid. När fluiden är i kontakt med en kropp och den kinetiska energin inte är konstant uppstår en dragkraft. För att en dragkraft ska uppstå måste kroppen vara i kontakt med fluiden och de båda måste ha olika hastigheter [13]. Dragkraft benämns som summan av ytfriktionen och formmotståndet för en kropp som rör sig genom en fluid med ett Mach-tal under 1 [5]. Ytfriktion bygger på interaktionen mellan solid och fluid och varierar tillsammans med ytans beläggning samt fluidens viskositet. Denna beräknas enligt ekvation (2.13)

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (2.13)$$

där τ_w är skjuvspänningen på ytan, ρ är densitet och V är hastigheten. Formmotstånd uppkommer då fluiden rör sig över kroppen och en förändring sker i hastighet och tryck. I ett idealt flöde utan separation, turbulens och gränsskikt skulle det dynamiska trycket som byggts upp motverkas av trycket bakom objektet. På grund av att friktion och separation förekommer i flödet återställs inte trycket till fullo vilket ger upphov till tryckskillnad [4]. Genom att summera alla lokala tryck och multiplicera med ytan de verkar på kan magnituden på formmotståndet bestämmas enligt ekvation (2.14)

$$F_{form} = \Delta P A_p \quad (2.14)$$

där ΔP är skillnaden i tryck mellan ytorna och A_p är ytan trycket verkar på [16]. Beroende på hur den totala kraften är riktad kommer den benämnas på olika sätt. Om kraftvektorn är riktad mot kroppens rörelse benämns denna som dragkraft. Om den istället är vertikalt vinkelrätt mot rörelsen benämns den som lyftkraft. Båda dessa krafter verkar i kroppens tryckcentrum [13]. Dragkraften kan slutligen beräknas med ekvation (2.15)

$$F_{Drag} = \frac{1}{2}\rho v^2 C_D A_p \quad (2.15)$$

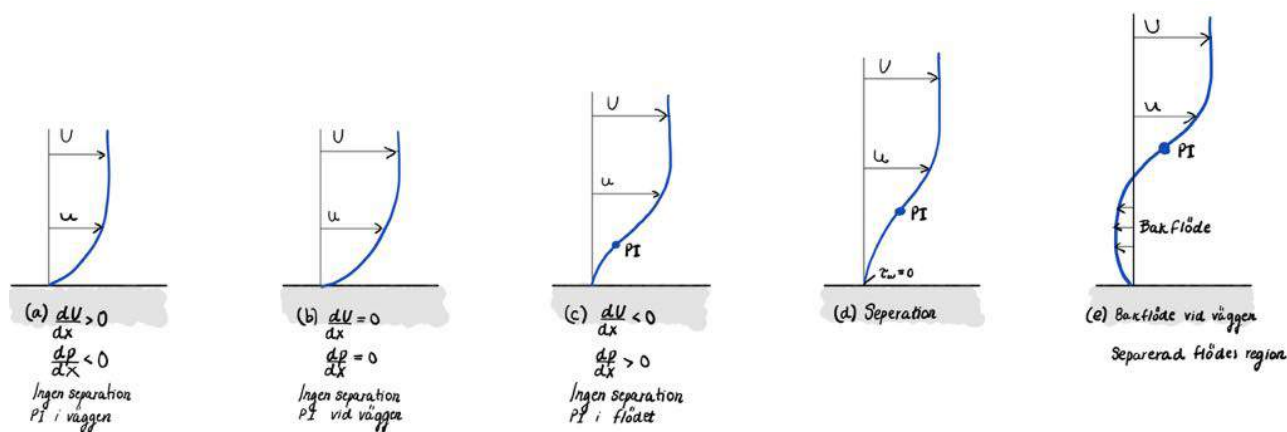
där C_D är luftmotståndskoefficient, ett dimensionlöst tal [25]. C_D ger en indikation på hur strömlinjeformat ett objekt är. Stora värden på luftmotståndskoefficienten resulterar i stora dragvärden. Talet är en funktion av Reynoldstalet och objektets utformning [3].

2.1.7 Separation och vak

Separation innebär att en fluid som strömmar parallellt över en yta abrupt slutar följa samma linje och böjer ut från ytan. Detta kan ske både på en kropps yta och där en överströmmad kropp slutar. Separation orsakas av förlust i rörelsemängd på grund av flödets viskositet och tillståndet no-slip när hastighetsprofilen flödar längs en kropp. No-slip innebär att fluidens hastighet vid väggen är lika stor som hastigheten för väggen [17, 25].

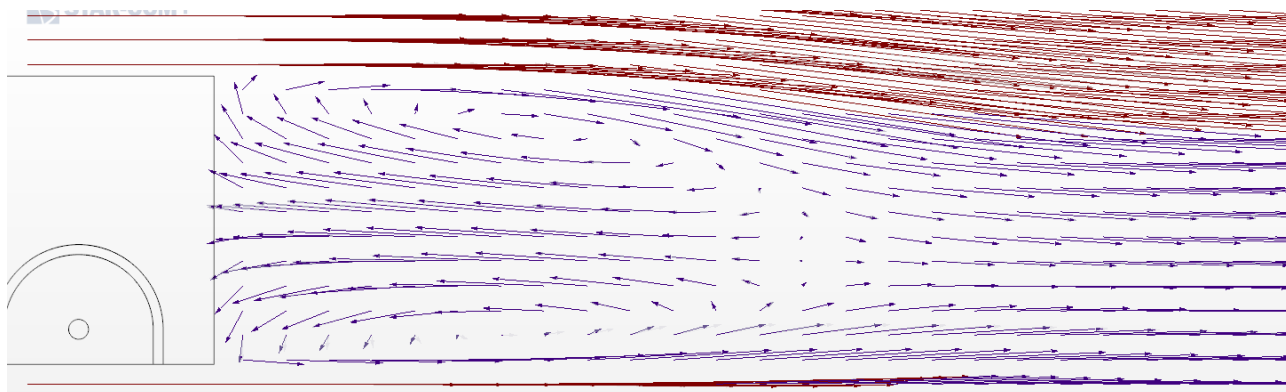
Figur 2.1 visar hur hastighetsprofilen förändras längs en kropp. Figur 2.1a illustrerar ett generellt fall som ofta uppkommer längst fram på kroppen. I detta fall finns ingen inflexionspunkt och separation kan inte inträffa på grund av en negativ tryckgradient. Punkten där kurvan byter riktningen på krökningen kallas inflexionspunkt. När tryckgradienten blir noll (figur 2.1b) är inflexionspunkten precis vid väggen. Därefter (figur 2.1c-e) förflyttar sig inflexionspunkten längre från väggen samtidigt som tryckgradienten ökar, tills en tillräckligt stark tryckgradient orsakar ett bakflöde i hastighetsprofilen. Detta bakflöde separerar flödet från ytan [25].

Linjen, vid vilken separationen är förankrad, kan sammanfalla med en skarp kant på kroppen. Ej strömlinjeformade kroppar har typiskt geometrier som skapar en naturlig plats för separation att uppstå.



Figur 2.1: Hastighetsprofiler vid olika tillfällen längst en kropps yta, som påverkas av olika tryckgradienter.

Området som bildas nedströms kroppen på grund av att flödet separeras kallas vak. Vaken är en turbulent region av lägre tryck och skapar därmed en negativ tryckskillnad över kroppen i flödesriktningen. Tryckskillnaden resulterar i en kraft på kroppen motriktad dess rörelse genom fluiden. Storleken på denna kraft är beroende av vakens storlek mot objektet som bestäms av var separationspunkten uppstår. En tidigare separationspunkt innebär större vak. På en ej strömlinjeformad kropp bildas instabila vaker som innehåller virvlar. När dessa virvlar tidsmedelvärderas kan en tydlig vak åskådliggöras, se figur 2.2.



Figur 2.2: Visualisering av tidsmedelvärderade flödeslinjer i vaken av en överströmmad kropp. Bilden är genererad i Star-CCM+.

Vid kolonnkörning kan den följande bilen ta tillvara på det lägre trycket i vaken från den framförvarande bilen, vilket är fördelaktigt för båda bilar. Det som sker är att det bakomvarande fordonet minskar det framförvarande fordonets vak [8]. Minskad vak resulterar i att den totala tryckskillnaden minskar för den framförvarande bilen och därav ger en lägre dragkraft, samtidigt som den bakomvarande bilens stagnationstryck i fronten minskar.

2.2 Numerisk beräkning av fluidodynamik

CFD är ett sätt att beräkna och undersöka i huvudsak hur fluider rör sig i givna geometrier. Metoden går ut på att likna en virtuell vindtunnel och har många fördelar gentemot vanliga vindtunnlar. Fördelar som återfinns inkluderar kostnadsfördelar, mindre omställningstid, mer omfattande analysmöjligheter samt möjlighet till enklare itererande design. Det finns också

nackdelar där de största består i begränsningar av tillgänglig datorkapacitet för fullt upplösta turbulenta flöden, noggrannhet runt mindre detaljer och svårigheter vid feluppskattningar. Det sistnämnda då metoden inte kan ge fullt kvantifierbara fel vid undermålig modellering. För att använda CFD krävs några huvudsakliga delar som presenteras i detta avsnitt [19].

CFD använder sig, tillsammans med flödesekvationerna, dessutom av ytterligare modeller, som exempelvis används för att förenkla beskrivningen av turbulens. Dessa metoder används där det, oftast vid stora geometrier, annars hade blivit för omfattande beräkningar. Att beräkna högupplösta turbulensregioner kräver förhållandevis mycket datorkapacitet jämfört med att använda förenklingar.

2.2.1 Den fysiska modellen

Den fysiska beskrivningen är den mest grundläggande delen av CFD och representerar fluidens fysikaliska egenskaper. Modellen beskriver alltså hur fluiden kommer bete sig. Denna är förenklad på enstaka punkter och begränsar därmed dess validitet.

Ett antagande görs om att det endast är det medelvärderade flödet som studeras. Detta görs på grund av att mängden kollisioner mellan fluidens alla partiklar sker i sådan omfattning att den enskilda partikelns påverkan är försumbar. Standardmodeller för CFD grundas på detta antagande, som kallas för kontinuitetsantagandet.

För att beskriva flödets beteende används Eulers betraktelsesätt. Detta innebär att det inte är hur enskilda partiklar påverkas av direkta krafter på dem, utan hur partiklarna förflyttar sig i rummet. För att göra detta väljs en kontrollvolym som betraktas. I denna kan observeras hur strömlinjer formas. Användandet av detta betraktelsesätt underlättar uttrycken för exempelvis masskonservering [25].

Med antagande om kontinuitet och en betraktad kontrollvolym kan antagande om storhetskonserving beskrivas. För varje del av flödet kan en volym betraktas där storheter undersöks. Vid steady state är exempelvis massan per tidsenhet lika stor in, som ut. Storheter som inte nödvändigtvis är oföränderliga, exempelvis rörelseenergi, balanseras på så vis att skillnaden mellan vad som kommer in och går ut, ur kontrollvolymen, antingen måste skapas eller förstöras därinne [2].

2.2.2 Den numeriska metoden

Först beskrivs den fysiska modellen som matematiska ekvationer. Dessa diskretiseras sedan för att kunna lösas numeriskt. Denna diskretisering möjliggör alltså uträkning av de kontinuerliga ekvationerna i diskreta punkter, ett krav för att beräkna de omfattande problemen numeriskt. Den vanligaste metoden för detta är finita volymmetoden, som bygger på att fluiden delas in i en mängd diskreta volymselement, varpå integralformen av Navier-stokes ekvationerna (2.16) löses numeriskt på varje volymelement.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \mathbf{W} dV + \oint_S (F_c - F_v) dS = \int_V \mathbf{Q} dV \quad (2.16)$$

där \mathbf{W} är de olika flödesvariablerna, densitet, hastighet och energi. F_c och F_v är de konvektiva respektive viskösa flödena och \mathbf{Q} är källtermer.

Vid flöde där turbulens uppkommer krävs också en numerisk turbulensmodell då möjligheten att lösa turbulensen direkt ur flödesekvationerna (en metod kallad Direct Numerical Simulation, DNS) är mycket restriktiv. Vanligt förekommande är RANS, vilket tillför en term till den viskösa spänningen (ekv 2.9) kallad Reynolds-spänning, som visas nedan.

$$\tau'_{ij} = \rho \overline{u'_i u'_j} \quad (2.17)$$

Denna term beskriver transporten av medelhastighet på grund av turbulenta fluktuationer genom fluiden. Utifrån RANS finns ett flertal metoder för att bestämma Reynolds-spänningen. Vanligt förekommande är k - ϵ metoden som tillför två ekvationer, en för turbulent rörelseenergi och en för förändring av dissipation av rörelseenergi, som löses för att bestämma Reynolds-spänningen [2].

2.2.3 Nätets generering

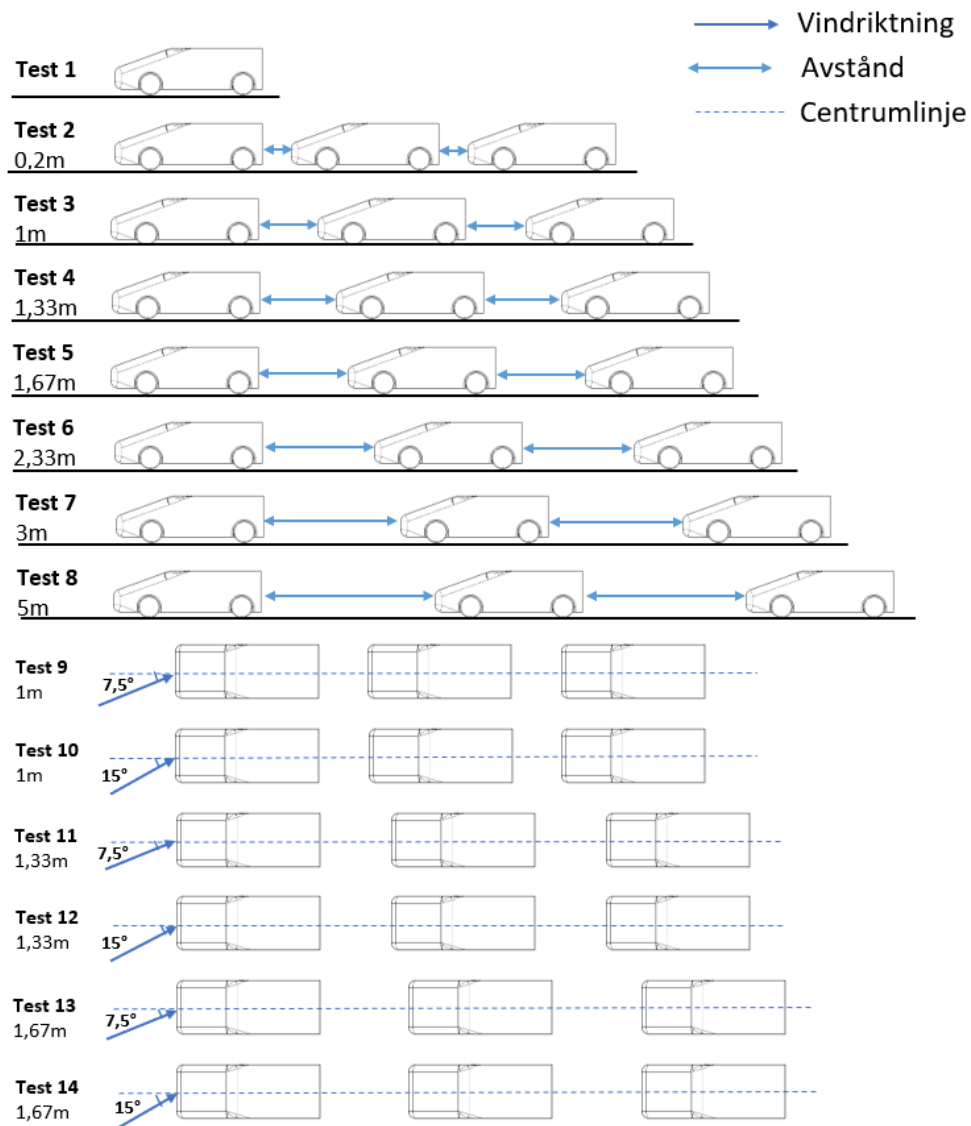
Nätet som definierar hur modellen är uppdelad i mindre element kallas mesh. Den beskriver var de diskreta punkterna är lokaliserade och hur de hänger ihop med varandra. I en finit volymmetod är meshen genererad som ett nät av volymselement på ett sätt så att det täcker hela fluiddomänen och inga element överlappar varandra.

Nätet och dess egenskaper har stor betydelse till lösningens noggrannhet och resurskostnad i form av datorkapacitet. Förändringar i nätet kommer alltså påverka den numeriska metodens konvergens och dess noggrannhet. Det krävs förståelse för nätets parametrar när det genereras för att metoden ska fungera tillfredsställande och resultera i användbara lösningar. Nätet behöver granskas och anpassas för varje ny uppställning av modeller.

3

Metod

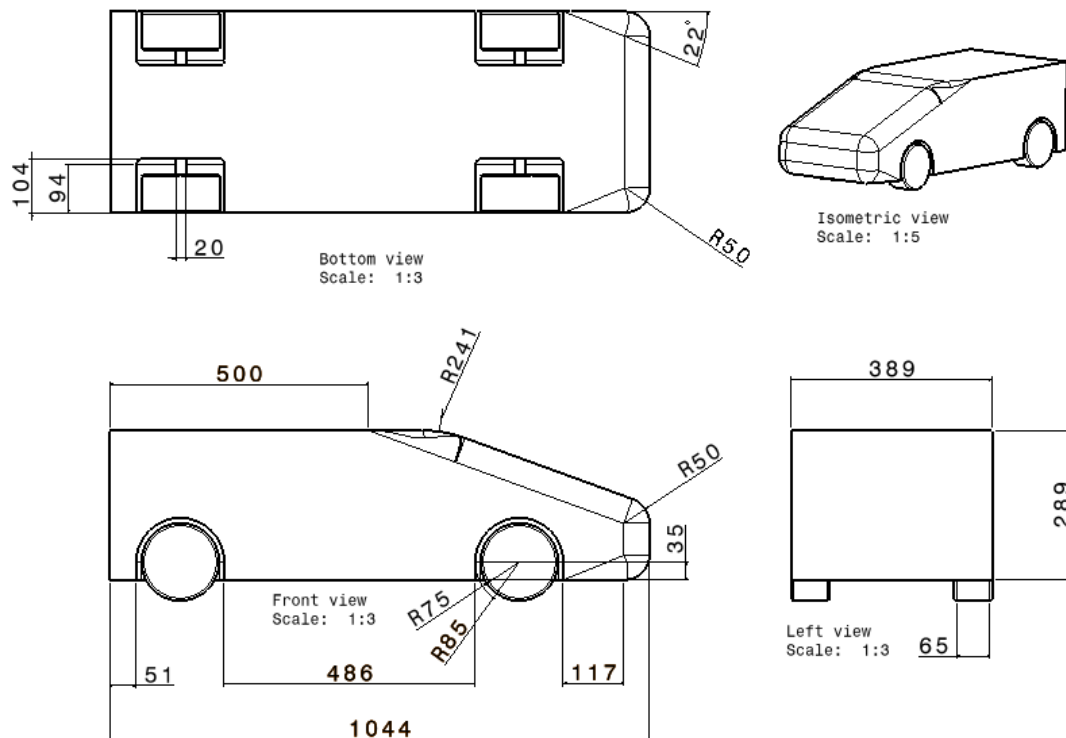
I kapitlet beskrivs arbetsgången som tillämpas i studien. Här förklaras hur modellen är framtagen och byggd, samt hur den har använts för simulering. Sedan beskrivs vilken data som tas fram och hur den behandlas. De olika uppställningarna för simuleringarna visas radvis i figur 3.1 där avstånd mellan bilarna och, från test 8, vindens vinkel är utskrivet till vänster på raden.



Figur 3.1: Schematisk bild över Star-CCM+ simuleringarna. Avståndet mellan bilarna och vindriktning varierar från test till test. Avstånd i bild är ej till skala.

3.1 Modellens geometri

En CAD-geometri skapades i programpaketet Catia V5. Underlag för denna var en framtagen ritning över Windsormodellen, se figur 3.2. För att sedan importera modellen i Star-CCM+ krävdes ett mellansteg där modellen öppnades i ANSA, ett CFD-förberedande program som vanligtvis används för att generera mesh från CAD-geometrier. Detta mellansteg användes dock endast som ett verktyg för att kunna importera filer från Catia V5 till Star-CCM+ och nämns inte vidare.



Figur 3.2: Ritning på Windsormodellen med hjul

3.2 CFD-simulering

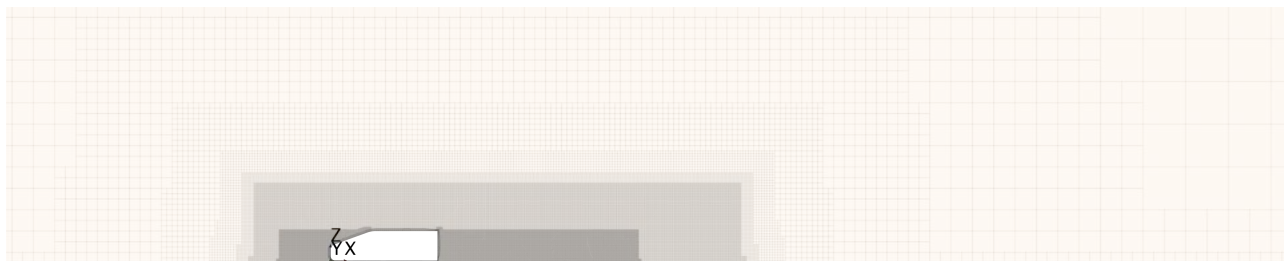
Star-CCM+ användes genomgående för de uppställda simuleringarna. Runt modellen ställdes en volym upp för vilken flödet analyseras i. Centrerad kring ytmodellen skapas ett block som sträcker sig 24 meter bakåt, 5 meter framåt, samt 5 meter åt vardera sida. Blocket höjs 3 mm från botten av däckets för att simulera en deformation av däckets närmast vägen. Bilmodellen subtraheras bort från blocket, vilket ger grunden till vindtunneln.

Vidare skapades två block som subdomäner till vindtunneln. Måtten för dessa är 0,75 meter framåt, 3 bakåt och 1 i sidled, respektive 0,5 framåt, 2 bakåt och 0,3 i sidled. I de två blocken minskades meshstorleken till 50% respektive 25% av basstorleken för meshen, för att få en tydligare bild på flödet i närheten av bilen, samt den efterföljande vaken. Vidare ändrades antalet prismalager på golvet av vindtunneln till 3, för att kunna se luftens separation från golvet i högre upplösning. Utifrån detta skapades en mesh i domänen. Inställningarna som användes i studien, som skiljer sig från standardinställningar, presenteras i tabell 3.1. En bild på meshen runt bilen illustreras i figur 3.3, där de olika blockens storlek och meshfinhet kan

ses.

Tabell 3.1: *Inställningar i Star-CCM+ för meshen i vindtunneln*

Inställning	Värde
Base size	0,013 m
Target surface size	6400%
Surface curvature	200
Surface growth rate	1,3
Number of prism layers	20
Prism layer near wall thickness	0,01 m
Prism layer total thickness	200%
Volume growth rate	very slow
Surface growth rate	very slow
Maximum cell size	16900%



Figur 3.3: *Visualisering av mesh runt karossen. Som kan ses i bilden blir meshen mer högupplöst nära bilen där flödet är som mest komplext.*

Därefter skapades en fysikmodell som modellerar fluiden, i det här fallet luften i vindtunneln. Inställningarna för detta presenteras i tabell 3.2. Vidare bestämdes luftens densitet till $1,184 \text{ kg/m}^3$.

Tabell 3.2: *Inställningar för fysikmodell*

Modell
Constant density
Coupled flow
Exact wall distance
Gas
Gradients
K-Epsilon turbulence
Realizable K-Epsilon turbulence
Reynolds-Averaged Navier Stokes
Steady
Three dimensionall
Turbulent
Two-layer all y+ wall treatment

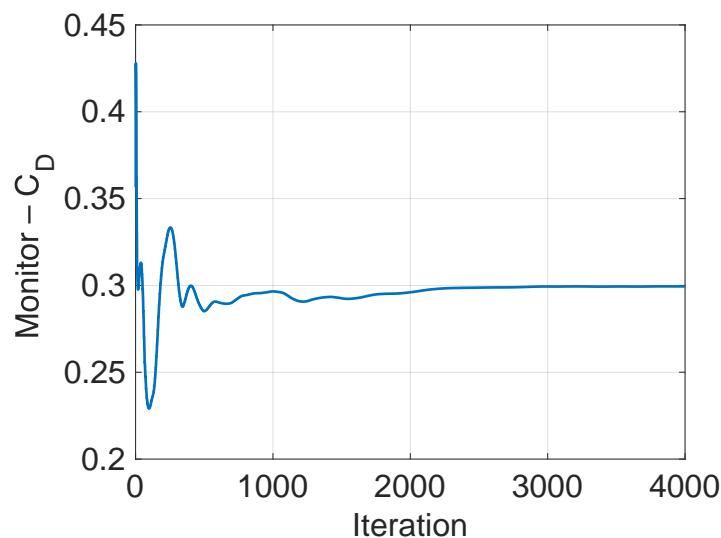
Vidare bestämdes för varje yta ett randvillkor, dessa sammanfattas i tabell 3.3. Inloppshastigheten samt golvets rörelse sätts till 30 m/s och en lokal rotation på 40 rad/s runt hjulaxeln. Detta gjordes för att simulera att bilen rör sig med 30 m/s framåt.

Tabell 3.3: Typ av randvillkor för samtliga ränder i vindtunneln

Rand	Villkor
Kaross	Wall
Hjul	Wall
Tak (vindtunnel)	Symmetry plane
Sidoväggar (vindtunnel)	Symmetry plane
Framsida (vindtunnel)	Velocity inlet
Baksida (vindtunnel)	Pressure outlet
Golv (vindtunnel)	Wall

Efter detta följde att specificeras lösarens inställningar och vilken data som ska extraheras. Lösaren använde standardinställningar, bortsett från att “Expert initialization, Grid Sequencing” används samt att antalet iterationer bestämdes till 4000. Data som är relevant att analysera är C_D .

En “Report” med koefficienten i vald riktning skapades för bilkarossen. Vidare skapades en “Monitor” och en plot för varje enskild “Report”, vilket gjorde att värdena gick att följa genom varje iteration av programmet och gav möjlighet att extrahera datan. Antal iterationer som programmet körde baseras på när dessa värden konvergerar. Bild på konvergerade luftmotståndskoefficienten visas i figur 3.4.



Figur 3.4: Luftmotståndets förändring i strömriktningen per iteration. Vid låga iterationer fluktuerar värdet markant för att stabiliseras efter 3500 iterationer. Det asymptotsiska utseendet tyder på att värdet konvergerat.

Proceduren för modelleringen återupprepades genom att flera kopior av bilmodellen adderas. Dessa translaterades bakåt, så att ett led skapas, och subtraherades från vindtunneln. Vidare förstörades de två meshförfiningsblocken så att de är 3 respektive 2 meter bakom den sista bilen. Därefter genererades meshen. Ytterligare randvillkor för nya modeller skapades enligt föregående bilmodell och nya “Reports”, plots och “Monitors” gjordes. De tester som simulerades förklaras i figur 3.1. I de tester där sidvind simuleras ändras randvillkoren på vänster (i färdriktningens perspektiv) vägg i vindtunneln till en “velocity inlet”. Denna tillsammans med den främre väggen sätts till en hastighet där komponenten i x-led är 30 m/s och komponenten i y-led räknas ut enligt

$$V_{\text{Sidvind}} = \tan(\theta)V_{\text{färdriktning}} \quad (3.1)$$

där θ är den valda vindriktningen, i detta fall $7,5^\circ$ och 15° . Vidare så roterades även de två

blocken som används för meshförfining θ grader samt gjordes bredare för att fånga detaljerna i den nya vindriktningen.

3.3 Efterbearbetning av rådata

I Star-CCM+ sattes "Monitors" upp på C_D i färdriktningen. Dessa sparar alla C_D -värden för varje iteration. Det gjordes även för respektive bil en histogramtabell för C_D med 75 delintervall fördelade över en bils längd. Efter att simuleringarna kördes exporterades datan från Star-CCM+ som csv-filer. Filerna importerades sedan till MATLAB för resultatframställning. Det togs även ut bilder från olika scener med skalära och vektorbaserade färgdiagram för olika storheter som tryck och lufthastighet.

För att beräkna ett slutgiltigt C_D -värde för respektive bil togs det först ett medelvärde av C_D -värdena från de sista 200 iterationerna. Värdena för vindhastigheten, luftens densitet och frontalarean var alla satta till 1 i monitor-funktionen i Star-CCM+, vilket är standardinställningar i programmet. Därmed gäller följande uttryck för C_D -värdena som gavs av simuleringarna.

$$C_{Dstar} = \frac{2 \sum F_{skjuv} + F_{tryck}}{V_{star}^2 \rho_{star} A_{star}} = 2F \quad (3.2)$$

I Star-CCM+ beräknades frontalarean på en Windsormodell till 0,118 m². Vindhastigheten var 30 m/s och luftens densitet antogs vara 1,184 kg/m³. Med konstanter och följande formel räknades det korrekta C_D -värdet.

$$C_D = \frac{2F}{V_{luft}^2 \rho_{luft} A_{front}} = \frac{C_{Dstar}}{V_{luft}^2 \rho_{luft} A_{front}} \quad (3.3)$$

Resultatet från simuleringen med en bil användes som en referens, C_{Dref} , för att se hur varje bil påverkades av de olika formationerna. Se tabell 4.1 för referensvärdena på C_D . Vidare beräknades förändringen av C_D för varje bil med följande formel:

$$C_D^{\%} = \frac{C_D - C_{Dref}}{C_{Dref}} \quad (3.4)$$

De beräknade $C_D^{\%}$ plottades sedan i stolp-diagram.

4

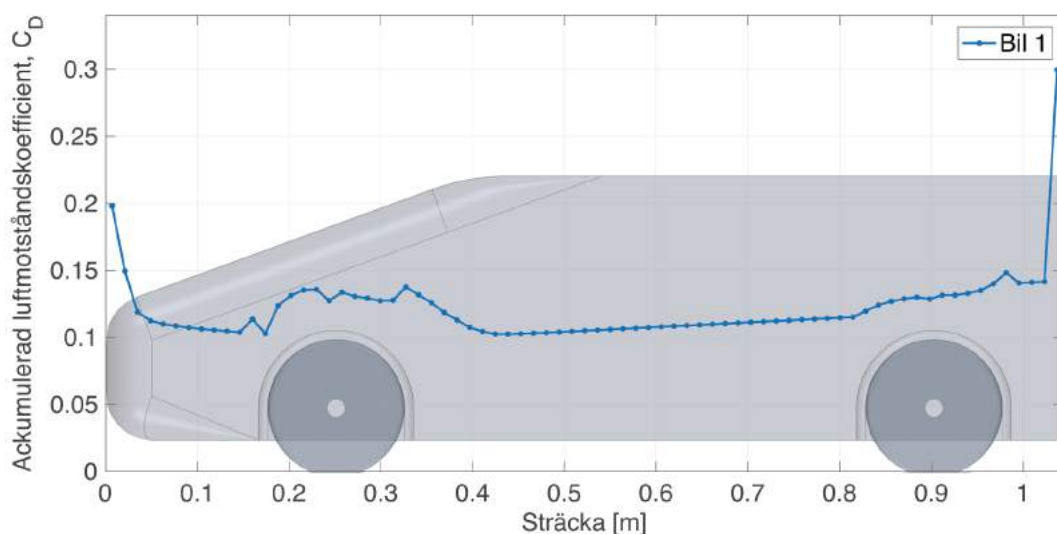
Resultat och Diskussion

Det mest gynnsamma C_D -medelvärdet uppmättes då avstånden mellan bilarna var 0,2 meter. För den mellersta bilen minskade C_D med 53,7% relativt referensbilen. Med ökande avstånd ökade C_D till att närma sig värdet för referensbilen. Vilken position som var mest fördelaktig i bilkolonnen varierar med avståndet mellan bilarna. Då kolonnerna upplever en sidvind försämrades C_D -värdet markant. Den övergripande trenden är att längre fram i kolonnen upplevs minst negativa effekter.

I kapitlet diskuteras först de flödesfenomen som uppkommer för en ensam bil, vilket används som referens. Sedan presenteras kolonner med olika interna avstånd, vilka jämförs med referensen. Därefter presenteras hur sidvind påverkar resultatet för några utvalda kolonner.

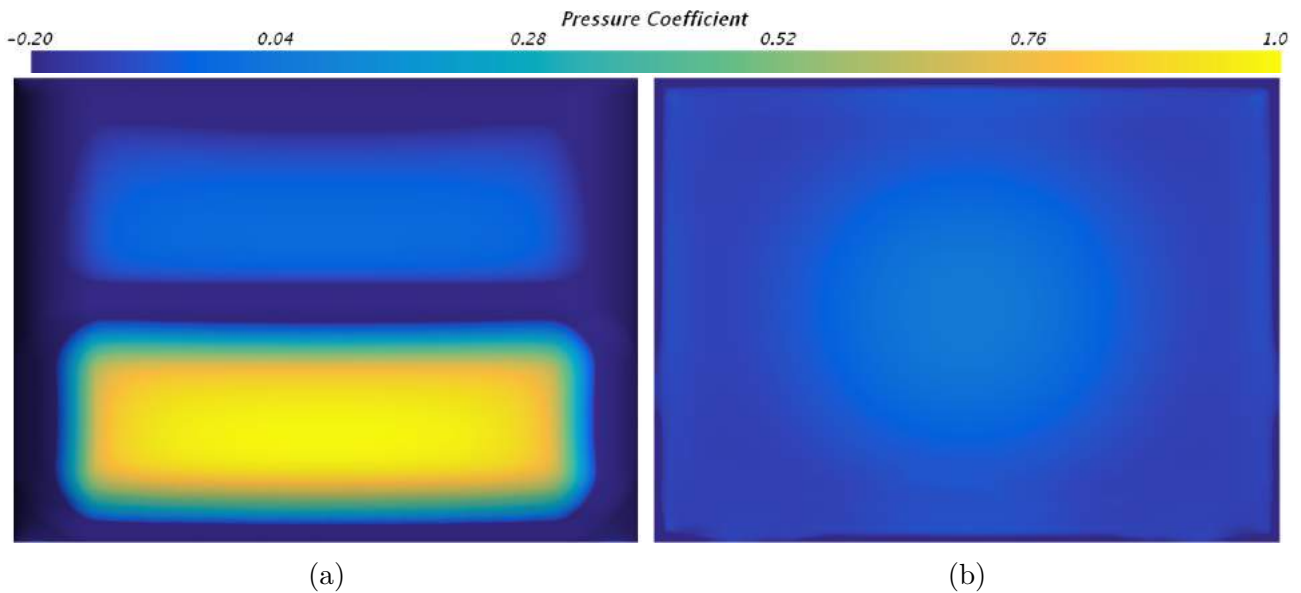
4.1 Referensbil

C_D värdet för referensbilen beräknas utifrån ekvation (3.3) till 0,299. I figur 4.1 visas det ackumulerade C_D -värdet över bilen som funktion av sträckan. Sträckan är indelad i 75 segment med samma längd över bilen. Varje datapunkt motsvarar det totala luftmotståndet över längden mellan punkten och fronten. Ett positivt värde på C_D innebär att kraften är motriktad fordonets färdriktning. Det syns att de största motstånden återfinns vid bilens grill och bas. Andra områden värda att uppmärksamma är minskningen i luftmotstånd som uppkommer precis efter grillen, ökningen och minskningen runt främre hjulhus och ökningen runt bakre hjulhus.



Figur 4.1: Det ackumulerade luftmotståndet längs bilen som funktion av sträckan. Den största retarderande krafterna återfinns vid fronten och basen på bilen.

I figur 4.2 visas tryckkoefficienten på bilens front respektive bas. På grillen ses ett högt lokalt tryck som uppkommer då fluiden tvingas retardera, då dess relativa hastighet gentemot bilen innan kollision är 30 m/s. För att skapa denna retardation behövs en motkraft från bilen, vilket trycker den bakåt. Detta skapar ett område med låg hastighet och högt tryck på grillen. Detta ses i figur 4.1 där C_D -värdet har ett lokalt maximum vid grillen. Längs vindrutan och över motorhuven sjunker trycket. Till skillnad från grillen så har vindrutan en lutning och den resulterande kraften är riktad i dess normal. Enbart kraften i bilens färdriktning påverkar C_D , medan kraften i vertikal riktning påverkar lyftkraften. Notera att positivt tryck är definierat som normal ut från ytan, vilket innebär att positivt tryck på fronten trycker bilen bakåt, medan positivt tryck på basen trycker bilen framåt.



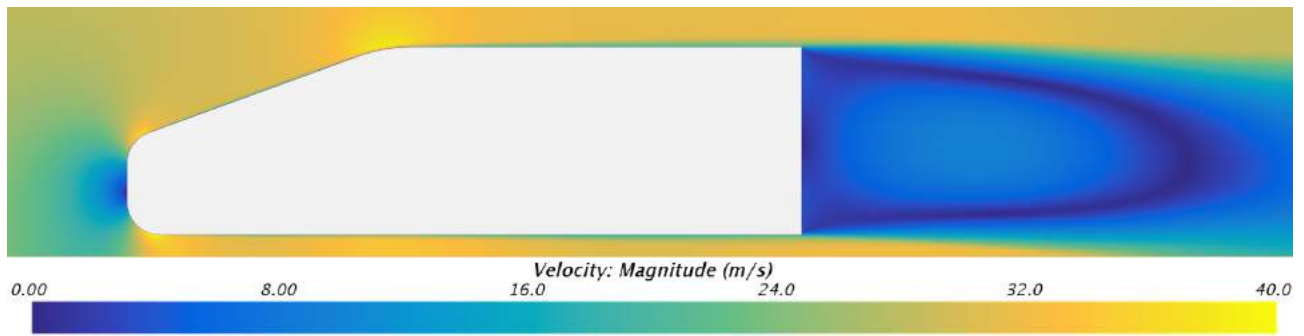
Figur 4.2: a) Frontrycket för referensbilen. Trycket är som högst i fronten och sjunker över vindrutan och längs frontens kanter b) Bastrycket för referensbilen. Trycket är nästan jämt fördelat över hela basen, med ett område med högst tryck i mitten.

I området vid basen av bilen uppstår ett negativt tryck och i vaken skapas ett turbulent lågtrycksområde. Detta beror på att luften inte klarar att tryckutjämna området tillräckligt snabbt efter att luften separerar från bilkanten. I figuren ses att området i mitten av basen har högst tryck, för att sedan minska mot kanterna. Virvlar skapas då luft strömmar mot lågtrycksområdet och försöker tryckutjämna, men på grund av fluidens låga hastighet sker inte detta tillräckligt snabbt. Detta visualiseras i figur 2.2. Luften som strömmar in i mitten bromsas och skapar ett tryck på ytan, medan närmare kanterna fortsätter luften att röra sig, vilket gör att trycket blir lägre. Lågtrycksområdet ger upphov till en kraft motriktad färdriktningen, vilket ger ett bidrag till det totala luftmotståndet. Enligt figur 4.1 ses att de största retarderande krafterna uppkommer i dessa två regioner. För att minska C_D -värdet bör därför tryckskillnaden mellan fronten och basen vara så liten som möjligt.

Vid hjulhusen i figur 4.1 ses att motståndet ökar lokalt, för att sedan sjunka. Detta är mer svårförklarligt då hjulhusets relativt komplexa geometri tillsammans med hjulets rotation ger svårförklarliga effekter på luften. En möjlig förklaring är att luften som färdas närmast baken först möter bilen vid framhjulen, precis som vid fronten bör detta ge en retarderande kraft på bilen. Eftersom kraften är proportionell mot ytan den verkar på bör kraften bli väsentligt mindre än vid fronten.

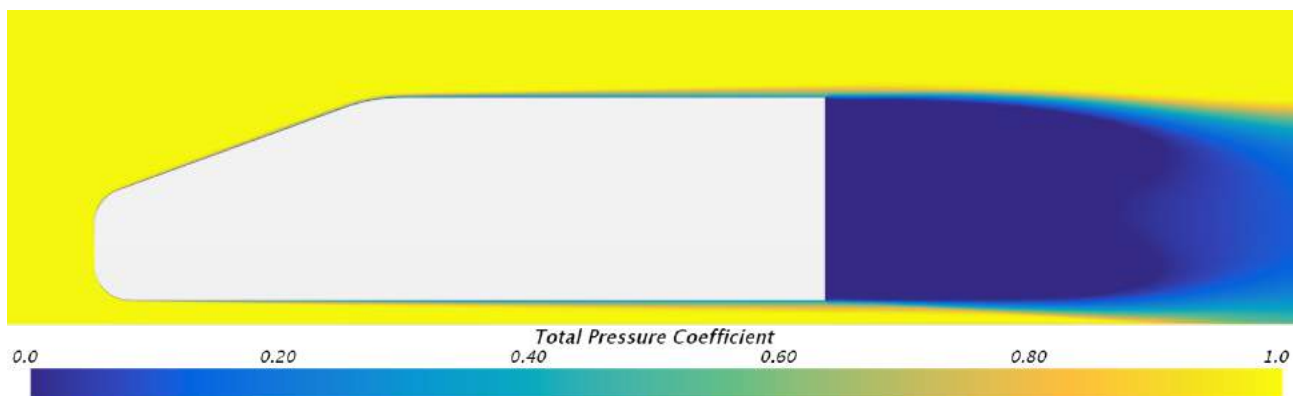
Mellan övergången från grill till motorhuven ses i figur 4.1 att luftmotståndet sjunker, som följd av att luften runt fronten accelererar över motorhuven. I figur 4.3, som visar fluidens hastighet

som ett färgdiagram i ett symmetriplan genom bilen, syns att hastigheten i området är högre än 30 m/s. Notera att kontrollvolymen som används följer bilens position.



Figur 4.3: Fluidens hastighet som ett färgdiagram i ett symmetriplan genom bilen. Det kan ses att hastigheten ökar över motorhuven på bilen. Vid basen ses ett stort område med låg hastighet, vilket är bilens vak.

Enligt Bernoullis förlustfria ekvation (2.7) leder en ökande hastighet till ett minskat tryck. I övergången fås då en tryckminskning, vilket bidrar till att minska bilens C_D -värde. Anledningen till att Bernoullis förlustfria ekvationer får användas illustreras i figur 4.4 där den totala tryckkoefficienten visas som ett färgdiagram i ett symmetriplan. Detta är ett mått på hur stora förlusterna är i fluiden. Framför bilen ses ett värde nära 1, vilket tyder att inga förluster finns. Vid övergången mellan fronten och motorhuven syns att förlusterna är försumbara.



Figur 4.4: Totala tryckkoefficienten som ett färgdiagram i ett symmetriplan. Värdet nära 1 indikerar små förluster. De största förlusterna återfinns i bilens vak.

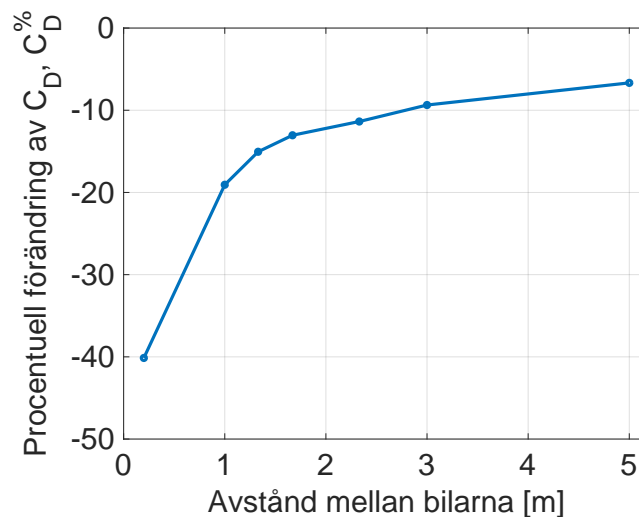
4.2 Avstånd

I det här avsnittet presenteras resultaten från test 2 - 8, som är beskrivna uppställningarna i figur 3.1. De presenteras ordnat efter avstånd med en tillhörande analyserande del. Först presenteras resultaten från simuleringarna med endast varierande avstånd mellan bilarna, följt av en sammanfattande del. Då samma trender syns vid olika avstånd så kommer dessa analyseras gemensamt. I tabell 4.1 visas en överblick över C_D -värdena för de individuella bilarna och kolonnens genomsnittliga värde. $C_D^{\%}$ beskriver den procentuella förändringen för de tre bilarnas C_D -värde jämfört med referensbilens, vilket beräknas enligt ekvation (3.4).

Tabell 4.1: C_D för respektive bil och medelvärde för respektive simulering.

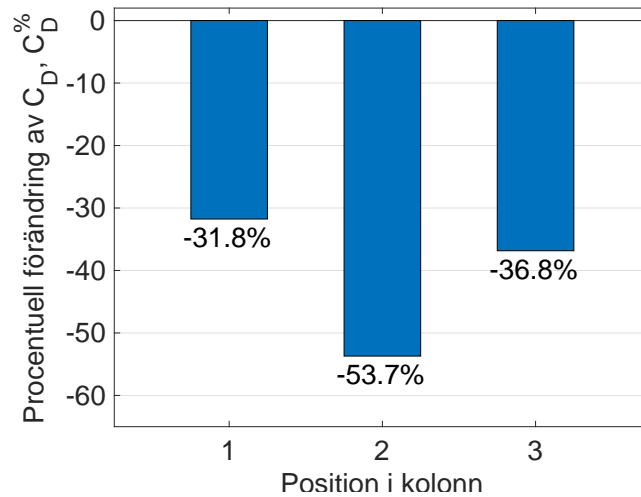
Simulering	C_D - Bil 1	C_D - Bil 2	C_D - Bil 3	C_D - Medelvärde	$C_D^{\%}$
Test 1 - en bil	0,299	-	-	0,299	-
Test 2 - 0,2 m	0,203	0,136	0,189	0,176	-40,133
Test 3 - 1 m	0,233	0,244	0,249	0,242	-19,063
Test 4 - 1,33 m	0,263	0,250	0,250	0,254	-15,050
Test 5 - 1,67 m	0,280	0,253	0,246	0,260	-13,043
Test 6 - 2,33 m	0,294	0,261	0,241	0,265	-11,371
Test 7 - 3 m	0,298	0,269	0,246	0,271	-9,364
Test 8 - 5 m	0,300	0,277	0,259	0,279	-6,669

I figur 4.5 visas medelvärdet för kolonnens $C_D^{\%}$ som funktion av de interna avståndet. Här ses att korta avstånd mellan bilarna ger det mest gynnsamma $C_D^{\%}$ -värde för att sedan med ökande avstånd närma sig 0, alltså referensbilens C_D -värde. Det kan också konstateras att förändringen av $C_D^{\%}$ -värde saktar in för större avstånd, vilket tyder på att flödet inte förändras i lika stor grad som vid kortare avstånd. Utifrån tabell och figur kan konstateras att simuleringar med stora interna avstånd (2,33 m - 5 m) följer liknande trender, varför liknande resonemang kan användas för att beskriva vad som observeras.

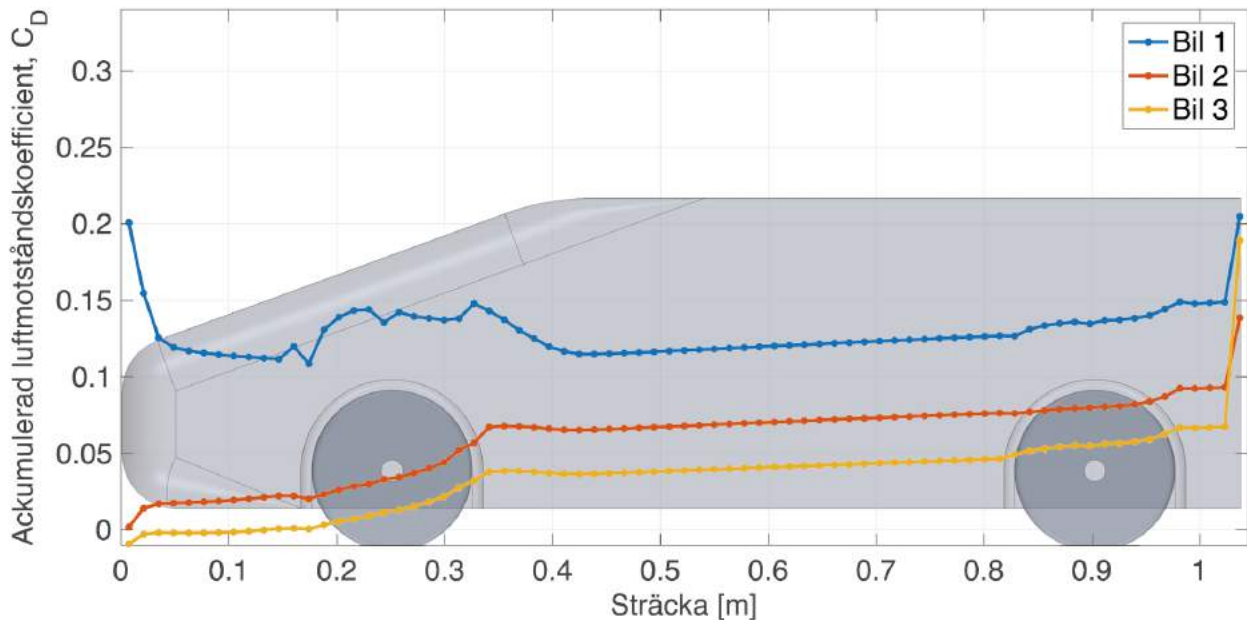
Figur 4.5: Medelvärdet för respektive kolonnens $C_D^{\%}$ följer en exponentiell trend då avståndet mellan bilarna ökar.

4.2.1 Kolonn med 0,2 meter avstånd

I kolonnen med kortast internt avstånd mellan bilarna är avståndet 0,2 meter, vilket motsvarar ungefär en femtedels billängd. I figur 4.6 och 4.7 visas $C_D^{\%}$ respektive det ackumulerade luftmotståndet över bilarna. I figuren ses att position två är den mest gynnsamma i kolonnen för det givna avståndet, då $C_D^{\%}$ är lägst. Det kan ses i figuren att de största effekterna på C_D för bil 1 fås över grillen och delvis basen. För de bakomvarande fordonen ses förluster över hela fronten och på basen. Det ses att effekterna som uppkommer vid hjulhus och övergång från grill är strikt negativa för de bakre bilarna, medan på bil 1 är de identiska till referensbilens. Även om endast bil 1 upplever dessa fördelar ger det inte tillräckligt stor minskning av luftmotståndet för att ge bilen en gynnsammare position.



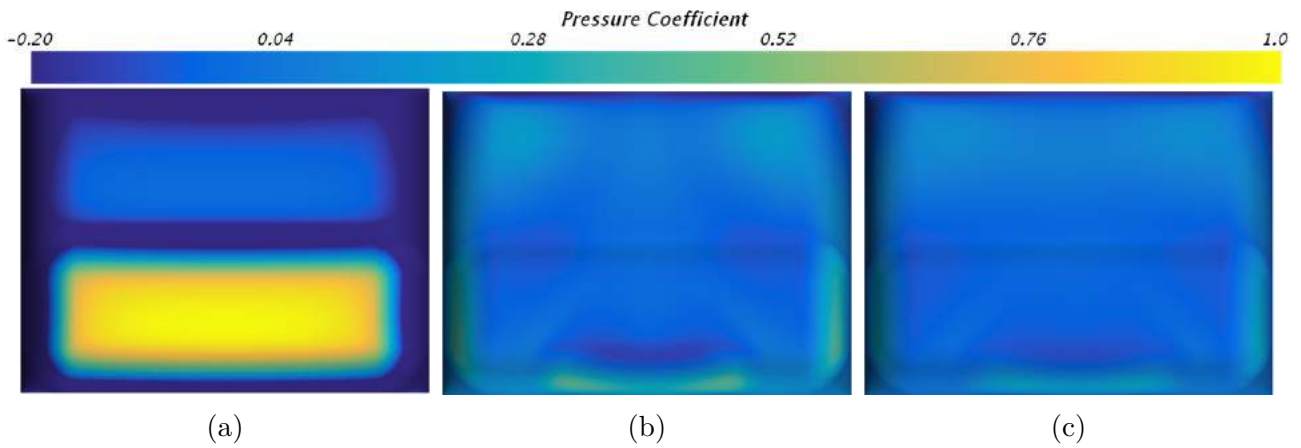
Figur 4.6: Luftmotståndskoefficientens fördelning längs bilen som funktion av sträckan. Vid basen är de retarderande krafterna ungefär lika stora, medan den ledande bilen har störst retarderande kraft i fronten.



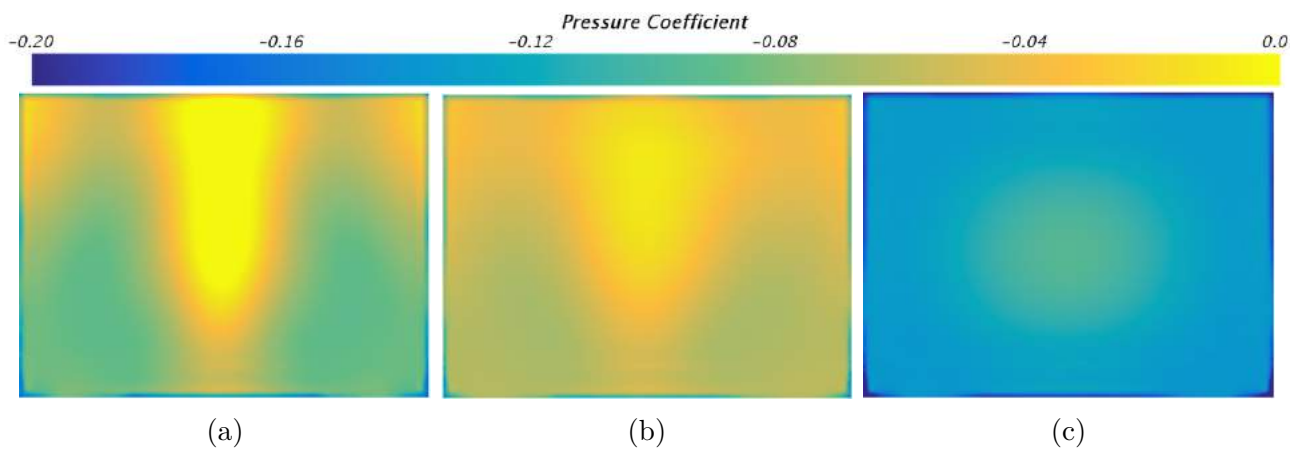
Figur 4.7: Det ackumulerade luftmotståndet över respektive bil i kolonnen. För den främre bilen ses ett stort tillskott till motståndet i fronten samt basen. För de bakomvarande bilarna ökar motståndet över vindrutan samt i basen.

I figur 4.8 visas fronttrycket, där den ledande bilen är placerad längst till vänster och den sista bilen längst till höger. På samma sätt visas bastrycket i figur 4.9. För att minimera C_D -värdet bör trycket i fronten minimeras medan trycket vid basen maximeras. I figuren ses att trycket i fronten på det ledande fordonet är högre än de två efterkommande. Uppkomsten till frontaltryckfördelningen på den första bilen förklaras på samma sätt som för referensbilen, då strömmingsförhållandena innan första bilen är identiska. Fronttrycket sjunker till den andra och tredje bilen i kolonnen till nästan noll. Då bastrycken observeras ses istället ett högre tryck på de två ledande bilarna, för att sedan sjunka till den tredje.

Trycket efter den sista bilen är betydligt lägre än de två framförvarande och förändras marginellt mellan de två ledande bilarna. Notera dock att liknande tryckmönster kan ses på de tre bilarnas front samt de två ledande bilarnas bas.



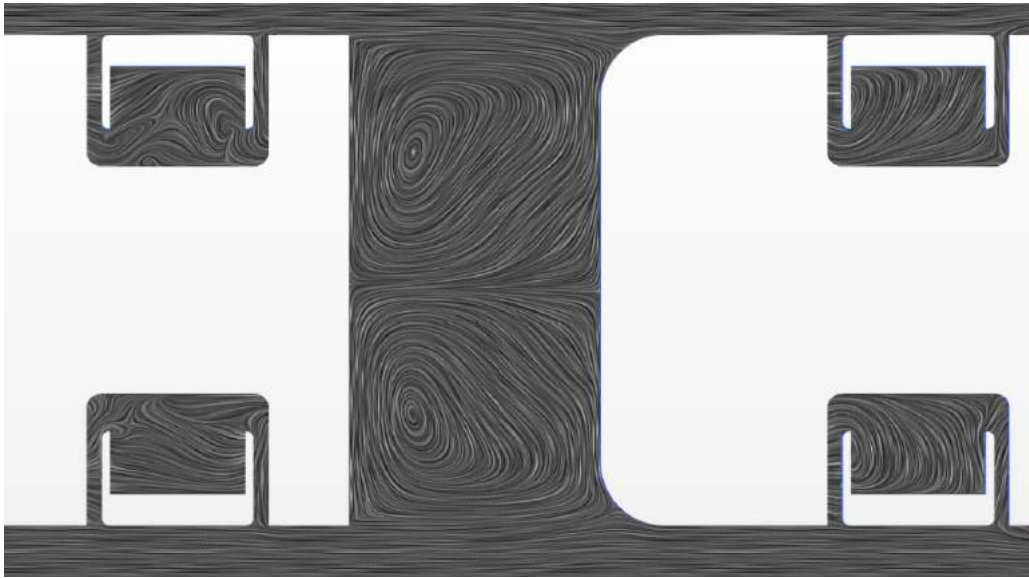
Figur 4.8: Frontrycket för bil 1-(a), 2-(b), 3-(c). Det ses att frontrycket är högst för den första bilen, för att sedan minska. Den största tryckansamlingen går att finna mitt på bilens grill, då denna del är den ytan som först kommer i kontakt med luften, samt är normal till strömriktningen.



Figur 4.9: Bastrycket på bil 1-(a), 2-(b), 3-(c). De två ledande bilarna uppvisar ett spaltliknande uteende, medan den tredje mer liknar referensbilen. Det ses att bastrycket sjunker för de bakomliggande bilarna, samt att trycket är högt i mitten av basen.

Att den ledande bilen inte har lägst C_D -värde anses rimligt då det höga trycket i fronten skapar en stor tryckskillnad över bilen. I figur 4.7 bekräftas att det största motståndet på den ledande bilen uppkommer i fronten. På liknande sätt önskas trycket i basen maximeras vilket gör att bil 3, vid korta avstånd, rimligtvis inte heller är optimalt placerad. I figur 4.7 visas att det största motståndet för denna bil uppkommer vid basen. Bilen i mitten har inga stora tryckskillnader jämfört med de andra bilarna, vilket förklarar varför denna bil upplever de mest gynnsamma strömningsförhållandena och således har lägst C_D -värde i kolonnen.

Notera dock att trycket inte är jämt fördelat på bilarnas front eller bas (figur 4.8 och 4.9). I fronten hos bil 2 och 3 skapas ett högre tryck längst ut på bilens kaross, vilket ger upphov till de negativa effekterna över vindrutan som observeras i figur 4.7. Frontrycket på den ledande bilen är identiskt med vad som presenteras i avsnitt 4.1, då luftflödet innan kollision är den samma. I figur 4.3 visas fluidens hastighet i ett färgdiagram. Det låga trycket i fronten på bil 2 är troligen en konsekvens av att bilen ligger i det ledandes fordonets vak, vilket sänker hastigheten på luften innan kollision. Anledningen till att trycket är högst längs kanterna på bilen är förmodligen en följd av de korta inbördes avstånden. Luften som tvingas till att accelerera runt den ledande bilen följer strömlinjerna kring bilens kaross, vilket visas i figur 4.10 och 4.11.



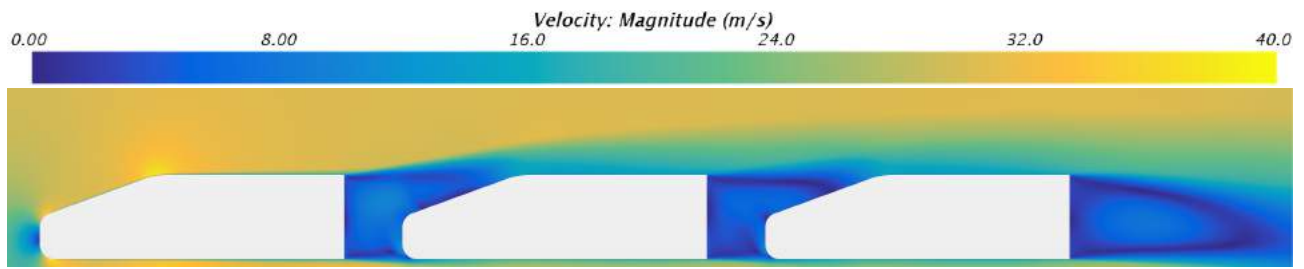
Figur 4.10: Strömlinjer sett ovanifrån mellan den ledande och mellersta bilen, där de interna avstånden är 0,2m. Det syns att strömlinjer tenderar att uppvisa symmetri längs bilens centrumlinjer. Strömlinjer mellan samtliga bilar återfinns i Appendix A.



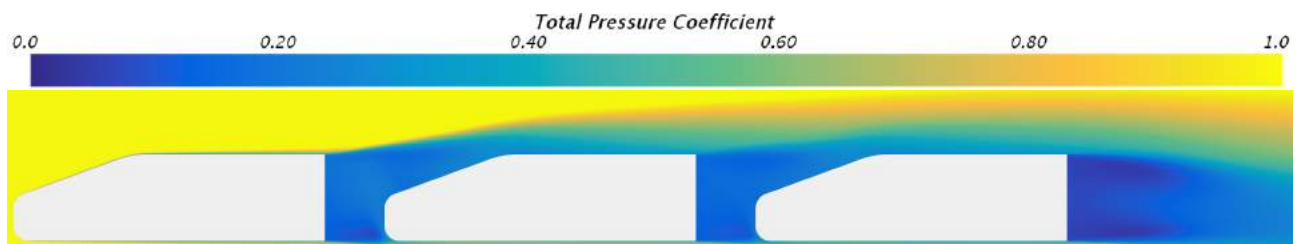
Figur 4.11: Strömlinjer sett från sidan för kolonnen där de interna avstånden är 0,2m. Vakens utseende varierar mellan de två ledande och det sista fordonet.

Tryckmönstret som ses på den tredje bilens bas (figur 4.9c) liknar det som observeras på referensbilen, dock med ett högre tryck. På de främre bilarna, som ses i figur 4.9a och 4.9b, ses ett helt annat tryckmönster. Detta tyder på att det bakomvarande fordonet har stor effekt på basstrycket. Tryckmönstret som uppstår i dessa två bilder ser någorlunda lika ut, dock med olika värden. I figur 4.10 och 4.11 visas strömlinjerna ovanifrån mellan de två ledande fordonen samt sett i ett symmetriplan för samtliga fordon. Det ses att strömlinjerna, i figur 4.11, i övre delen av basen går nästan rakt mot bilen. Här den bromsas in och ger upphov till ett tryck, vilket förklarar det höga trycket som ses i mitten på bilens bas. Samma tendens observeras från sidan, då luftströmmen träffar bilen i mitten, som av samma anledning ökar trycket. Vidare kan ses att de stora symmetriska virvlarna inte träffar bilen, vilket motsvaras av området med lägre tryck som tydligast kan ses i figur 4.9a. Längst ner på basen observeras ett område där virvlarna inte heller träffar bilen, som ger upphov till det lägre tryck som observeras centralt beläget på basens underdel.

I figuren visas att avståndet mellan bilarna är för kort för att strömlinjer ska söka sig mot frontens centrum. Istället träffar strömlinjerna längre ut på karossen, vilket skulle kunna förklara det låga trycket vid bilens centrum av fronten. Vidare syns i figur 4.12, som visar hastigheten hos fluiden i ett symmetriplan, att hastigheten kraftigt sjunker jämfört med friströmshastigheten efter bilens bas. Eftersom det applicerade tryck på fronten är proportionellt mot hastigheten är det rimligt att anta att trycket bör vara lägre vid frontens mitt än vid dess kanter. Vakens utseende ändras då en bil placeras tät inpå bakifrån. I figur 4.11 syns att vaken efter den första och andra bilen skiljer sig från den sista. Luften tenderar att i hög grad sugas in ovanifrån och från sidan, varför trycket är högre på nästkommande fronts kanter.



Figur 4.12: Fluidens hastighet som ett färgdiagram genom bilens symmetriplan. Det ses att hastigheten i flödet minskar bakåt i kolonnen.



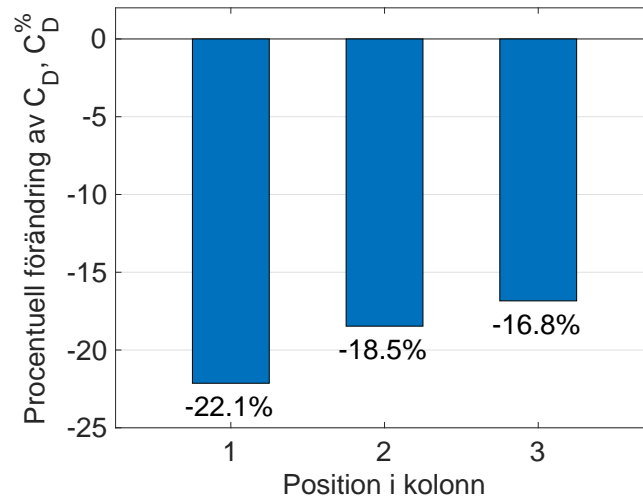
Figur 4.13: Energin i flödet i ett symmetriplan för kolonnen med 0,2 meter internt avstånd. Det ses att längre bak i kolonnen har flödet lägre energi, vilket påverkar stagnationstrycket på bilarna.

Vidare ses att vaken samt hastigheten tenderar att variera beroende på bilens position i kolonnen. Tydligt är att den bakomvarande bilen har inverkan på vakens utseende. Hos den sista bilen ses ett väntat mönster, då vaken är fri från störningar. Vakens utseende är snarlik referensbilens som presenteras i figur 2.2. Placerar en bil i vaken försvinner det förutsägbara mönstret, då strömlinjerna påverkas av ett objekt. I figur 4.11 observeras att i vaken efter den första bilen tenderar strömlinjerna att träffa vindrutan och grillen på bakomfarande fordon. Detta ger upphov till det större motstånd som ses i fronten på den andra bilen jämfört med den tredje bilen vilket syns i figur 4.7. I vaken efter den andra bilen ses istället att strömlinjerna inte träffar bilen på lika många ställen, vilket ger upphov till det låga motståndet i fronten som bilen upplever. Orsaken till det annorlunda utseendet är att luftens hastighet i området runt bilen är lägre, vilket gör att inte lika mycket luft hinner sugas in i området. Detta påverkar vakens karaktäristik.

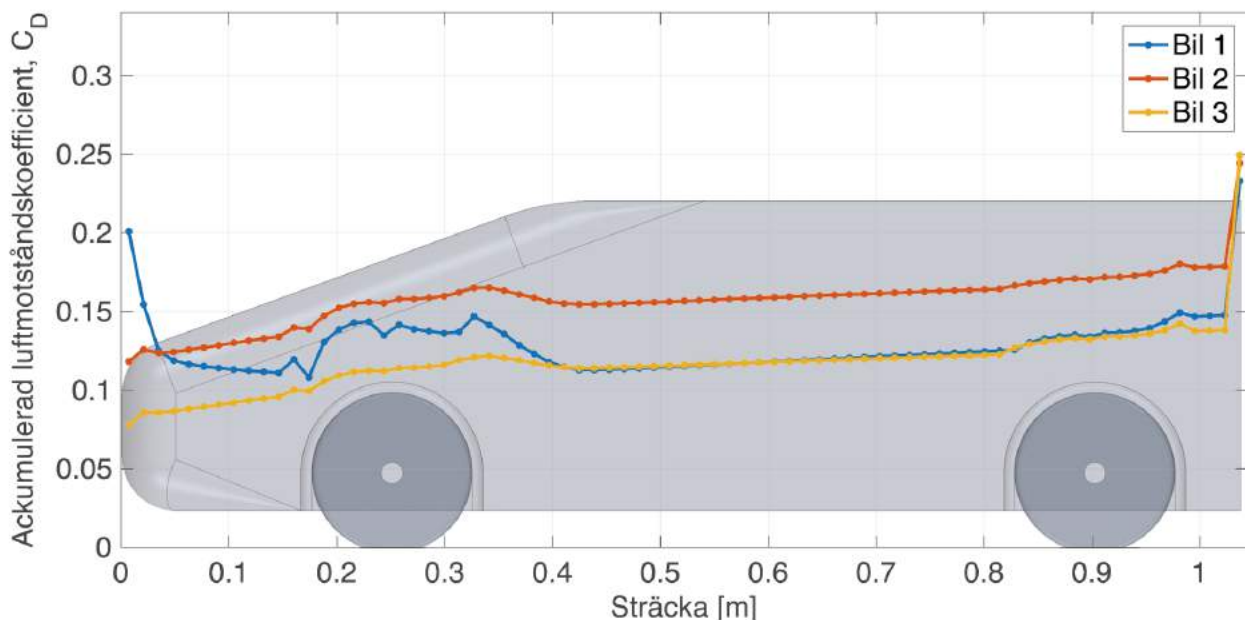
I figur 4.12 ses tydligt var de olika områdena med stagnation uppkommer, för den första bilen i fronten, för den andra bilen över vindrutan och för den tredje bilen en del av vindrutan samt övergången mellan grill och vindruta. Storleken och riktningen på stagnationsytan, samt trycket, påverkar motståndet. Ett stort område riktat i flödesriktningens normal ger upphov till en stor dragkraft, som är tydligt på den ledande bilen, medan ett litet område riktat delvis bort från flödesriktningen ger upphov till en mindre dragkraft, som är uppenbart på den tredje bilen. Trycket uppkommer då fluiden bromsas in, varför en hög hastighet ger upphov till ett högt tryck, som ses på den första bilen, då fluidens hastighet är betydligt högre innan kollision. För de efterkommande bilarna ses ett betydligt mer gynnsamt fall, då hastigheten och energin i flödet innan kollision är betydligt lägre. Energin i flödet ses i figur 4.13. Det är tydligt att längre bak i kolonnen har flödet tappat stor del av sin energi, vilket sänker stagnationstrycket på de bakre bilarna. Den sista bilen i kolonnen får sammantaget lägst frontryck då dessa effekter påverkar.

4.2.2 Kolonn med 1 meter avstånd

I kolonnen med 1 meter internt avstånd ses att de positiva effekterna minskar jämfört med fallet 0,2 meter. I figur 4.14 och 4.15 presenteras $C_D^{\%}$ samt det ackumulerade C_D -värdet över bilarna. Här observeras att den första bilen i kolonnen upplever lägst luftmotstånd, för att sedan öka bakåt i kolonnen. De största förlusterna återfinns i fronten och basen. Mellan bilarna ses relativt stora förändringar i fronttryck, medan de tre bastrycken skiljer sig mindre från varandra. Positionsberoendet skiljer sig från fallet med 0,2m, där den första bilen hade den minst gynnsamma positionen.



Figur 4.14: $C_D^{\%}$ som funktion av bilens position i kolonnen. Den ledande bilen har den mest fördelaktiga positionen.

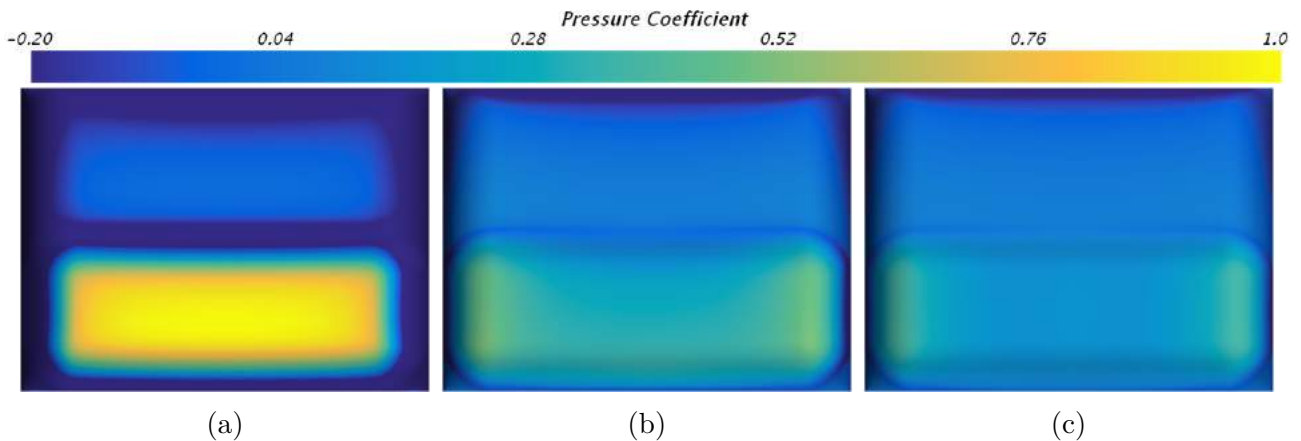


Figur 4.15: Den ackumulerade luftmotståndskoefficienten längs bilarna som funktion av sträckan. De största bidragen till luftmotståndet återfinns i fronten och basen för samtliga bilar.

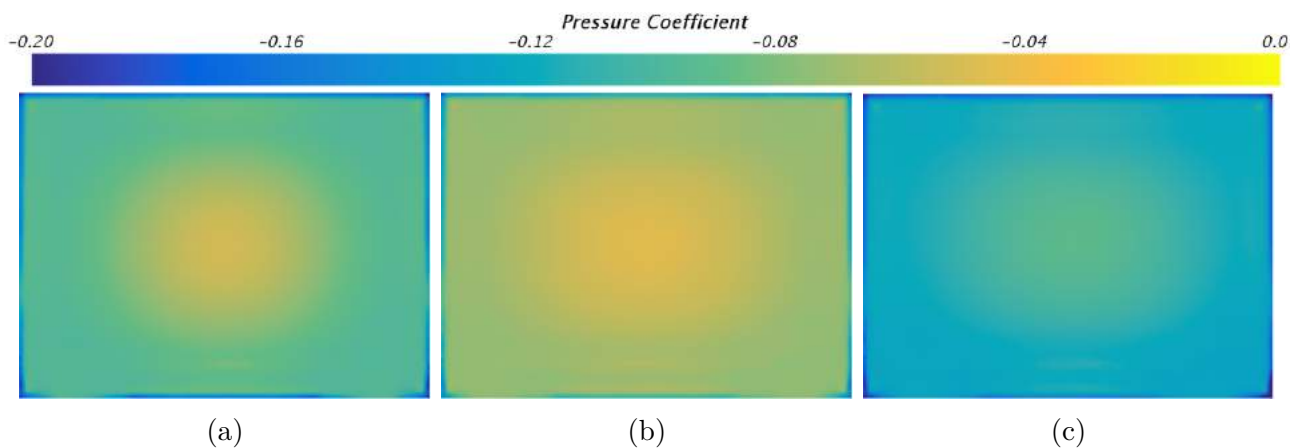
Då det interna avstånden mellan bilarna är 1 meter ses motsatt resultat för den ledande bilen jämfört med tidigare. Om enbart front och bastryck undersöks ses ingen uppenbar förklaring till varför den första bilen upplever lägst motstånd, då den har högst fronttryck och medelhögt bastryck. Däremot ses att precis efter fronten fås ett negativt tillskott till C_D -värdet, vilket

här gör tillräckligt stor skillnad för att den första bilen ska uppleva lägst luftmotstånd. Detta förklaras likt tidigare med att ett lågtrycksområde fås då luften accelereras över motorhuv. I figur 4.15 ses även att efter främre hjulhuset sjunker luftmotståndskoefficienterna för de bakre bilarna, vilket inte är fallet då avståndet mellan bilarna är 0,2 meter. Detta förklaras på liknande sätt som för referensbilen, och tyder på att flödet mellan bilarna mer liknar friströmsflödet. Denna trend kan antas fortsätta för ökande avstånd, då flödet hinner stabilisera sig mer.

I figur 4.15 ses att motståndet i fronten ökar för de två bakomvarande fordonen, samtidigt som motståndet i basen ökar för samtliga bilar, jämfört med tidigare resultat. Front- och bastryck för de tre bilarna kan ses i figur 4.16 samt 4.17.



Figur 4.16: Frontrycket för bil 1-(a), 2-(b), 3-(c). Frontrycket är högt för den främsta bilen, för att sjunka bakåt i kolonnen. På de bakomvarande fordonen ses tryckansamlingar på grillens kanter.



Figur 4.17: Bastrycket för bil 1-(a), 2-(b), 3-(c). Bastrycket är högst för den mellersta bilen. Den högsta tryckansamling är beläget i basens centrum för samtliga bilar.

I figur 4.16b och 4.16c går tryckmönstret på de bakre bilarnas front tydligare att urskilja än vid 0,2 m. Vidare är trycket mer jämt fördelat över grill och vindruta. Detta skulle kunna förklaras med att luften i vaken, från den föregående bilen, i större grad hinner sugas in i lågtrycksområdet jämfört med då avståndet var 0,2m. Detta anses rimligt eftersom avstånden mellan bilarna ökar vilket medför att strömlinjerna hinner röra sig närmare vakens centrum, vilket ses nedan i figur 4.19.

Tryckmönstret på bilens front förklaras på liknande sätt som tidigare. För den första bilen är det uppenbart att det är identiskt, då luften som träffar fronten är ostörd. För de bakomvarande fordonen ses att på grillen uppstår ett relativt högt tryck, för att sedan sjunka över vindrutan.

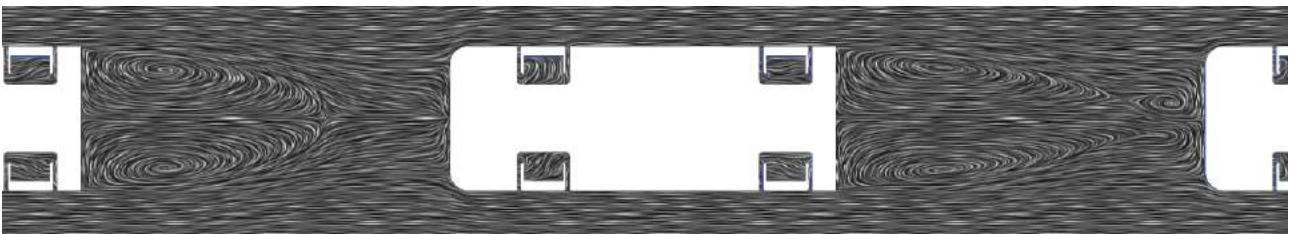
Då avståndet mellan bilarna ökar kommer flödet mellan dem mer efterlikna friströmmen. Denna tendens ses vid detta avstånd.

Likt tidigare upplever bilen i mitten högst bastryck, för att sedan minska för de yttersta fordonen. Dock återfinns inte samma mönster som tidigare, utan det liknar mer referensbilen på samtliga bilar. Bastrycket för 0,2 m uppvisade ett spaltlinkande mönster, där det högsta trycket är centrerat på basen samt uppe i hörnen, för de två ledande bilarna. Här är högtrycket istället centrerat till basens mitt. I figur 4.18 visas strömlinjer i kolonnen sett från sidan. Det ses att strömlinjerna bakom bilen har virvlar belägna längs basens topp och botten, som till stor del inte träffar basen och därmed inte ger upphov till någon större tryckökning. I mitten av basen går strömlinjerna inåt, där de kolliderar och skapar ett tryck mot ytan.

I figur 4.19 ses att strömlinjerna har liknande utseende i ett plan sett från ovan, som i planet sett från sidan. Detta anses rimligt då bastrycket som presenterats är symmetriskt i samtliga riktningar från centrum. Här ses även att strömlinjer kolliderar med kanten av fronten på nästkommande bil. Detta förklarar varför det uppkommer ett högtrycksområde i kanterna på grillen i figur 4.17b och 4.17c.

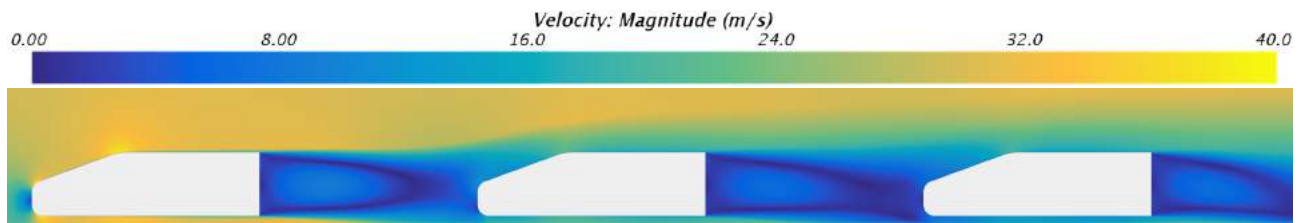


Figur 4.18: *Strömlinjer sett genom bilens symmetriplan. Vaken uppvisar en symmetrisk karaktär kring basens vertikala centrallinje. Det observeras mindre störning i vaken från nästkommande fordon än tidigare och vaken liknar mer referensbilen. Strömlinjer sett från sidan för hela kolonnen återfinns i Appendix A.*



Figur 4.19: *Strömlinjer sett ovanifrån för de två ledande bilarna. Vaken uppvisar en symmetrisk karaktär kring basens horisontella centrallinje. Strömlinjer sett ovanifrån för hela kolonnen återfinns i Appendix A.*

Det kan ses att det uppkommer mindre störning än tidigare presenterat resultat mellan virvlar i vaken och nästkommande fordon, vilket förklarar varför bastrycket mer liknar referensbilen. Bastrycket är högst för den mellersta bilen, vilket innebär att mer luft strömmar mot bilens bas. Det kan ses i figur 4.18 att stagnationspunkten för den andra bilen är lågt belägen på fronten, medan för att på den sista bilen vara belägen högre upp. Var stagnationspunkten uppstår beror på vakens karaktär. I figur 4.18 syns att vaken bakom den första bilen inte böjer sig nedåt i lika stor utsträckning som för vaken efter den andra bilen. En möjlig förklaring kan ses i figur 4.20 som visar fluidens hastighet i ett symmetriplan. Det syns att hastigheten under den första bilen är högre än de efterkommande, vilket innebär att en större mängd luft kommer färdas under den första bilen jämfört med de eftervarande. Mer luft kommer därför sugas in underifrån på den första vaken, som bidrar till att den inte böjer av lika mycket. Ett förändrat utseende på vaken påverkar i sin tur var stagnationspunkten hamnar.



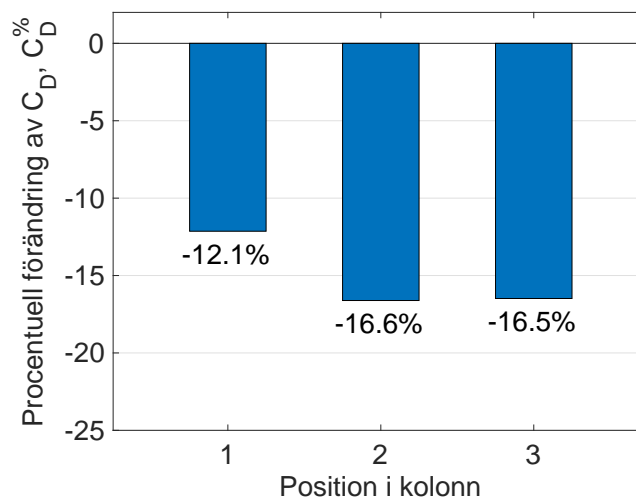
Figur 4.20: Fluidens hastighet som ett färgdiagram genom bilens symmetriplan. Det kan ses att luften i vaken rör sig långsamt, samt att i ett område runt de följande bilarna påverkas hastigheten av det ledande fordonet.

I och med den låga stagnationspunkten för den andra bilen skapas strömlinjer som följer karossen, varför luften kan röra sig ut ur vaken. För den sista bilen ses att strömlinjerna från vaken inte sammanfaller med flödeslinjerna som går över bilens kaross, utan tvingas att vända in mot basen, vilket ger upphov till ett ökat tryck. Därtill syns det att strömlinjerna över motorhuven och vindrutan bättre följer bilens kaross jämfört med då avstånden mellan bilarna var 0,2m. Detta bidrar till en minskad tryckkraft på bilens front.

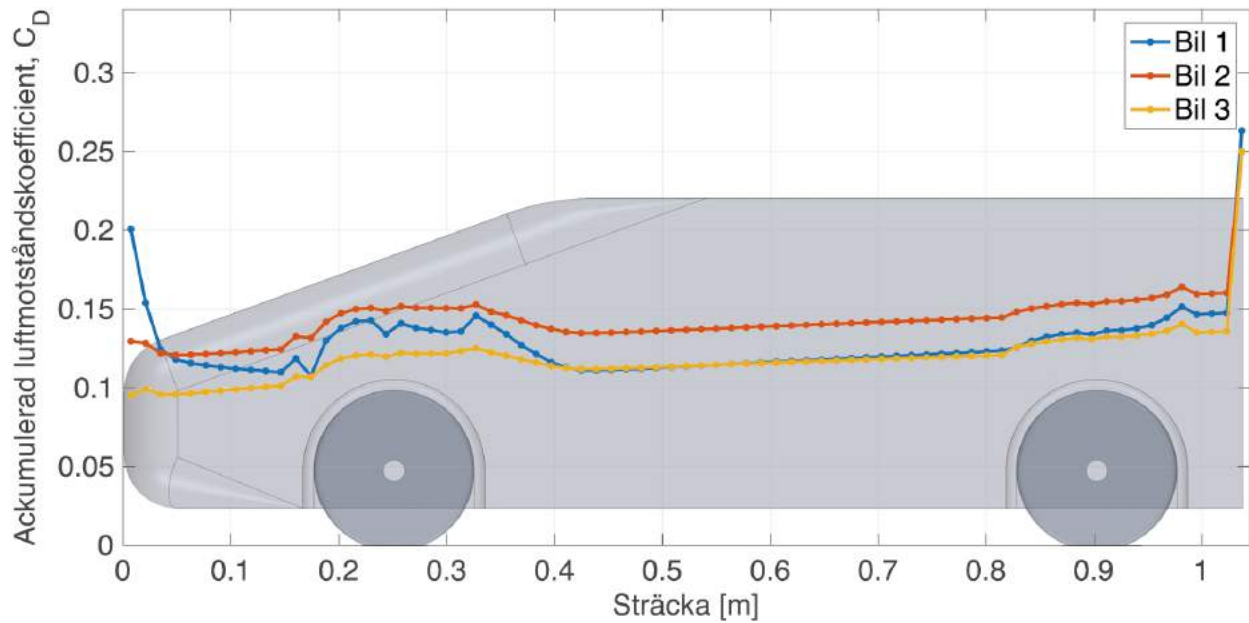
Vidare ses att virvlarna hinner utvecklas fullt istället för att brytas mot nästa fordons kaross, som observeras vid kortare avstånd. Resultatet av detta är att strömlinjerna bättre följer de efterkommande bilarnas karosser. Detta har som nackdel att de nya stagnationspunkterna nu uppkommer på grillen på bilen, vilket ger upphov till en större potentiell motkraft, då normalkraften riktas mot färdriktningen. I figur 4.20 bekräftas att stagnationspunkterna för de tre bilarna alla uppkommer på grillen. Dock ses att hastigheten genom hela vaken fortfarande är låg, vilket förklarar varför det inte återfinns någon större förändring i frontrycket från tidigare, då den långsamma luften lätt bromsas in.

4.2.3 Kolonn med 1,33 meter avstånd

I kolonnen med 1,33 meter internt avstånd minskar de positiva effekterna ytterligare jämfört med resultaten för kortare avstånd. I figur 4.21 och 4.22 visas $C_D^{\%}$ då avstånden mellan bilarna är 1,33 m respektive det ackumulerade C_D -värdet över bilarna. Här observeras att den första bilen i kolonnen upplever högst luftmotstånd, för att sedan minska till den andra och tredje bilen, som upplever liknande motstånd. Stora motstånd återfinns i fronten och basen för samtliga bilar, likt vad som observeras i avsnitt 4.2.2.



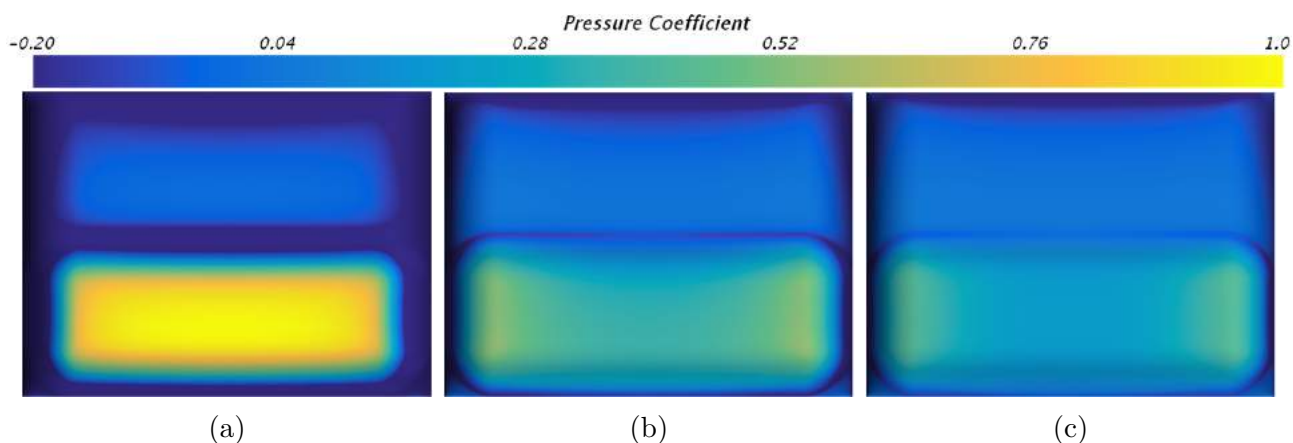
Figur 4.21: $C_D^{\%}$ som funktion av bilens position i kolonnen. För position två och tre syns en marginell skillnad i $C_D^{\%}$. Den ledande bilen har den minst gynnsamma positionen.



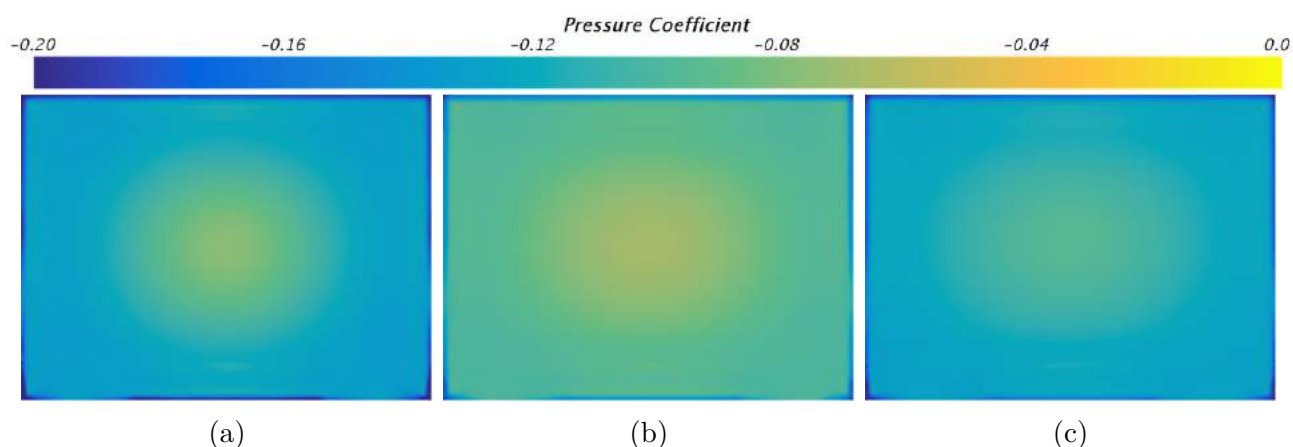
Figur 4.22: Den ackumulerade luftmotståndskoefficienten längs bilarna som funktion av sträckan. Motståndet i fronten är störst för det ledande bilen för att minska längre bak i kolonnen. I basen är skillnaderna mellan bilarna mindre.

Att motståndet är högst för den första bilen tyder på att vid detta avstånd, samt möjligen även för längre, har den främre bilen större påverkan på nästkommande fordon än tvärtom. Med detta menas att den första bilen inte erhåller lika stora positiva effekter som de bakomvarande. Detta på grund av att tryckökningen i vaken minskar med ökande avstånd. Samtidigt fås fortfarande en lägre hastighet på luften i vaken som är gynnsamt för frontrycket. Resultat är motsatt det som presenteras i avsnitt 4.2.2. Där ses att den första bilen i kolonnen upplever lägst motstånd, för att öka för bakomvarande fordon. Detta är alltså en vändpunkt för vilken bil som kommer uppleva störst fördelar, ett rimligt antagande är att i kolonner med längre avstånd ses denna tendens tydligare. Dock är alla fördelar som erhålls mindre än vid kortare avstånd, vilket varit en genomgående trend genom de presenterade resultaten.

I figur 4.23 och 4.24 presenteras front- respektive bastryck för de tre bilarna i kolonnen. Det ses att frontrycket för de bakomvarande fordonen liknar det första, och inga större mönsterförändringar jämfört med resultaten i avsnitt 4.2.2 kan urskiljas. Dock ses att trycket är högre än tidigare. Detta bekräftas av figur 4.22, där det kan konstateras att C_D -värdet i fronten för bilarna skiljer sig från tidigare resultat. I bastrycket ses också skillnad i tryck, som sjunker på samtliga bilar. Detta ses tydligast över de första fordonen. Inte oväntat ses liknande mönster som tidigare, då vaken inte påverkas nämnvärt av det bakomliggande fordonet, vilket beskrivs i tidigare avsnitt.

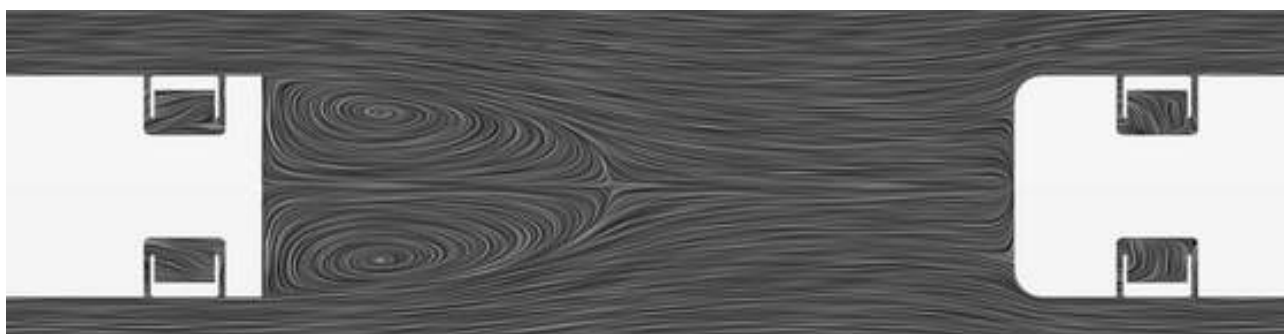


Figur 4.23: Frontrycket för bil 1-(a), 2-(b), 3-(c). Det kan ses att frontrycket är högst för den första bilen, för att sedan minska för bakomvarande fordon. Den största tryckansamlingen går att finna på grillen, då denna yta är den som först kommer i kontakt med luften.



Figur 4.24: Bastrycket för bil (a)-1, (b)-2, (c)-3. Högst tryck uppstår på den mellersta bilen. De två yttre fordonen upplever väldigt liknande bastryck.

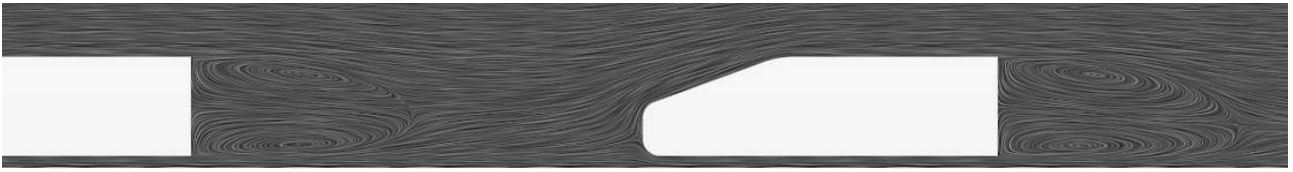
Frontrycket som ses förklaras på samma sätt som tidigare, med att inte lika stor mängd luft träffar centrum på grillen, som på kanterna. Detta kan ses i figur 4.25, där strömlinjerna i ett plan sett ovanifrån visas.



Figur 4.25: Strömlinjer sett ovanifrån mellan de två ledande bilarna. Vaken uppvisar en symmetrisk karaktär kring basens horisontella centrallinje. Strömlinjerna sett över hela kolonnen återfinns i Appendix A.

I figur 4.24 ses att fordonet i mitten har högst tryck på basen. Att trycket är högre här än för det tredje fordonet innebär att den bakomliggande fordonet fortfarande påverkar hur trycket ser ut i vaken. Dock till en lägre grad än vad som observeras för kortare avstånd. Hur vaken påverkas ses i figur 4.26, där strömlinjerna i ett symmetriplan sett från sidan visas. Här ses tendenser liknande dem som presenteras i avsnitt 4.2.2. Virvlarna efter det ledande fordonen

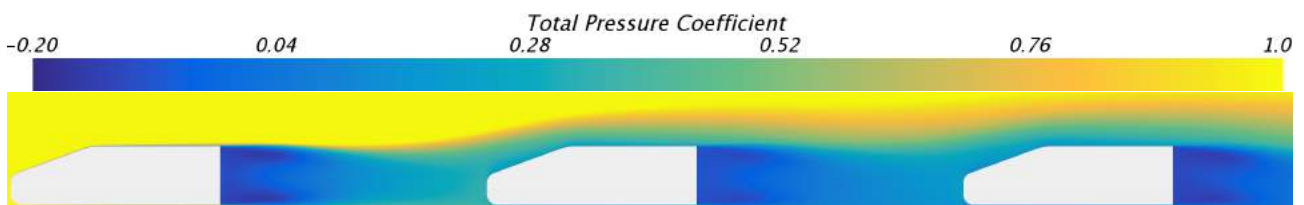
tenderar i större grad att röra sig i strömriktningen istället för att vända tillbaka och träffa basen.



Figur 4.26: Strömlinjer sett genom bilens symmetriplan. Vaken uppvisar en symmetrisk karaktär kring basens vertikala centrallinje. Mindre störningar ses än vid lägre avstånd, vilket gör att den i högre grad efterliknar referensbilen. Strömlinjer sett över hela kolonnen återfinns i Appendix A.

Det bakomvarnade fordonets virvlar tenderar istället att vända tillbaka och träffa basen, vilket ökar bastrycket. Detta, likt tidigare, har att göra med var stagnationspunkten på den efterkommande bilen är belägen. Det ses att den sista bilen har en högre belägen stagnationspunkt, varför färre strömlinjer rör sig i flödesriktningen. Det ses att flödet mellan bilarna är mindre kaotiskt än vid kortare avstånd. Denna trend kan förväntas fortsätta med ökande avstånd, varför stagnationspunkten bör sjunka för den tredje bilen.

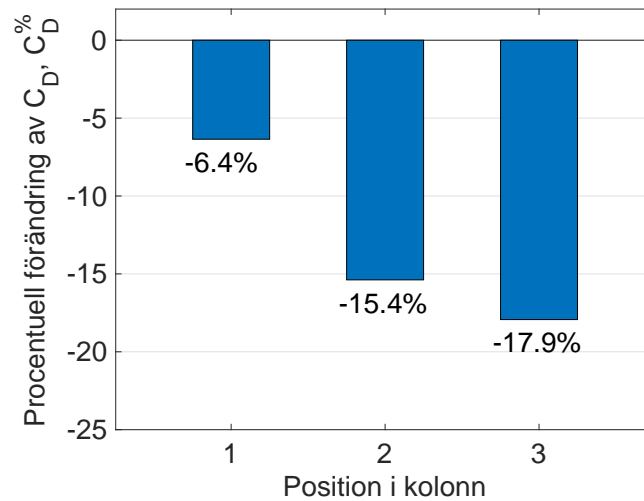
Den första och sista bilen upplever väldigt liknande bastryck, vilket bekräftas av figur 4.22. Detta resultat visar att de två effekter som styr bastrycket har lika stor inverkan. Bil 1 har en bil bakom sig som höjer trycket i vaken, samtidigt som luftflödet runt bilen har högre energi, vilket ger negativ effekt. Detta ses i figur 4.27, som visar energin i flödet runt bilarna i ett symmetriplan. Bil 3 har ingen bil bakom sig, medan luftflödet har en lägre energi runt bilen. I avsnitt 4.2.2 ses att effekten av att ha ett fordon bakom var dominerande, då det sista fordonet upplevt högre motstånd än det första. Om denna trend fortsätter, innebär att för längre avstånd fås att den positiva effekten av att ha ett fordon bakom sig får mindre inverkan. Istället fås större positiva effekter av att ligga långt bak i kolonnen, då flödet har lägre hastighet runt bilen.



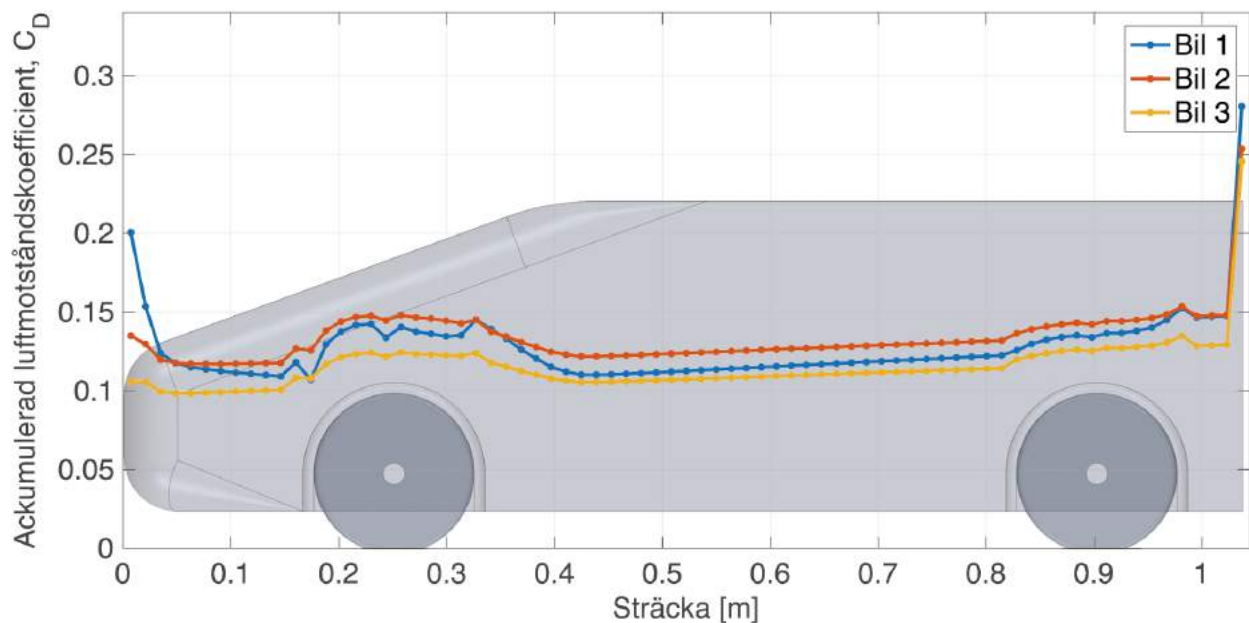
Figur 4.27: Den totala tryckkoefficienten i symmetriplanet för de tre bilarna. Här ses att i vaken och runt de efterkommande bilarna skapas områden med lägre totaltryck, vilket innebär att flödet har lägre energi.

4.2.4 Kolonn med 1,67 meter avstånd

I kolonnen med 1,67 meter internt avstånd kan konstateras att de trender som identifieras i tidigare avsnitt visar sig stämma. I figur 4.28 och 4.29 visas likt tidigare $C_D^{\%}$ och det ackumulerade C_D -värdet över de tre bilarna. Det ses att de positiva effekterna överlag sjunker jämfört med kortare avstånd, samt en tydlig trend att de bakre bilarna upplever gynnsammare förhållanden. Dock fås ett oväntat resultat för den sista bilen i kolonnen, där C_D -värdet är lägre än resultatet från avsnitt 4.2.3, vilket är något som inte observeras för kortare avstånd. Detta diskuteras utförligt i avsnitt 4.2.5, då det där ses tydligare. Utifrån figur 4.29 kan konstateras att fronttrycket ökar marginellt för de tre bilarna. Bastrycket ökar för de två främre bilarna, men sjunker något för den tredje bilen.

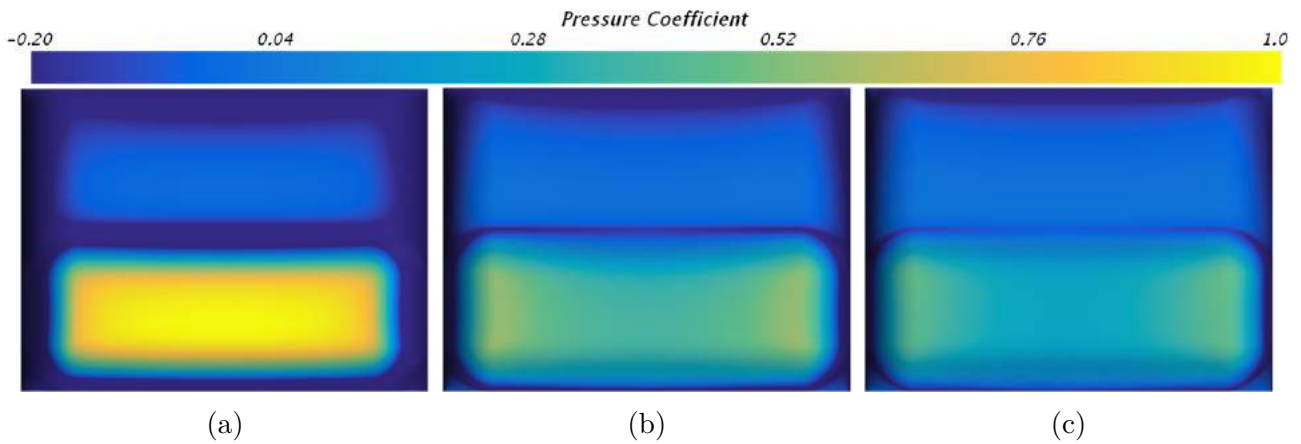


Figur 4.28: C_D som funktion av bilens position i kolonnen. Det ses att luftmotståndet är högst för den ledande bilen, för att sedan minska längre bak i kolonnen.

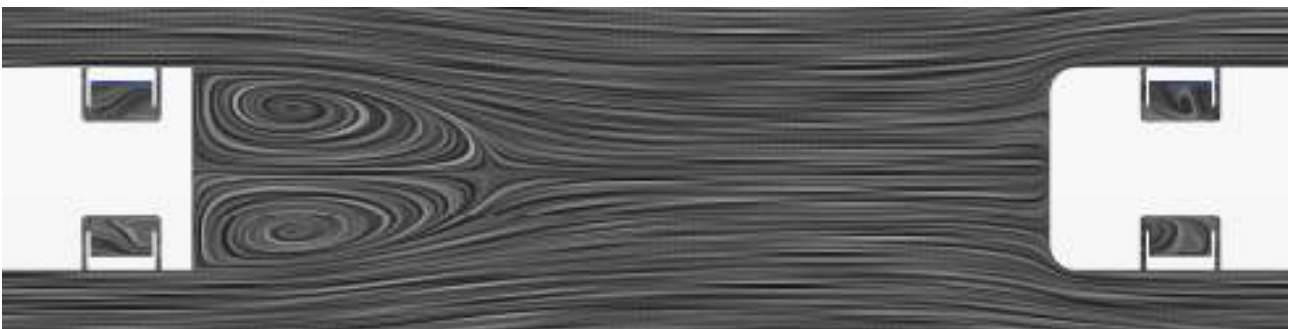


Figur 4.29: Den ackumulerade luftmotståndskoefficienten över bilen som funktion av sträckan. Motståndet i fronten är störst för det ledande bilen för att minska bakåt i kolonnen. I basen är skillnaderna mellan bilarna mindre.

I figur 4.30 presenteras frontrycket för de tre bilarna. Det ses att frontrycket är snarlik tidigare resultat. Som visas i figur 4.29 ses dock ett något högre frontryck på de två följande fordonen. Här ses att trycket över grillen är mer jämt fördelat än tidigare, men fortfarande med tryckansamlingar i kanterna. Detta tyder på att störmlinjerna nu rör sig längre in mot centrum än tidigare. Det visas i figur 4.31 där strömlinjerna ses ovanifrån. Detta är en genomgående trend som observerats tidigare då avståndet ökar. Det kan förväntas att frontrycket blir mer jämt fördelat över grillen för ökande avstånd.

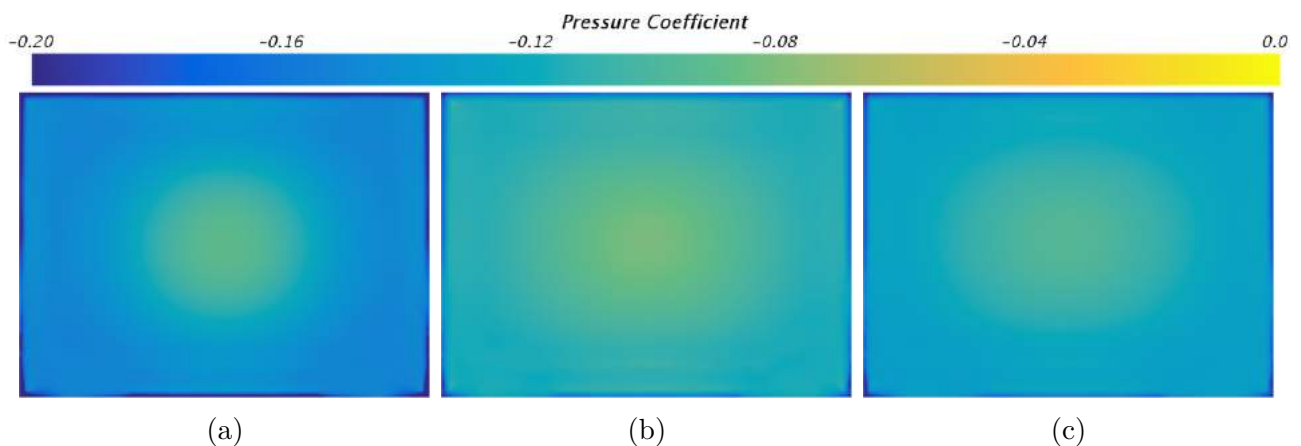


Figur 4.30: Frontrycket för bil 1-(a), 2-(b), 3-(c). I figuren kan ses att trycket på grillen är högst för den första bilen, för att sedan minska. Den största tryckansamlingen går att finna på bilens grill, då denna yta är den som först kommer i kontakt med luftflödet.



Figur 4.31: Strömlinjer för kolonnen med 1,67 meter internt avstånd, sett i ett plan från ovan. Det ses att strömlinjerna i större utsträckning än tidigare hinner in i vaken, varför trycket på nästkommande bil är högre än tidigare.

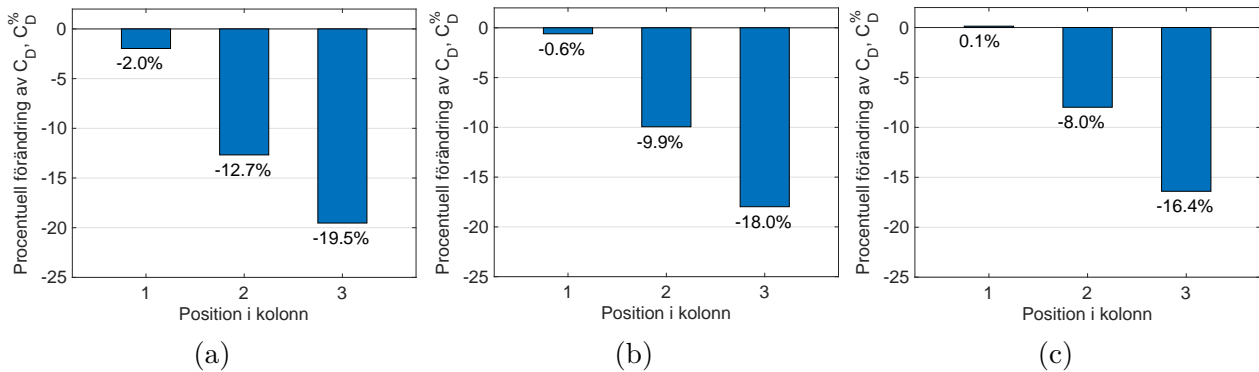
I figur 4.32 presenteras bastrycket för de tre bilarna. Det ses att bastrycket är likt vad som presenteras tidigare. Här ses högst tryck på den andra bilen i kolonnen och lägre tryck för de yttersta fordonen. Den tredje bilen har här ett högre bastryck än den första. Detta visar att större positiva effekter fås av att ligga långt bak i kolonnen där luften är har mindre energi, än att ha ett fordon i vaken. Detta ligger i linje med vad som konstateras tidigare, varför denna tendens förmodligen kommer ses på längre avstånd också.



Figur 4.32: Bastrycket på bil 1-(a), 2-(b), 3-(c). Det kan ses att bastrycket är högst för bilen i mitten och lägre för de två yttre bilarna. Vidare ses att den ledande bilen upplever ett lägre tryck än den sista.

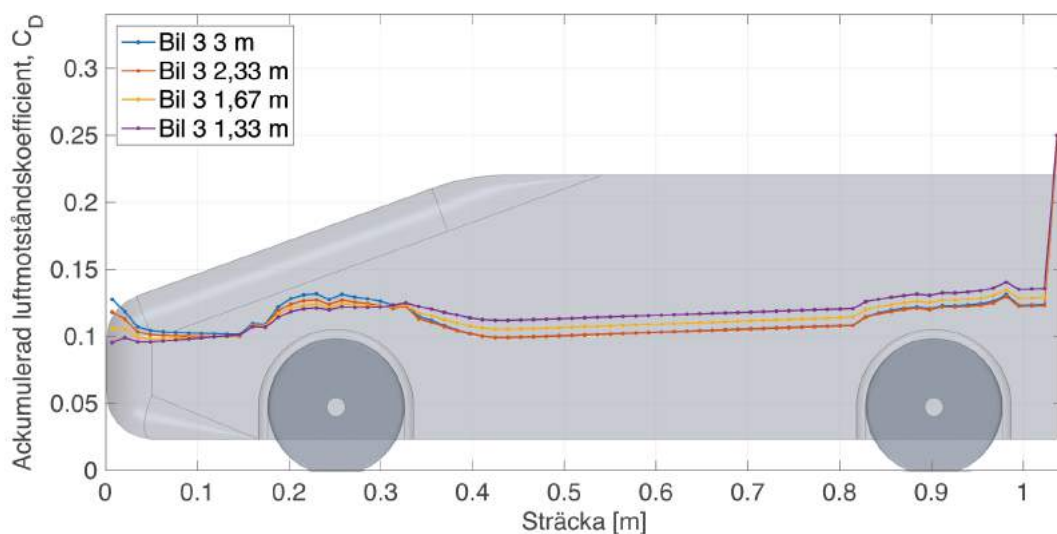
4.2.5 Kolonner med 2,33, 3 och 5 meter avstånd

Nedan presenteras det samlade resultatet för 2,33, 3 och 5 meter internt avstånd. Dessa presenteras tillsammans då liknande tendenser och trender visas för de tre avstånden. Det observeras i figur 4.5 från avsnitt 4.2 att för långa avstånd avtar de positiva effekterna för platooning markant. Om längre avstånd hade simulerats kan antas att C_D -värdet efter ett visst avstånd varit samma som för referensbilen, då bilarnas inverkan på varandra går mot noll. I figur 4.33 visas $C_D^{\%}$ -värdena då de interna avstånden mellan bilarna är 2,33, 3 samt 5 meter. I figuren ses samma trend som tidigare observerat. Det ses att mer gynnsamma C_D -värden återfinns längre bak i kolonnen.



Figur 4.33: $C_D^{\%}$ för respektive bil då de interna avstånden är 2,33, 3 samt 5 meter, där ordningen är sedd från vänster. Trenden för de inbördes bilarna är samma i varje körning. Notera att den första bilen i 5 meter körningen har ett svagt positivt C_D -värde.

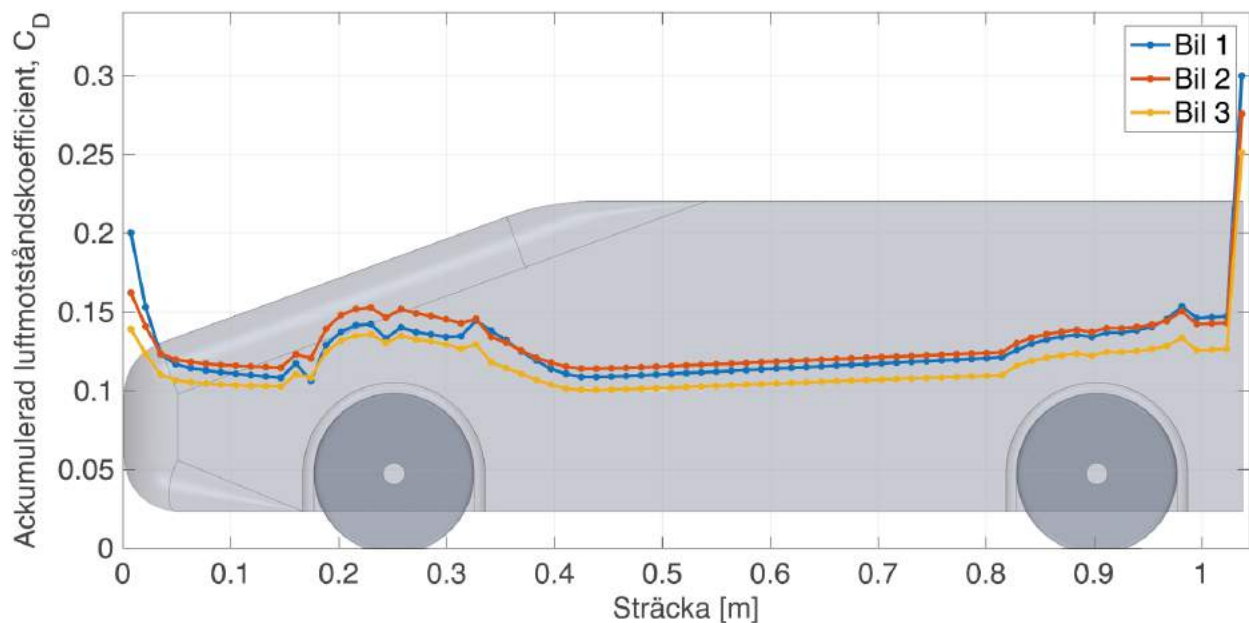
Notera att för den första bilen, då de interna avstånden är 5 meter, har ett svagt positivt $C_D^{\%}$ -värde, vilket inte observeras i tidigare resultat. Detta värde ligger dock väldigt nära referensbilens, så det kan antas vara likställt. Samma oväntade resultat som presenteras i avsnitt 4.2.4 ses på den sista bilen i kolonnen, att motståndet minskar för ökande avstånd. För 2,33 meter ses det lägsta C_D -värdet för den tredje bilen, med undantag för 0,2 meter. Då avståndet ökar fås återigen ökande C_D . Denna tendens ses i figur 4.34, där C_D -värdet för enbart den sista bilen i testerna mellan 1 och 5 meter presenteras.



Figur 4.34: Det ackumulerade C_D -värdet för den tredje bilen i kolonnerna med 1 till 5 meter internt avstånd. Det ses att motståndet för bilarna sammanfaller i en punkt före och efter främre hjulhus, för att sedan öka olika mycket. Ytterligare en skillnad ses på basen, där C_D -värdet ökar olika mycket.

I figuren ses att motståndet i fronten ligger i linje med tidigare resultat och slutsatser, då trycket ökar för längre avstånd. Därefter sammanfaller motståndet för alla bilar i en punkt innan främre hjulhuset och igen efter. Efter denna punkt ses att bilarnas C_D -värde skiftar ordning. Här ses att för de lägre interna avstånden återfinns ett större motstånd. Efter detta skifte ses att värdena rör sig parallellt med varandra fram till basen, där de längre interna avstånden har något högre motstånd. Sammantaget ses den största skillnaden bakom hjulhuset och i basen, där olika avstånd har olika positiva effekter. Då 2,33 meter upplever det mest gynnsamma motståndet, verkar det som att en avvägning mellan högre motstånd i basen och högre motstånd efter främre hjulparet är att föredra. Effekten som ses efter hjulparet är, som nämns i tidigare avsnitt, svår att analysera på grund av komplexa flöden och geometrier. I den här punkten ses även luftens acceleration över vindrutan, vilket gör det svårt att avgöra vad som har störst inverkan på luftmotståndet. Dock kan det konstateras att i just detta avseende är det fördelaktigt att ligga långt efter fordonet framför.

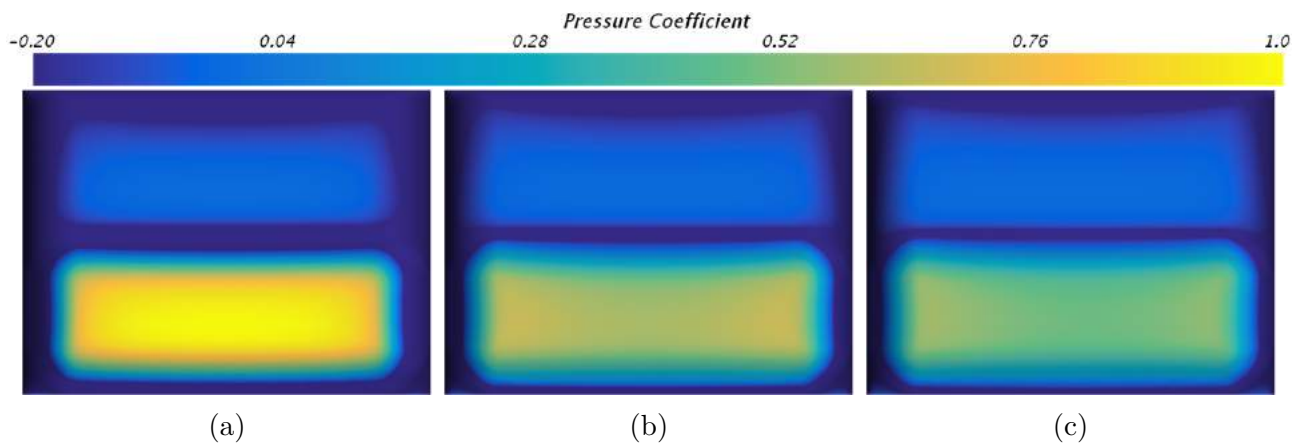
Figur 4.35 visas det ackumulerade C_D -värdet över bilarna i kolonnen med 5 meter internt avstånd. Figurerna för luftmotståndskoefficienten över bilarna vid de kortare avstånden skiljer sig marginellt från 5 meter, varför dessa återfinns i Appendix A. I figuren ses att större förluster än tidigare återfinns i fronten på de följande bilarna, vilket även är fallet för basen för samtliga bilar.



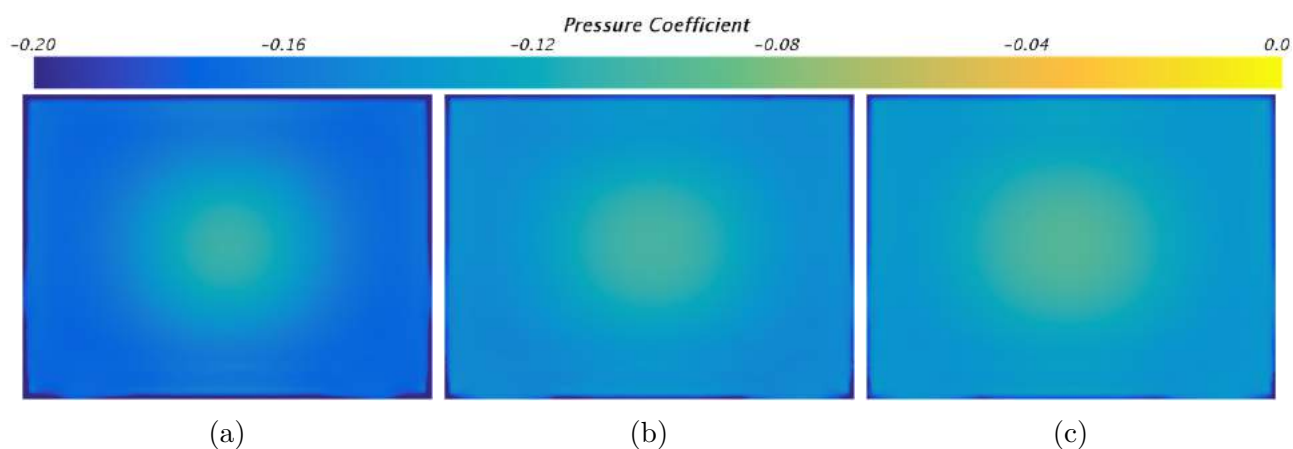
Figur 4.35: Den ackumulerade luftmotståndskoefficienten längs bilen som funktion av sträckan då de interna avstånden är 5 meter. De största bidragen till motståndet återfinns i fronten och basen. Notera att luftmotståndskoefficienten längs bilen för 2,33, 3 och 5 meter enbart subtilt skiljer sig åt. Figurerna för 2,33 och 3 meter återfinns i Appendix A.

I figur 4.36 och 4.37 presenteras front- respektive bastrycket för de tre bilarna när de inbördes avstånden är 5 meter. Jämfört med tidigare körningar framträder de två bakomvarande bilarnas front tydligare. Denna observation förutsades i avsnitt 4.2.4 och resonemanget är identiskt. Större förändringar ses i bastrycket. Precis som tidigare är trycket centrerat på bilens bas, för att minska mot bilens kanter. Det ses att trycket på den första bilen är lägre än de två bakomvarande, som liknar varandra.

I figur 4.35 framgår att den sista bilen i kolonnen har något högre bastryck än den tidigare, något som inte observerats tidigare då bilen i mitten alltid upplevt högst bastryck. Bastrycket, som beskrivs tidigare, beror dels av om någon bil är placerad i nära anslutning till bilens bas

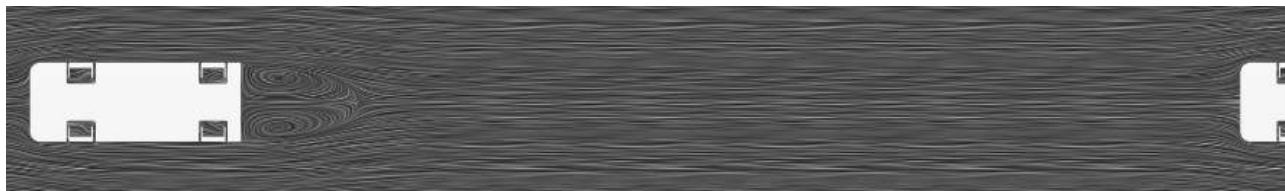


Figur 4.36: Frontaltrycket på bil 1-(a), 2-(b), 3-(c). I figuren kan ses att frontaltrycket sjunker för de bakomliggande bilarna och att trycket är högst i grillen där luften först träffar bilen.



Figur 4.37: Bastycket på bil 1-(a), 2-(b), 3-(c) med 5 meter avstånd. Det kan ses att bilen i mitten har högst tryck på basen, för att sjunka för de yttre bilarna. Vidare ses också att den första bilen har ett lägre bastyck än den tredje i kolonnen.

samt hastigheten hos fluiden runt bilen. I figur 4.38 visas strömlinjerna sett ovanifrån bilarna. Det syns att fluiden efter den första bilen hinner återfå sitt friströmsutseende, inga virvlar syns och fluiden följer sina raka strömlinjer. Bilarnas inbördes avstånd kan därför antas vara för stort för att det bakomvarande fordonet inte ska ge gynnsamma effekter på basen. Detta är tydligt i bastycket då bil 3 upplever högre tryck än den föregående bilen, vilket tyder på att effekten av att ha en bil i vaken vid dessa avstånd är helt frånvarande. Det ses även att den första bilen upplever ett nästan identisk C_D som referensbilen.



Figur 4.38: Strömlinjer mellan de två ledande fordonen med 5 meter internt avstånd sett ovanifrån. Vid ungefär en billängd efter det ledande fordonet är strömlinjerna parallella med friströms hastigheten.

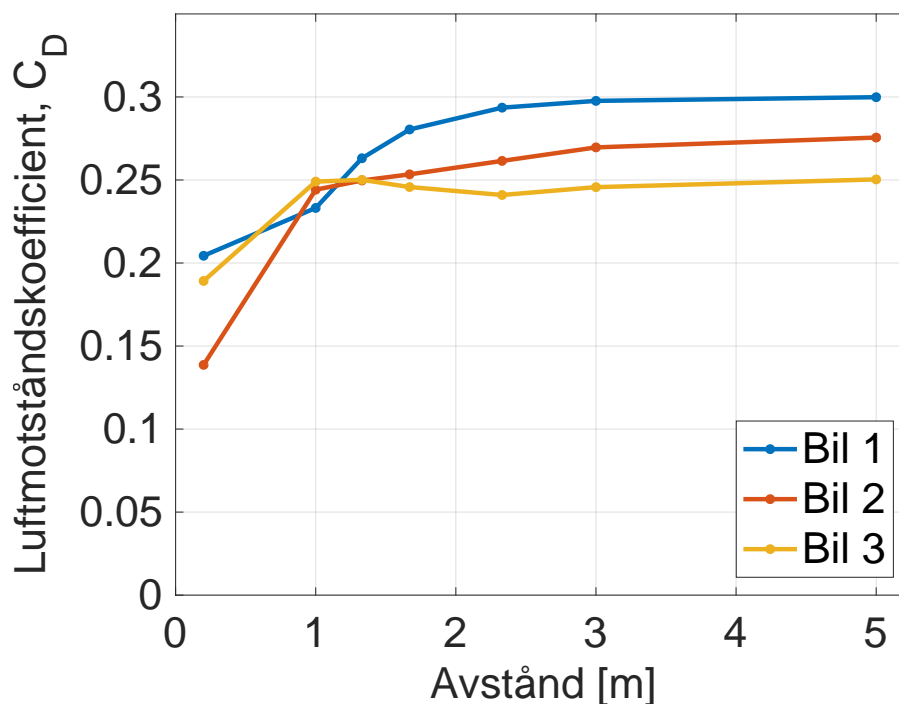
Samma tendenser som ses på 5 meter kan ses då de interna avstånden är 2,33 och 3 meter, med endast små skillnader. Fluiden har inte lika tydligt återgått till sitt friströmsutseende, vilket bör resultera i något högre bastyck. För verifiering av strömlinjerna och bastycket för 2,33 samt 3 meter återfinns i Appendix A.

4.2.6 Sammanfattning av kolonnkörning

En genomgående trend genom hela avsnittet är att det genomsnittliga C_D -värdet ökar för ökande avstånd. Detta presenterades redan i avsnitt 4.2 där det ses en exponentiellt fallande trend av $C_D^{\%}$ för ökande avstånd. För det kortaste avståndet på 0,2 meter mellan bilarna syns stor skillnad i luftmotstånd jämfört med referensbilen. Här syns att den andra bilen i kolonnen upplevde mest gynnsamma förhållanden. Detta till följd av kombinationen att ha ett bil framför sig som bromsar upp luften i vaken och skapar ett lågtryck, samt att ha en bil i vaken som höjer trycket. För 1 meter avstånd sågs detta skifta, till att första bilen upplever lägst luftmotstånd. Detta kan förklaras med att lågtrycket som skapas över vindrutan på första bilen sänker trycket, vilket här ger tillräckligt stor effekt för att bilen skall uppleva lägst motstånd.

Då avståndet ökar mer ses en trend som håller i sig. Första gången detta observeras är då avståndet är 1,33 meter. Det ses att den första bilen upplever högst motstånd, för att minska bakåt i kolonnen. Detta förklaras med att de positiva effekter som den ledande bilen erhåller vid kortare avstånd inte längre har lika stor betydelse. Det ses att effekten av att ha ett fordon i sin vak, som höjer trycket, inte ger lika stora effekter som att ha fordon framför sig, som sänker hastigheten på luften runt bilen. Denna trend ses tydligare för ökande avstånd, upp till 5 meter.

I figur 4.39 presenteras C_D -värdet för de individuella bilarna för samtliga avstånd. Här ses återigen hur de korta interna avståndet påverkar luftmotståndet mest, samt hur motståndet går mot referensbilen ($C_D = 0,299$) då avståndet ökar, vilket är tydligast på den första bilen i kolonnen.



Figur 4.39: C_D -värdet för samtliga bilar över samtliga avstånd. Det ses hur de olika bilarna vid olika avstånd i kolonnen upplever olika gynnsamma förhållanden.

I figuren ses även det överraskande resultatet då motståndet för den tredje bilen inte ökar med ökande avstånd, utan når ett lägsta värde vid 2,33 meter. Detta resultat tillskrivs luftens komplexa beteende bakom det främre hjulhuset och förklaras inte djupare. Att ingen bil genom alla avstånd hade högst eller lägst motstånd är en stark indikator på att de effekter som påverkar luftflödet inte förändras på samma sätt då avståndet ändras, något som beskrivs tidigare. Det

ses dock att den första bilen, för alla avstånd utom 1 meter, haft högst luftmotstånd. Detta kan förklaras med att fronttrycket, som tillför en stor del av luftmotståndet, över alla avstånd är högst. Det som ses vid 1 meter för denna bil förklaras tidigare med att de negativa bidrag till C_D -värdet som återfinns vid främre hjulhus påverkar tillräckligt mycket för att bilen ska uppleva mest gynnsamt resultat.

I en tidigare studie gjort vid Coventry University [15], som nämndes kort i avsnitt 1.1, gjordes ett test som är snarlikt ett av de test som presenteras i denna studie. I Coventrys studie presenterades resultat för olika vinklar på taket mot basen. I ett av resultaten visas 3 bilar med 0° vinkel på samtliga bilars tak, vilket är samma som använts i denna studie. Skillnader mellan studierna är hastighet på inloppet (40 m/s mot 30 m/s), avstånd (0,25 meter mot 0,2 meter), metod (vindtunnel mot numerisk analys) samt att vid Coventry användes en Windsormodell utan hjul. Jämförelse av C_D -värden ses i tabell 4.2.

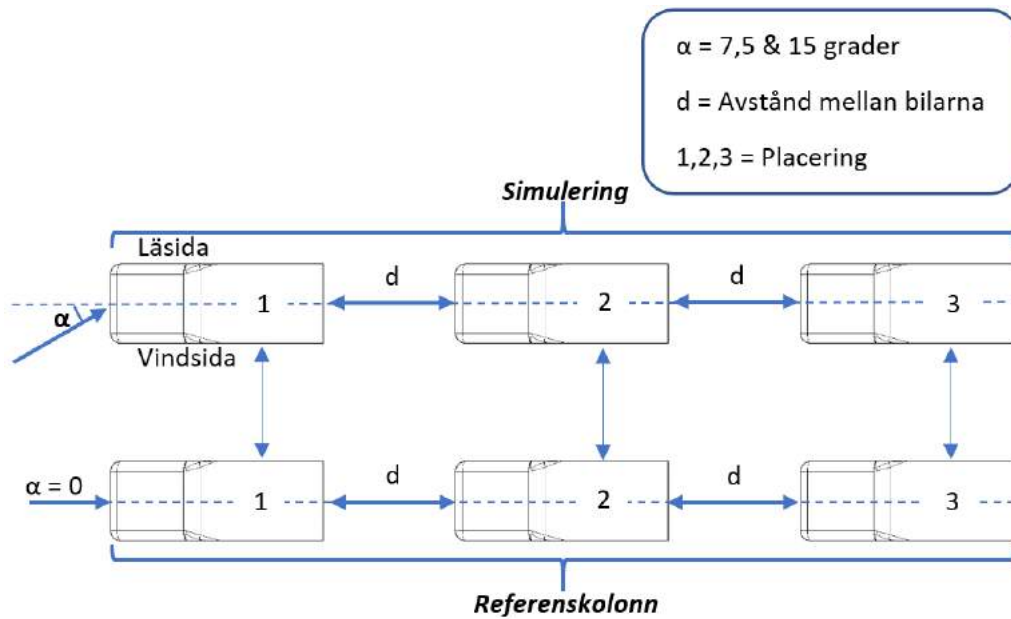
Tabell 4.2: Skillnaden i resultat från Coventry University och denna studie. Det ses stora förändringar vid kolonnkörning. För en ensam bil skiljer värdet marginellt.

Resultat	Coventry University	Denna studie
C_{Dref}	0,263	0,299
$C_D^{\%}$ bil 1	-9,4	-31,8
$C_D^{\%}$ bil 2	-4,1	53,7
$C_D^{\%}$ bil 3	2,1	-36,8
$C_D^{\%}$ - Medelvärde	-11,4	-40,133

För referensbilen skiljer sig C_D -värdet med 0,036 mellan studierna. Detta kan förmodligen förklaras med att olika modeller används. Om skillnad i hastighet påverkar är svårt att avgöra utan vidare efterforskning då det inte är säkert att Reynolds-talet i det här fallet är tillräckligt högt för att inte påverka luftmotståndskoefficienten [11]. Sammantaget verkar det som att hjul och hjulhus ger ett negativt bidrag till C_D -värdet, då bilen är fristående. Förändringarna som ses vid kolonnkörning är svårare att tillskriva till någon av skillnaderna mellan fallen, då samtliga förmodligen ger någon effekt. Trenden som ses är mer likt vad som observeras vid 1 meter i avsnitt 4.2.2, med sjunkande $C_D^{\%}$ bakåt i kolonnen. Det ses även att värdena som uppnås vid Coventry är betydligt sämre än i denna studie. Förmodligen spelar de ovannämnda faktorer in. Den ökade hastigheten gör att strömlinjerna mellan bilarna förmodligen förändras, vilket även sker då avståndet ökar. Utan hjul fås även ett jämnare flöde under bilen, vilket kan påverka bilarna bakåt i kolonnen. Detta gör en närmare jämförelse mellan fallen svår.

4.3 Sidvinds påverkan på kolonnkörning

I kapitlet presenteras och diskuteras resultatet från kolonnkörningen med sidvind, test 9 - 14, se figur 3.1 i kapitel 3. Uppställningarna baseras på test 3, 4 och 5 och har en pålagd sidvind med $7,5^\circ$ respektive 15° attackvinkel på friströmmen. Då inget test görs för enbart en bil med pålagd sidvind kommer test 3, 4 och 5 vara referenssimuleringar. C_D -värdena för respektive bil jämförs alltså med motsvarande bil i referenskolonnen, se figur 4.40. De inbördes avstånden och attackvinkeln för respektive test presenteras i figur 4.5 och tabell 4.3.



Figur 4.40: Schematisk bild över hur tester med sidvind jämförs med tester utan sidvind. Bilden beskriver hur vardera placering i sidvindskolonnen jämförs med motsvarande placering i referenskolonnen. Figuren klargör också vilken sida av bilen som är lä- respektive vindsida. Flödets infallsvinkel kännetecknas av α .

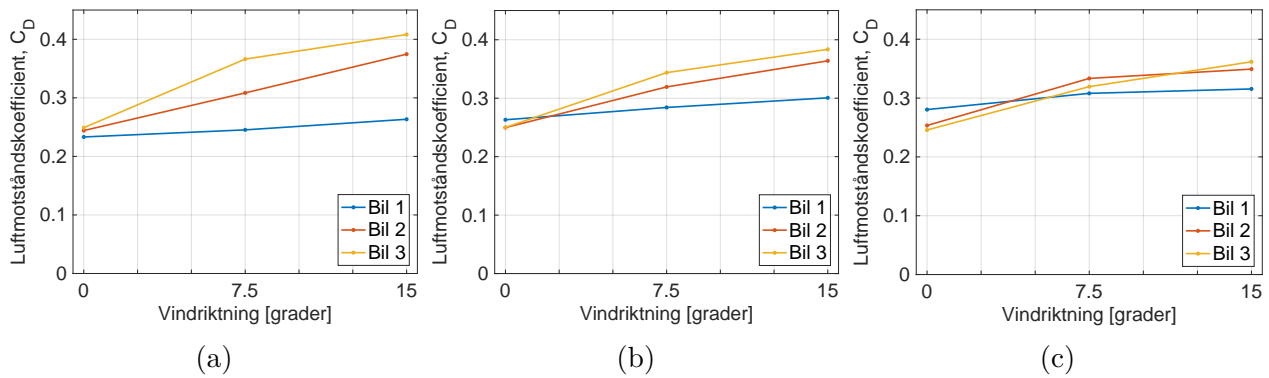
4.3.1 Analys av C_D -värden

I tabell 4.3 presenteras samtliga C_D -värden för kolonnerna med sidvind och för referenskolonnerna. Den övergripande trenden som observeras är att C_D -värdet för bil 1 är lägst för att sedan öka bakåt i kolonnen.

Tabell 4.3: C_D för respektive bil och medelvärde för respektive körning.

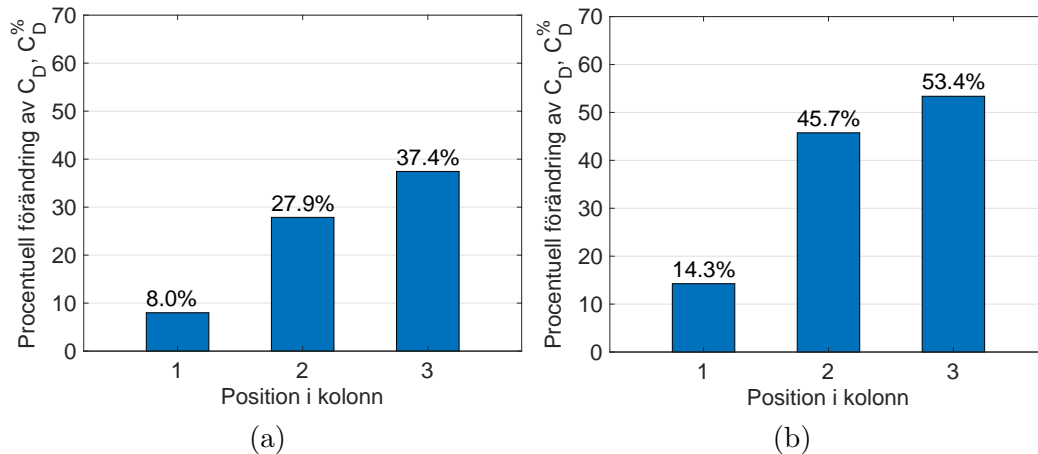
Simulering	C_D - Bil 1	C_D - Bil 2	C_D - Bil 3	C_D - Medelvärde
Test 3 - 1 m	0,233	0,244	0,249	0,242
Test 4 - 1,33 m	0,263	0,250	0,250	0,254
Test 5 - 1,67 m	0,280	0,253	0,246	0,260
Test 9 - 1 m 7,5°	0,245	0,308	0,366	0,307
Test 10 - 1 m 15°	0,263	0,375	0,408	0,349
Test 11 - 1,33 m 7,5°	0,284	0,319	0,344	0,316
Test 12 - 1,33 m 15°	0,301	0,364	0,384	0,349
Test 13 - 1,67 m 7,5°	0,308	0,333	0,319	0,320
Test 14 - 1,67 m 15°	0,316	0,349	0,362	0,342

I figur 4.41 visualiseras hur C_D ändras beroende på friströmmens attackvinkel. Den vänstra bilden gäller för testen med det inbördes avståndet 1 meter mellan bilarna, den mellersta bilden för 1,33 meter och bilden till höger 1,67 meter. Med ökad attackvinkel på friströmmen blir C_D -värdet sämre för alla bilar, särskilt för de två bakomvarande bilarna med kortare avstånd. Detta gör att medelvärdet för respektive kolonn för ett fixt avstånd ökar med attackvinkeln på sidvinden. Med längre avstånd mellan bilarna blir sidvindens påverkan mindre. I figur 4.41c ses att motståndet för de tre bilarna är snarlika. Den mest gynnsamma positionen med sidvind är bil 1. Den minst gynnsamma positionen med sidvind är i fem av sex test bil 3. I fallet med 7,5° sidvind och avståndet 1,67 meter (test 13) är bil 2 den minst gynnsamma positionen. För testerna utan sidvind varierar den mest gynnsamma positionen, se avsnitt 4.2 för analys.



Figur 4.41: Förändringen av luftmotståndskoefficienten C_D beroende på attackvinkeln av friströmmen. De interna avstånden mellan vardera bil är a) 1 meter, b) 1,33 meter och c) 1,67 meter.

Vidare jämförs C_D -värdena för de kolonner med sidvind med respektive referenskolonn. Här är alltså bil 1 med sidvind jämförd med bil 1 utan sidvind för det givna avståndet. I figur 4.42 representerar staplarna den procentuella skillnaden av C_D mellan respektive bil i sidvindskolonnen och referenskolonn, vilket även här benämns $C_D^{\%}$. Stapeldiagrammet i figur 4.42a hör till test 11 och figur 4.42b hör till test 12. Samtliga figurer visas i Appendix B. I alla kolonner med sidvind ses att $C_D^{\%}$ är positiv, vilket innebär ett högre motstånd upplevs än på referensbilen. Vidare observeras att förhållandena för bilarna försämras bakåt i kolonnen. Den procentuella ökningen för den ledande bilen ligger mellan 1-14%, bil 2 på 26-53% och bil 3 37-64%. För referenskolonnerna är den mest gynnsamma placeringen i kolonnen avståndsberoende. Detta förändras vid sidvind, där den övergripande trenden är att den första bilen generellt har lägst C_D -värde.



Figur 4.42: Procentuella förändringen av C_D mot referenskolonnen för respektive bil. Testen gäller för internt intervall 1,33 meter. Positionen som ger minst förlust är det ledande fordonet i kolonnen. a) Sidvind 7,5 grader. b) Sidvind 15 grader.

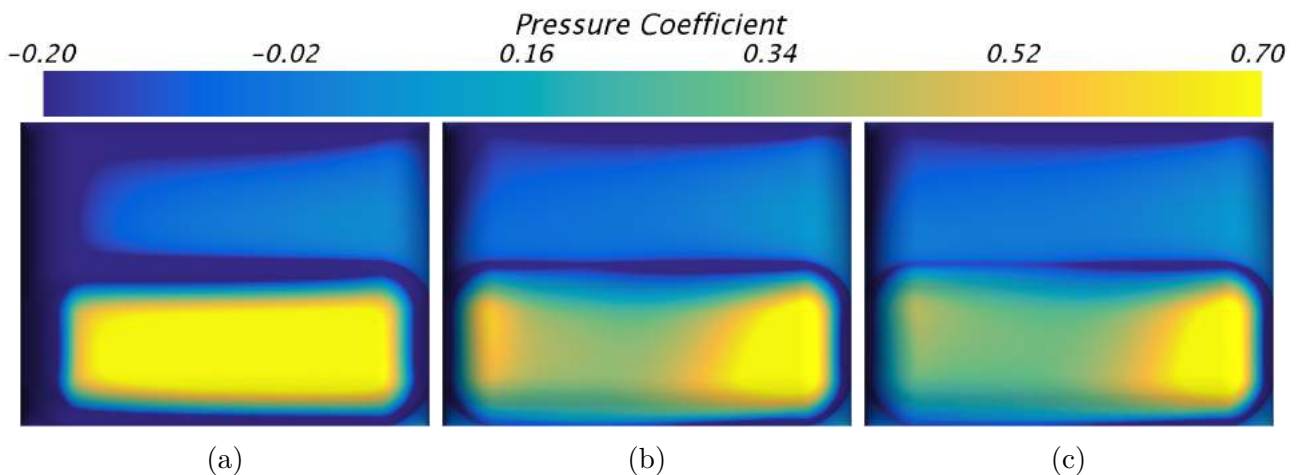
4.3.2 Tryckfördelning i kolonnen

I tabell 4.3 kan utläsas att det ledande fordonet i kolonnerna med sidvind har lägst C_D -värde. Generellt observeras att luftmotståndet ökar för de efterföljande bilarna. Denna iakttagelse skiljer sig mot resultaten vid kolonnkörning utan sidvind för avstånden 1,33 och 1,67 meter, där C_D -värdet är högst för den första bilen i kolonnen. Allmänt minskar C_D -värdena för bil 2 och 3. I figur 4.41c kan observeras att test 13 är ett undantag, då C_D -värdet ökar till andra bilen, för att sedan sjunka till sista. En möjlig förklaring skulle kunna ges genom att analysera

kolonnernas front- och bastryck i kombination med det ackumulerade C_D -värdet längst bilarna som funktion av sträckan.

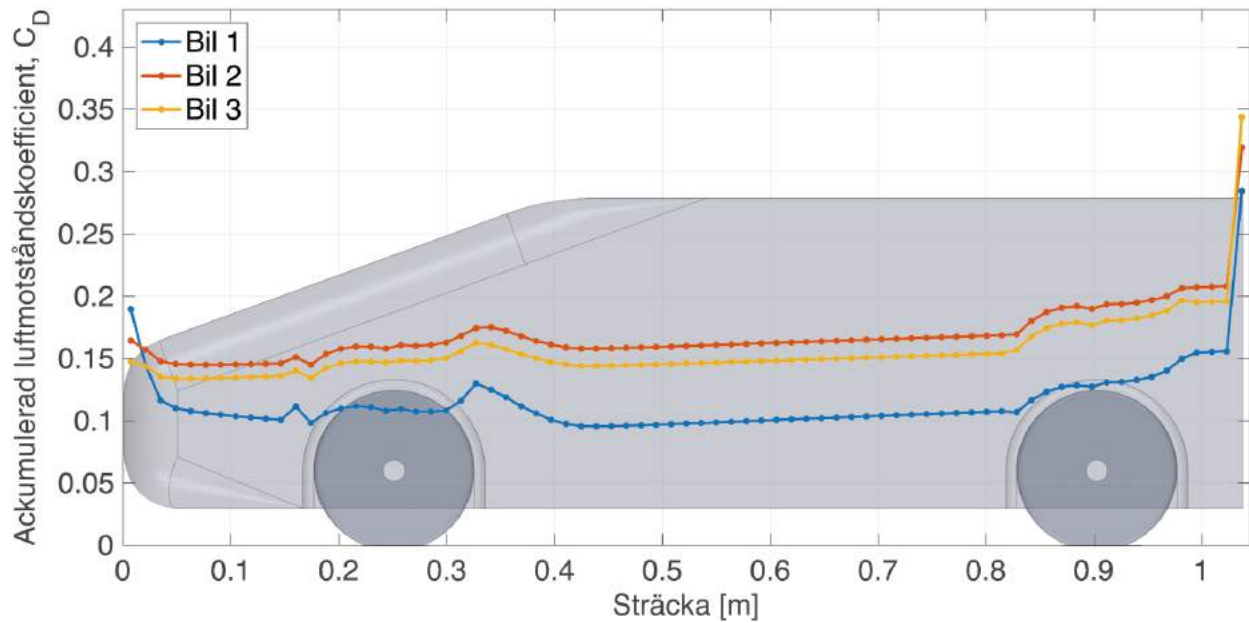
Avsnittet berör fyra delar. Den första innehåller frontrycket för $7,5^\circ$ sidvind och avståndet 1,33 meter. Den andra delen beskriver frontrycket för kolonnen med 15° sidvind och avståndet 1,33 meter. Därefter presenteras bastrycket för kolonnen med $7,5^\circ$ sidvind och 1,33 meter avstånd. Med varierande avstånd för konstant attackvinkel ses inga större förändringar över tryckfördelningen på fronten. Däremot, då attackvinkel förändras fås en annan fördelning av frontrycket. Då tryckfördelningen med konstant attackvinkel är snarlik presenteras endast ett av dessa resultat, då liknande resonemang kan användas för samtliga. Dessa resultat återfinns i Appendix B. Den sista delen diskuterar undantagsfallet (test 13), där C_D -värdet inte följer samma mönster som övriga kolonner.

I figur 4.43 visas frontrycket för test 10, där det ledande bilen är till vänster och den sista bilen i kolonnen är till höger. Notera att tryckskalan skiljer sig med de tidigare presenterade frontryck. Figuren visar att den första bilen upplever högst tryck över fronten, för att sjunka för de efterföljande fordonen. Högtrycksområdet på grillen förflyttas ut mot vindsidan (höger i figur) för bil 2 och 3, vilket ses i figur 4.43b och 4.43c. På läsidan av grillen för de bakre bilarna ses ett litet område med högre tryck. Liknande ansamlingar ses för bakomvarande fordonen vid kolonnkörning utan sidvind. Utseendet av tryckfördelningen över fronten förklaras mer ingående i avsnitt 4.3.3, då flödet runt bilarna presenteras. Jämfört med kolonnkörningar utan sidvind, där tryckfördelningen över fronten är symmetrisk framgår i figuren att fördelningen är asymmetrisk, vilket är en följd av pålagd sidvind. Detta är ett resultat av att luften som kolliderar med fronten har en attackvinkel, vilket inte är fallet för kolonnkörning utan sidvind. I fallet utan sidvind flödar luften parallellt med färdriktningen och luften kolliderar vinkelrätt mot fronten.



Figur 4.43: Frontrycket på bil 1-(a), 2-(b), 3-(c) med 1,33 meter avstånd och sidvind $7,5^\circ$. Trycket över grillen är högst för den ledande bilen, därefter sjunker trycket för det nästkommande bilarna i kolonnen. Det lägsta trycket återfinns för den främre bilen, för att öka bakåt i kolonnen.

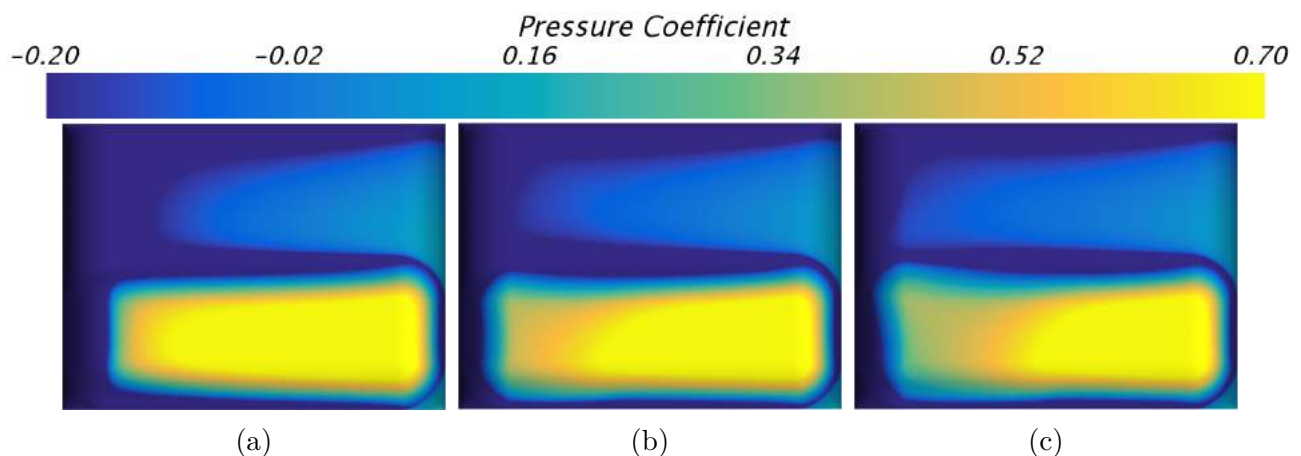
I figur 4.44 presenteras det ackumulerade C_D -värdet över bilarna som funktion av sträckan. Den första punkten i figuren är när luften kolliderar med grillen. Därefter sjunker C_D -värdet, då luften accelererar över motorhuven och skapar ett lågtrycksområde, vilket ses i figur 4.43. I figur 4.44 framgår att de bakre bilarna har ett högre tryck över vindrutan än det ledande fordonet, då C_D -värdet inte förändras lika mycket över motorhuven. Tryckfördelningen över vindrutan är asymmetrisk och figur 4.43a visar att lägst tryck finns mot läsidan. En möjlig förklaring till det asymmetriska lågtrycksområdet är att luften accelererar runt fronten mot läsidan till följd av attackvinkeln på inflödet.



Figur 4.44: Det ackumulerade C_D -värdet som funktion av sträckan för sidvindssimulering $7,5^\circ$ och avstånd 1,33 meter. Det största förändringarna av C_D -värdet se över motorhuv och vid slutet av bilen då separation sker.

Det ackumulerade C_D -värdena för alla sidvindssimuleringar är snarlika och återfinns i Appendix B. Med ökande avstånd förändras C_D -värdet mer för de efterföljande bilarna över motorhuv, vilket kan bero på att flödet mellan bilarna mer liknar friströmsflödet (se figur B.3-B.6 i Appendix B). Liknande resultat presenteras tidigare, vid kolonnkörning utan sidvind. Vidare ses i figur 4.44 att det ackumulerade C_D -värdet varierar över motorhuv och bakre hjulhus. Även detta liknar vad som presenteras tidigare och diskuteras inte mer. Det kan ses att vid främre hjulhus tar ökningen och minskningen av C_D ut varandra, medan närmare bilens bas fås en relativt stor ökning av C_D -värdet. I övriga kolonner med $7,5^\circ$ attackvinkel (1 och 1,67 meter avstånd) observeras liknande tryckmönster och trender på fronten av bilen. Dessa resultat följer ett liknande resonemang som ovan, varför de endast återfinns i Appendix B, figur B.7 och B.8.

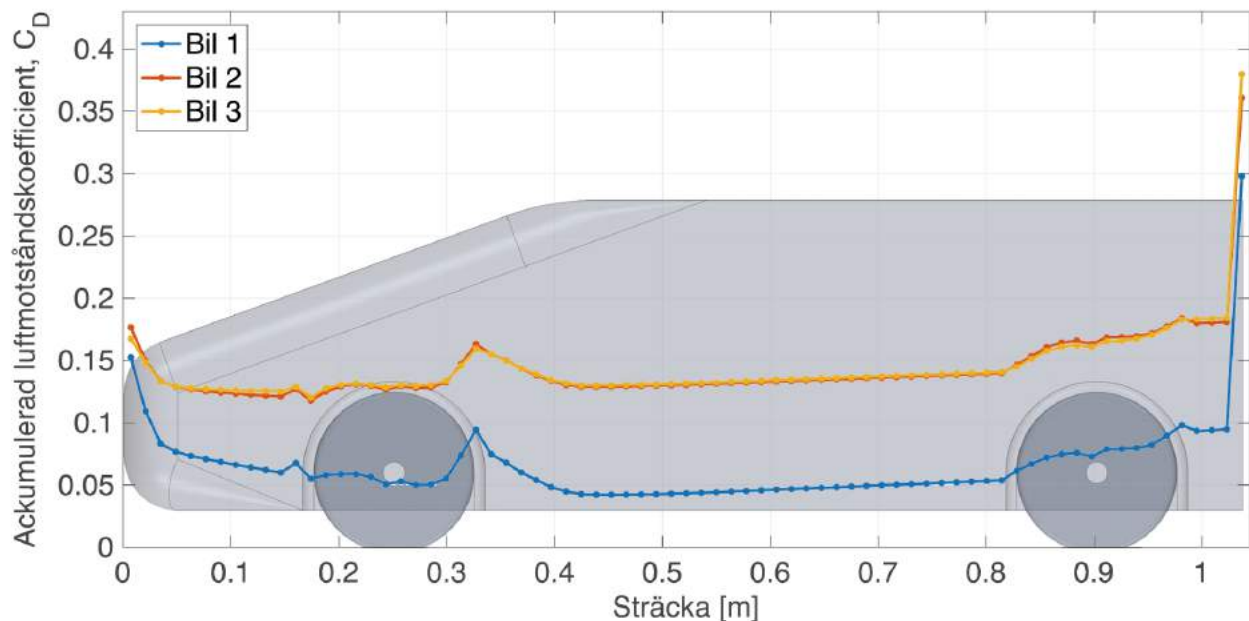
Frontrycket för kolonnen med 15° och avstånd 1,33 meter visas i figur 4.45. I figuren ses att trycket på grillen är högst för bilen i mitten och lägst för den främre bilen i kolonnen. Precis som för kolonnen med $7,5^\circ$ sidvind minskar området med högt tryck över fronten mot vindsidan bakåt i kolonnen.



Figur 4.45: Frontrycket på bil 1-(a), 2-(b), 3-(c) med 1,33 meter avstånd och sidvind 15° . Högst tryck över grillen har den mittersta bilen och lägst tryck över grillen har den främre bilen. Däremot ses lägst tryck över vindrutan för första bilen, för att öka bakåt i kolonnen.

I figur 4.46 presenteras det ackumulerade C_D -värdet över bilarna i kolonnen med 1,33 meter internt avstånd och 15° sidvind. Figuren visar att C_D -värdet är störst för bil 2 och lägst för den ledande bilen vid luftens kollision med grillen. Det ackumulerade C_D -värdet för övriga kolonner med 15° är liknande i utseendet, varför enbart avståndet 1,33 meter presenteras. I Appendix B återfinns figur B.5 och B.6 för det ackumulerade C_D -värdet vid sidvind 15° med 1 och 1,67 meter avstånd. Från dessa observeras att trycket över grillen för bil 3 med ökande avstånd närmar sig trycket för bil 2. För kortare avstånd ses istället liknande C_D -värden för den första och tredje bilen. Det ses även i figuren att C_D -värdet sjunker över motorhuvnen. Vid jämförelse av figur 4.44 och 4.46 ses att C_D -värdet minskar vid övergången mellan grillen och vindrutan för bil 2 och 3 vid ökande sidvind. En möjlig förklaring är att den ökade sidvinden bidrar till att mer luft strömmar in mellan bilarna och träffar den efterföljande bilens front.

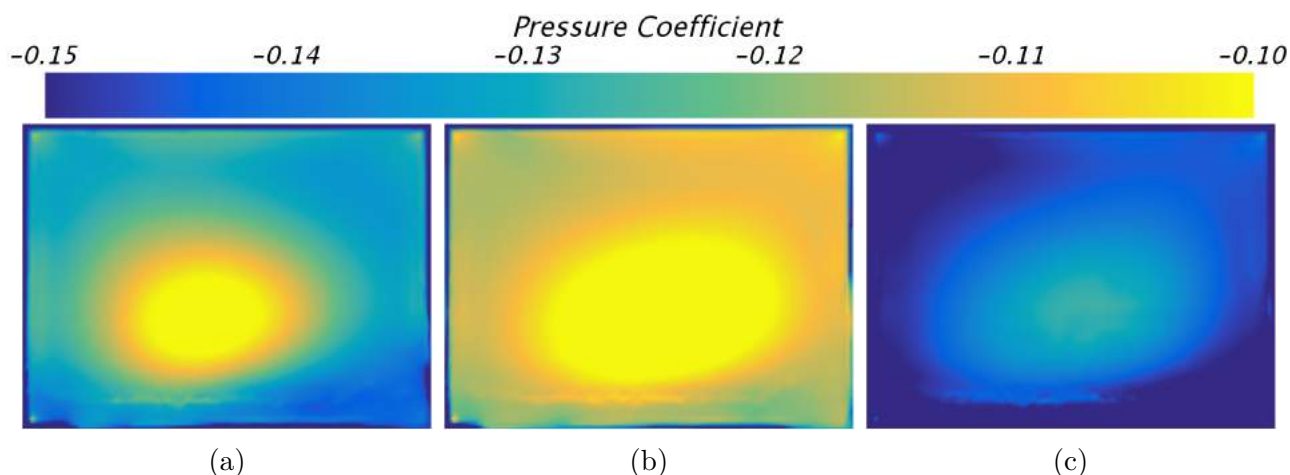
Vidare observeras i figur 4.44 och 4.46 att det ackumulerade C_D -värdena över vindrutan är större för 15° än $7,5^\circ$. Ändringen av det ackumulerade C_D -värdena kan förklaras med figur 4.45. I figuren ses att det ledande fordonet har lägst tryck över vindrutan, för att öka till bakomvarande bilar. Detta lågtrycksområde är till följd av att luften accelererar i område. Det ses att området med lågt tryck på fronten blir större då attackvinkeln ökar. Störst skillnader mellan de två attackvinklarna är att 15° sidvind har ett bredare område runt grillen och mot läsidan där trycket är lägre (se figur 4.43 och 4.45). Denna observation kan förklara varför förändringen av C_D -värdena är större än för kolonnkörning med $7,5^\circ$ sidvind.



Figur 4.46: Det ackumulerade C_D -värdet över bilarna som funktion av sträckan för sidvindssimulering 15° och avstånd 1,33 meter. Det största förändringarna av C_D -värdet ses vid fronten och vid slutet av bilen då separation sker.

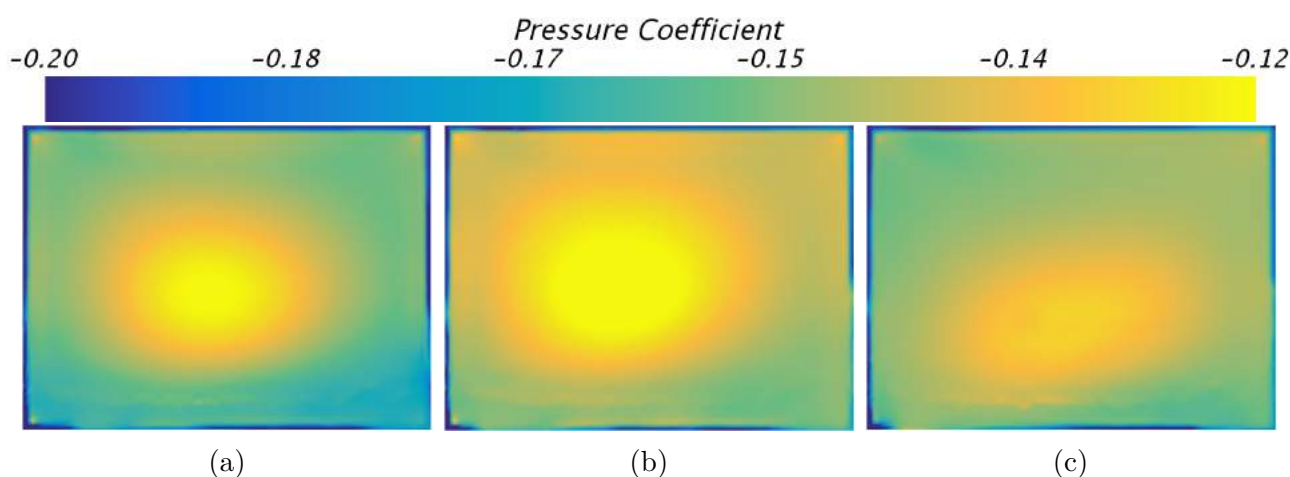
I figur 4.47 visas bastrycket för de tre bilarna i kolonnen med 1,33 meter och $7,5^\circ$ sidvind. Notera att tryckskalan skiljer sig från de tidigare presenterade bastrycken. I figuren ses att bastrycket är högst för fordonet i mitten, vilket ses för samtliga kolonner med sidvind. Dock varierar vilket bastryck som är lägst av bil 1 och 3. I figur 4.47 ses att trycket är lägst för den sista bilen. Tryckmönstret på basen är ett cirkelformat område med högre tryck som är belägen nära basens mitt. Ut mot kanterna sjunker trycket. Detta utseende är snarlikt vad som ses utan sidvind och förklaras enligt resonemanget som presenteras i avsnitt 4.2.2, där det beskrivs att avståndet mellan bilarna är tillräckligt stor för att inte nämnvärt påverka utseendet av vaken. Däremot ses att högtrycksområdet är förskjutet mot vindsidan (vänster i figur) av basen

och lite förflyttad mot bilens underkant. Tryckmönstret förklaras med hjälp av strömlinjernas utseende, vilket beskrivs i avsnitt 4.3.3.



Figur 4.47: Bastrycket på bil 1-(a), 2-(b), 3-(c) med 1,33 meter avstånd och sidvind $7,5^\circ$. Det kan ses att bilen i mitten har högst tryck på basen, för att sjunka för de yttre bilarna. Vidare ses också att den tredje bilen har ett lägre bastryck än den första i kolonnen.

I tabell 4.3 ses att sidvindssimuleringen $7,5^\circ$ med avstånd 1,67 meter inte följer samma trender som det resterande körningarna av sidvind. Här ses istället att C_D -värdet ökar mellan bil 1 och 2 för att sedan sjunka mellan bil 2 och 3. En möjlig förklararing ses genom att jämföra frontrycket för bilarna som utsätts för en pålagd sidvind med $7,5^\circ$. Från frontrycken (figur 4.43 och Appendix B) ses att tryckmönster är liknande för avstånden 1-1,67 meter. Bil 1 har högst tryck över grillen och lägst tryck över vindrutan för att minska respektive öka bakåt i kolonnen. Däremot följer inte alla bastryck för kolonnkörning med sidvind $7,5^\circ$ samma trend. För 1 och 1,33 meter ses att den andra bilen har högst bastryck och den sista bilen har lägst bastryck. Istället är bastrycket lägst för den främre bilen då avståndet mellan bilarna är 1,67 meter. Bastrycket för $7,5^\circ$ med avstånd 1,67 meter presenteras i figur 4.48. Denna skillnad i bastryck medför att tryckskillnaden blir större över bil 2 än över bil 3, vilket inte är fallet när avståndet mellan bilarna är 1 meter och 1,33 meter.



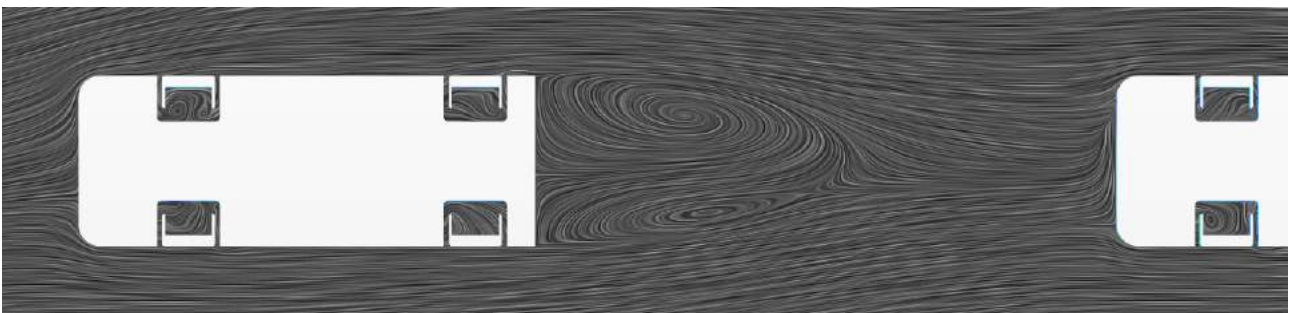
Figur 4.48: Bastrycket på bil 1-(a), 2-(b), 3-(c) med 1,67 meters avstånd och sidvind $7,5^\circ$. Det kan ses att bilen i mitten har högst tryck på basen, för att sjunka för de yttre bilarna. Vidare ses också att den första bilen har lägre bastryck än den sista bilen i kolonnen.

I avsnittet observeras att luftmotståndet i fronten på bil 1 är lägre då de upplever en sidvind. C_D -värdet vid grillen sjunker med ökad attackvinkel. En möjlig förklaring till C_D -värdets minskning är att luften vid avståndsimuleringarna träffar grillen vinkelrätt medan en pålagd sidvind medför att luften sveps iväg innan kollision med grillen. En möjlig motivering till att luftmotståndet ökar bakåt i kolonnen är att luften över den första bilen har en högre acceleration över fronten än bil 2 och 3. Detta bidrar till ett större lågtrycksområde som drar bilen framåt. Luften för första bilen kommer enbart in från vindsidan, medan för de bakomliggande bilarna kommer luften in från bägge sidor. Detta bromsar upp luften som kommer in från vindsidan. Alltså blir lågtrycksområdet över vindrutan mindre påtagligt för bil 2 och 3.

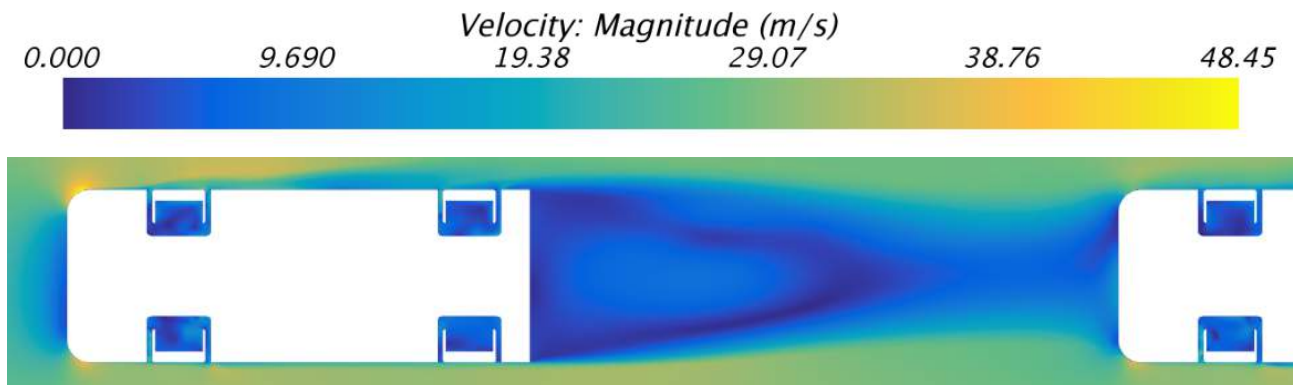
4.3.3 Flödeskaraktäristik

Nedanstående analys berör främst test 11, där avståndet mellan bilarna är 1,33 meter med $7,5^\circ$ sidvind. Liknande trender återfinns för övriga avstånd och infallsvinklar, vilket gör att liknande resonemang kan appliceras på övriga simuleringar. Figurer för dessa återfinns Appendix B.

I figur 4.49 och 4.50 presenteras strömlinjerna och hastighetsfälten mellan bil 1 och bil 2 ovanifrån sett. Frontrycken som presenteras i avsnitt 4.3.2 kan förklaras genom studera luftens flöde i fordonens vakar. I figur 4.50 ses en hastighetsökning kring den ledande bilens front. När luften når bilens bas kommer bilens lågtrycksområde interagera med friströmstrycket och sugas in framför den bakomvarande bilen, vilket ses i figur 4.49. Detta resulterar i en skev tryckfördelning som ses i figur 4.45. Då luften rör sig längre bak i systemet minskar energin i flödet. Detta gör att en större del av flödet påverkas av lågtrycksområdet och därmed fås en större ansamling av luft framför respektive bil. En större ansamling av luft leder till en större tryckkraft på bilen. Detta ses i figur 4.49 där luften, efter att ha passerat de båda vakarna, strömmar mot bilarnas vindsida. Det noteras även i strömlinjerna att flödet vid den första bilens front finner en mjukare övergång från stationärt läge till friströmsflödet bredvid bilen. Detta är fördelaktigt då en mindre mängd energi går till att retardera det anströmmande flödet. Denna kombination resulterar i att C_D ökar för de två bakomvarande bilarna och minskar för den ledande bilen, vilket stöder trenden.



Figur 4.49: Toppvy på strömlinjerna där avståndet mellan bilarna är 1,33 meter och infallsvinkeln är $7,5$ grader. Figuren visar hur luften ändrar färdriktningen efter att den har passerat första och andra vakarna. Det ses dessutom att strömlinjerna finner en mjukare övergång i den första bilens front jämfört med de två bakomvarande bilar.

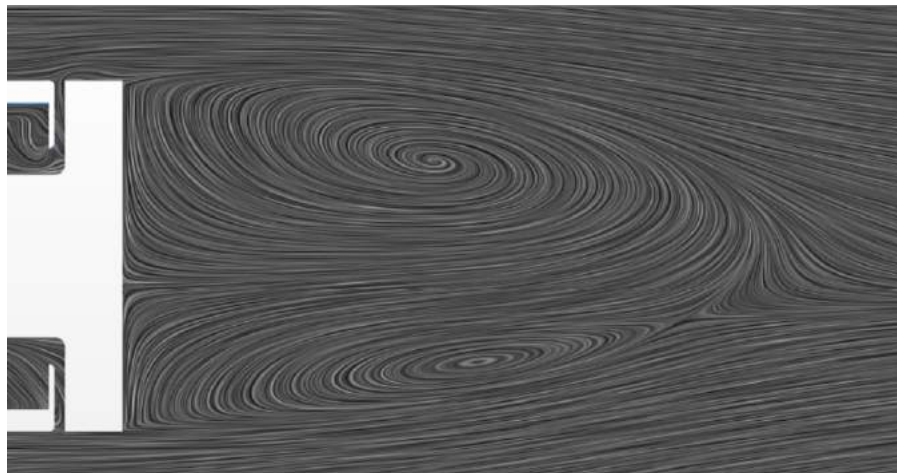


Figur 4.50: Toppvy på hastighetsfördelningen där avståndet mellan bilarna är 1,33 meter och infallsvinkeln är 7,5 grader. I ses den lokala accelerationen vid den första bilens front.

Anledningen till att bastrycken inte längre är centrerat som för kolonnkörningar utan sidvind kan förklaras i vakarnas utformning. I figur 4.51b ses att virvlarna i vaken inte längre är symmetriska, som ses i avsnitt 4.2.3. En möjlig förklaring för vakarnas asymmetriska utseende är att höghastighetsflödet från vindsidan trycker hela vaken mot bilens läsidan. Det observeras även att mer luft sugs in från bilens läsida jämfört med bilens vindsida vilket ses i figur 4.49. Detta beror på att friströmsflödet i figur 4.50, på vindsidan erhåller mer kinetisk energi än vad flödet på läsidan gör. Denna energidifferens gör att vakens inverkan på flödet skiljer sig för respektive sida.



(a)

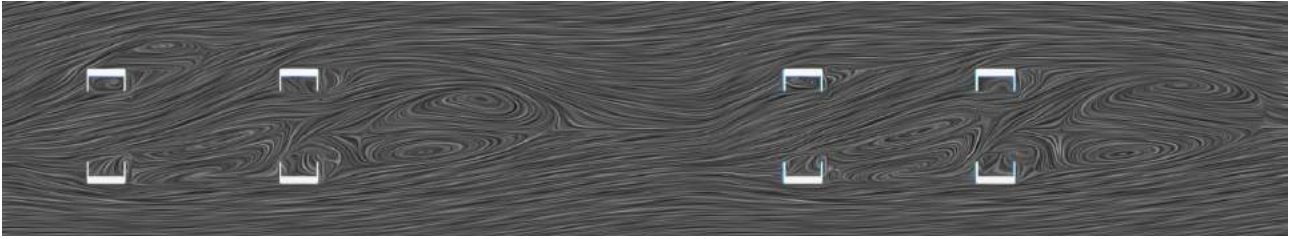


(b)

Figur 4.51: Strömlinjerna från sidan (a) och vaken ovanifrån sett (b). Avståndet mellan bilarna är 1,33 meter och infallsvinkeln 7,5 grader. I (a) ses hur den ovanstående virveln dominerar i vaken och i (b) ses vaken asymmetriska utseende.

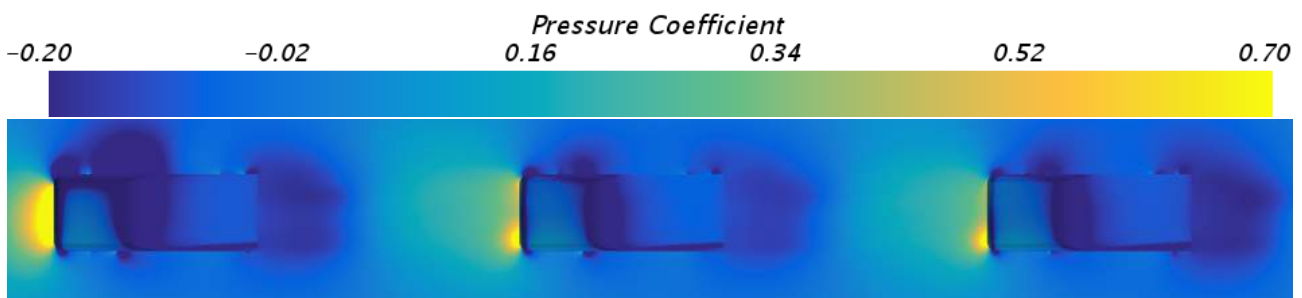
I figur 4.52 visas flödeskaraktäristiken under bilen. Utifrån detta kan lågtrycksområden och virvelpartier urskiljas. Dessa områden skapar turbulens och ojämnheter i flödet vilket kan leda till förluster i systemet. Flödet från läsidan viker av och går antingen under eller vid sidan av bilen medan friströmsflödet till stor del färdas under bilen. Huruvida detta är fördelaktigt eller inte är svårt att svara på. I vanliga fall är luft under bilen sällan önskevärt på grund av alla

mekaniska delar som förhindrar ett fritt luftflöde [22]. Då Windsor är en förenklad modell med ett plant underrede är detta nog inte anledningen till det ökade luftmotståndet när en sidvind appliceras.



Figur 4.52: Vy ovanifrån sett på strömlinjerna under första och andra bilen när avståndet är 1,33 meter och infallsvinkeln är 7,5 grader. I bilden kan ett vakområde noteras bakom hjulet på läsidan efter första bilens hjulpar.

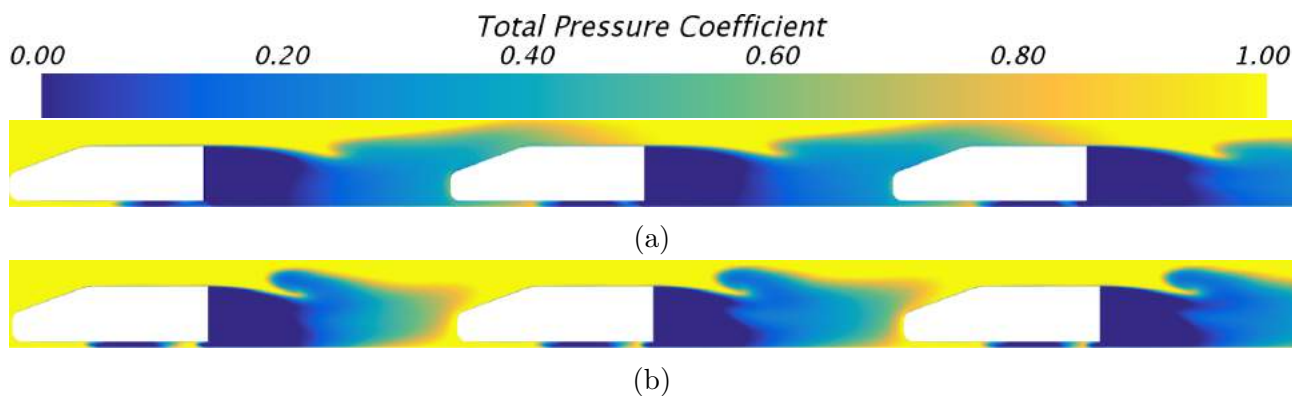
Under den första bilens främre hjul kan ett lågtrycksområde observeras. Vakområdet finns vid det främre hjulet på bilens läsida och återfinns inte för de två bakomvarande bilarna. Detta lågtrycksområde överensstämmer med hastighetsökningen i figur 4.50. Enligt Bernoullis ekvation (2.7) sjunker trycket lokalt på grund av hastighetsökningen. Detta vakområde återfinns i figur 4.53.



Figur 4.53: Kolonnkörning med 1,33 meter mellan bilarna och en infallsvinkel på 7,5 grader. I figuren ses hur det statiska trycket varierar i system. Den första bilen har ett större lågtrycksområde i fronten jämfört med de två bakomvarande

Lågtrycksområde ger den ledande bilen ett positivt bidrag i färdriktningen vilket kan stärka den observerade trenden, där C_D -värdet är minst för den främre bilen och generellt ökar bakåt i kolonnen.

Till skillnad från kolonnerna i avsnitt 4.2 kan ett lågtrycksområde under vardera bil identifieras. I figur 4.54 ses hur den totala tryckkoefficienten har ett lågtrycksområde strax bakom första hjulparet vilket tyder på att förluster förekommer. Det visar sig svårt att ge en förklaring till detta resultat men det skulle kunna motiveras med att rotationen på hjulen tillsammans med vindens infallsvinkel skapar ett virvelområde under bilen. Detta turbulenta lågtrycksområde förlorar energi i form av viskös dissipation [25]. Anledningen till att bara ett vakområde under bilen kan urskiljas beror på att de bakre hjulens lågtrycksområde befinner sig i bilens vak och gör sig därför inte lika tydlig i figur 4.54. Som ses i figur 4.44 i avsnitt 4.3.2 är dock bidraget i C_D inte så stort för hjul och hjulhus.



Figur 4.54: Kolonnkörning med 1,33 meter mellan bilarna och en infallsvinkel på (a) $7,5^\circ$ och (b) 15° . Figuren visar den totala tryckkoefficienten i de båda fallen. Det noteras att energin i flödet runt bilarnas front i (a) är lägre än i (b). Ett lågtrycksområde under vardera bil kan även observeras.

Vidare observeras att C_D -värdet ökar för samtliga positioner i kolonnen då infallsvinkeln ökar från $7,5^\circ$ till 15° . Detta skulle kunna förklaras med hjälp av figur 4.54. I figur 4.54b ses att den totala tryckkoefficienten hinner återställa sig framför vardera bil och skapar därför en större tryckdifferens mellan front och bak (jämför med figur 4.54a). Denna ökning i tryckskillnad ger ett större C_D -värde. När infallsvinkeln ökar träffar mer luft från vindsidan grillen. Detta sker parallellt med att energin på läsidan minskar vilket resulterar i en större mängd luft påverkas av lågtrycksområdet och slungas framför den bakomvarande bilen.

4.3.4 Sammanfattning av kolonnkörning med sidvind

Den övergripande trenden för sidvindssimuleringarna är att C_D -värdena ökar för de bakomvarande bilarna i kolonnen, vilket ses i figur 4.41. Denna trend gäller för samtliga resultat bortsett från test 13 där den sista bilen är mer gynnsam än den mellersta. Jämfört med kolonnerna utan sidvind för avstånd 1,33 och 1,67 meter ses att C_D -värdet är högst för den ledande bilen och sjunker bakåt i kolonnen. En trolig förklaring till undantagsfallet (test 13) är att den ledande bilen har ett större lågtrycksområde på fronten vilket drar bilen framåt. Detta medför att tryckskillnaden över bil 1 är lägre än för bil 2 och 3, vilket resulterar i att den främre bilen får lägst C_D -värde.

Det ses att den procentuella skillnaden av C_D gentemot bilarna i referenskolonnen, $C_D^{\%}$, alltid är positiv. Detta innebär att vardera placering i sidvindskolonnen har ett högre luftmotstånd än den motsvarande placeringen i referenskolonnen. Skillnaden ökar dessutom för varje placering bakåt i kolonnen. Det kan finnas ett flertal förklaringar till detta fenomen. När luften färdas genom kolonnen minskar flödets energi. Denna energiminskning leder till att flödet påverkas mer av bilarnas lågtrycksområde. I figur 4.49 riktas flödet, med vakens hjälp, mot den efterliggande bilens grill. Det kan även ses att det energirika flödet på bilens vindsida ostört leds rakt in i grillen. Denna luftansamling tillsammans med energiminskningen gör att C_D -värdet för vardera placering bakåt i kolonnen ökar. Det observeras i avsnitt 4.3.1 att för ett fixt avstånd mellan bilarna ökar C_D -värdet för alla bilar med ökad sidvinkel. Detta kan förklaras på liknande sätt som tidigare. Energin i flödet på bilens läsidan minskar ytterligare och påverkas mer av bilarnas vak. Den ökade vinkeln på inflödet gör att den framförliggande bilens lågtrycksområde förflyttas från bilens front, se figur 4.54. Denna förflyttning gör att det fördelaktiga lågtrycket försvinner.

Undantagsfallet där luftmotståndet inte följer samma trend som de resterande testerna är rimligtvis på grund av bastrycket. I fallet med sidvindssimuleringen $7,5^\circ$ och avståndet 1,67 meter är bastrycket lägst för den första bilen. Jämfört med sidvind $7,5^\circ$ och avstånd 1 meter samt 1,33 meter, där den tredje bilen i kolonnen har lägst tryck. Förutom skillnad i bastryck ses inga andra stora förändringar. Skillnaden i bastryck medför att tryckskillnaden över bilarna troligen ändras och att största tryckskillnad fås för den mellersta bilen, vilket förklarar C_D -värdena.

5

Slutsats

Studien syftar till att undersöka hur olika avstånd mellan bilarna och hur en pålagd sidvind, påverkar de aerodynamiska effekterna vid platooning. För kolonnkörning ökar det genomsnittliga C_D -värdet med ökande avstånd mellan bilarna. Det mest gynnsamma värdet ($C_D^{\%} = -53,7\%$) uppmätts för den mellersta bilen då de interna avstånden är 0,2 meter. Någon generell trend för vilken position i kolonnen som är mest gynnsam kan inte fastställas. Dock ses att vid relativt höga avstånd upplevs de mest gynnsamma förhållandena längre bak i kolonnen samt att den första bilen upplever ett motstånd snarlikt referensbilen. Vidare ses att kolonnens medelvärde av $C_D^{\%}$ försämras med ökande avstånd.

Då sidvind appliceras sker en markant försämring av C_D -värdet för samtliga bilar i förhållande till kolonnerna utan sidvind. De minsta förändringarna återfinns för det ledande fordonet och ökar bakåt i kolonnen. Den allmänna trenden är att första bilen i kolonnen har lägst C_D -värde och att de bakomvarande har betydligt högre värden. Vidare konstateras att en vinkel på $7,5^\circ$ är mer gynnsam än 15° samt sidvindens påverkan minskar för längre avstånd mellan bilarna.

6

Felkällor

Då studien använder approximativa numeriska metoder uppkommer fel som är svåra att kvantifiera. För att avgöra storleken på dessa krävs en exakt återskapning av geometrin och förhållandena i verkligheten, vilket kan vara svårt. Ett alternativ är att använda andra numeriska metoder eller en noggrannare mesh för att testa validiteten i resultatet. Approximativa modeller som denna studie använder sig av är bland annat RANS ekvationen, $k-\epsilon$ turbulens och steady state. Andra metoder som kan användas är bland annat DNS, turbulensmodellen $k-\omega$ eller ett tidsberoende system. I princip alla metoder för att höja säkerheten i resultatet kräver mer resurser i form datorkapacitet och en avvägning har gjorts.

I jämförelser mot andra studier där Windsormodellen används kan specifika resultat skilja sig väsentligt. Det har vid andra studier använts olika utföranden av modellen. Den modellen som använts i studien innefattar exempelvis hjul vilket direkt adderar en felkälla om extra luftmotstånd jämfört med en studie där de utesluts. Denna studies tolkning av Windsormodellen kan alltså skilja sig mot andra studier.

Andra direkta felkällor mot andra studier kan vara mindre skillnader i modellens höjd över marken. I denna studie har den sänkts ner för att simulera en sättning av hjulen mot marken och därmed saknar nedersta delen av hjulen en bit av radien. Radierna på modellen är väldefinierade men de översta på, vad som motsvarar, vindrutan kan skilja sig betydligt från en modell i verkligheten. I den här studiens uppställningar roterar dessutom hjulen.

De värden som är framtagna från simuleringarna är ett genomsnitt på dem sista iterationernas fluktuerande värden. När en simulering uppnått konvergens har alltså dess, med iterationerna, harmoniskt svängande värden medelvärderats. Detta kan vara en grund för fel då ett specifikt värde, inom tolerans, ej inte kunnat utläsas.

Mindre indirekta felkällor kan yttra sig i genereringen av mesh. Exempelvis så kommer en liten skillnad i modellens position resultera i en helt ny mesh och därmed ett annat resultat vid lösning. Om metoden återskapas kommer alltså med största sannolikhet en annan mesh genereras och skapa felkällor i relation till denna studie.

7

Framtida arbeten

Av resultaten att döma finns det olika avstånd mellan bilarna som är kritiska. Vid dessa avstånd skiftar den mest gynnsamma kolonnpositionen, vilket visas i figur 4.39. Dessa avstånd, för vilket det skiftar, kan vara av intresse att undersöka vidare. Med en fortsatt analys av vad som händer i flödet, kan en fortsatt studie hjälpa hitta metoder för att återskapa gynnsamma effekter vid dessa avstånd. Det mest relevanta intervallet att undersöka är under 1,33 meter.

Vid de kortaste avstånden i de undersökta kolonnuppställningarna syns stor skillnad mellan de olika simuleringarna. Fler uppdelningar på dessa små avstånd kan lägga grund för en mer utredande analys på de mest gynnsamma avstånden. Ett fortsatt arbete, där avståndsstegen är mindre och fler, kan bygga en bättre förståelse för mer exakt vilka fenomen som ger upphov till de allra största positiva effekterna.

I denna studie används ett flöde helt rakt framifrån i de uppställningar där endast avståndet förändras. Ett fortsatt arbete där man undersöker robustheten hos denna metod kan vara av värde. Att endast använda sig av en simulerad vind rakt framifrån utgör en risk för att exempelvis symmetrier skapar specialfall. Att simulera små avvikelser i flödet för att jämföra mot resultaten från denna studie utgör en fortsatt grund för vidare efterforskningar. De förändringar i vindriktning som presenteras i denna studie anses för stora för att kunna ge denna validitet.

Windsormodellen är byggd för att separationen från modellen ska ske väldigt kontrollerat och representerar inte kommersiella bilmodeller särskilt bra. En vidare studie kan använda sig av en annan typ av modell för att undersöka om samma trender uppstår vid kolonnkörning. Modellen kan med fördel efterlikna generella bilmodeller närmare.

Vid återupprepning av en liknande studie bör en referenskörning för sidvind inkluderas. I denna studie används istället bil 1 utan sidvind som referensbild för bil 1 med sidvind, där de interna avstånden i kolonnerna är samma.

Litteraturförteckning

- [1] Enric Aramburu Arturo Davila and Alex Freixa. Making the best out of aerodynamics: Platoons, 2013. hämtad: 2019-03-02.
- [2] Jiri Blazek. *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. Butterworth-Heinemann, apr 2015.
- [3] Jonathan Braithwaite. *Essential Fluid Dynamics for Scientists*. 2053-2571. Morgan & Claypool Publishers, 2017.
- [4] Arturo Davila, Enric Aramburu, and Alex Freixas. Making the best out of aerodynamics: Platoons. In *SAE 2013 World Congress & Exhibition*. SAE International, apr 2013.
- [5] Collins English Dictionary. Profile drag. <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/profile-drag>. hämtad: 2019-04-03.
- [6] Arturo Dávila and Mario Nombela. Sartre - safe road trains for the environment reducing fuel consumption through lower aerodynamic drag coefficient. In *SAE Brasil 2011 Congress and Exhibit*. SAE International, oct 2011.
- [7] EU-Commission. A european strategy for low-emission mobility. https://ec.europa.eu/clima/policies/transport_en. hämtad: 2019-04-02.
- [8] Thomas Gheysens and Gandert Van Raemdonck. Effect of the frontal edge radius in a platoon of bluff bodies. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 9(2):371–380, September 2016.
- [9] Christopher Goldenstein. Advanced combustion engines. <http://large.stanford.edu/courses/2011/ph240/goldenstein2/@online>, 2011. hämtad: 2019-31-01.
- [10] Geoffrey M. Le Good and Kevin P. Garry. On the use of reference models in automotive aerodynamics. In *SAE Technical Paper*. SAE International, 03 2004.
- [11] Nancy Hall. Drag of sphere. <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/dragosphere.html>. hämtad: 2019-05-07.
- [12] Nancy Hall. Similarity parameters. <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/airsim.html?fbclid=IwAR2gI6Bso8T1Qrw18VROzMvjauwXXr-BkxsAkbjfOBBmYGDmnAXnt2wbnc8>. hämtad: 2019-04-13.
- [13] Nancy Hall. What is drag? <https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/drag1.html>, 2015. hämtad: 2019-04-04.

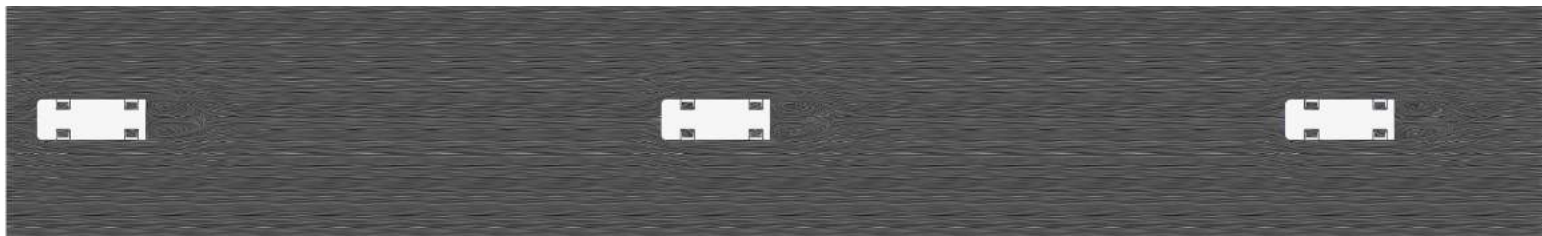
- [14] V. K. Krastev and G. Bella. On the steady and unsteady turbulence modeling in ground vehicle aerodynamic design and optimization. In *10th International Conference on Engines & Vehicles*. SAE International, sep 2011.
- [15] Geoffrey Le Good, Peter Boardman, Max Resnick, and Brian Clough. An investigation of aerodynamic characteristics of three bluff bodies in close longitudinal proximity. In *WCX SAE World Congress Experience*. SAE International, apr 2019.
- [16] Peter Liversage and Michele Trancossi. Analysis of triangular sharkskin profiles according to second law. *Modelling, Measurement and Control B*, 87(3):188–196, September 2018.
- [17] Doug McLean. *Understanding Aerodynamics: Arguing from the Real Physics*. Wiley, dec 2012.
- [18] Michael Milford. Coming soon to a highway near you—truck platooning, 2017. hämtad: 2019-12-02.
- [19] Jens-Dominik Müller. *Essentials of Computational Fluid Dynamics*. CRC Press, nov 2015.
- [20] Anna-Kristina Perry, Giancarlo Pavia, and Martin Passmore. Influence of short rear end tapers on the wake of a simplified square-back vehicle: wake topology and rear drag. *Experiments in Fluids*, Oct 2016.
- [21] Rachel Premack. One of the biggest problems facing self-driving trucks has little to do with the technology. <https://www.businessinsider.com/autonomous-trucks-self-driving-trucks-laws-2018-7?r=US&IR=T&IR=T>, 2018. hämtad: 2019-12-02.
- [22] UNDP. Drag reduction of a passenger car using flow control techniques. <https://link-springer-com.proxy.lib.chalmers.se/content/pdf/10.1007%2Fs12239-019-0039-2.pdf>, 2018.
- [23] UNDP. Mål 13 bekämpa klimatförändringarna. <https://www.globalamalen.se/om-globala-malen/mal-13-bekampa-klimatforandringarna/>, 2019. hämtad: 2019-05-13.
- [24] Max Varney, Martin Passmore, and Adrian Gaylard. Parametric study of asymmetric side tapering in constant cross wind conditions. *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.*, 11(3), May 2018.
- [25] F. M. White. *Fluid Mechanics 8e in SI Units*. McGraw-Hill Education, feb 2016.

..

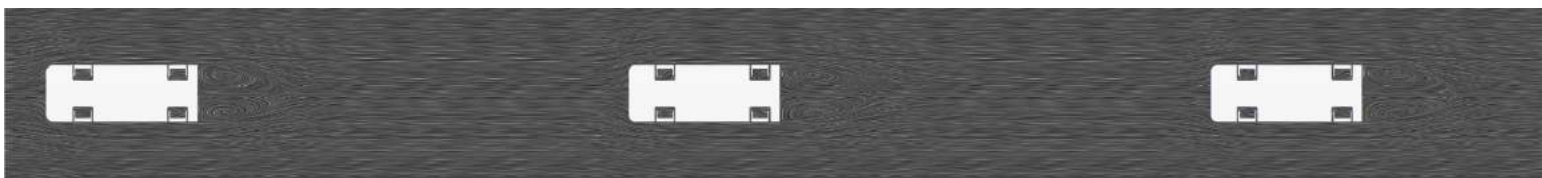
A

Kompletterande bilder för avståndssimuleringarna

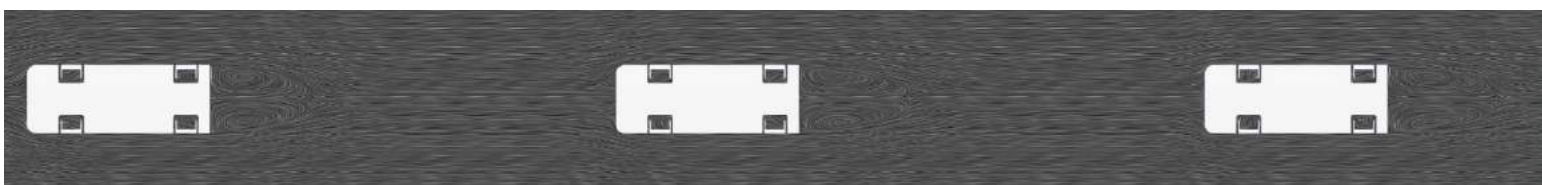
I denna del presenteras kompletterande bilder till rapporten som inte används i analysen av resultatet.



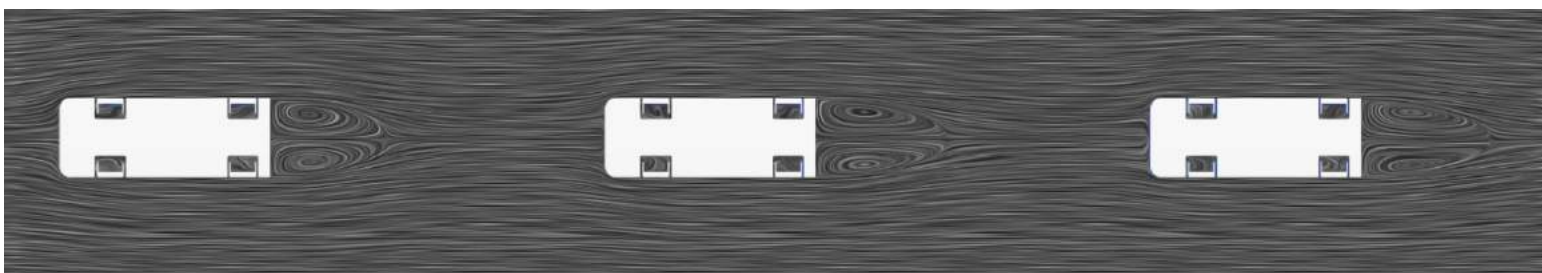
Figur A.1: 5 meter sett ovanifrån.



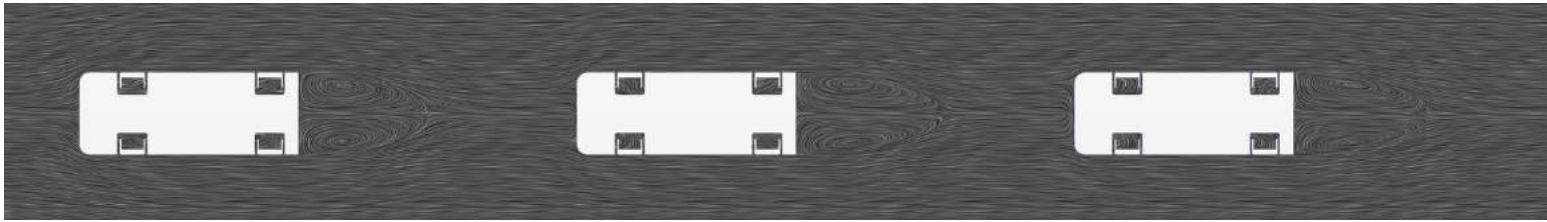
Figur A.2: 3 meter sett ovanifrån.



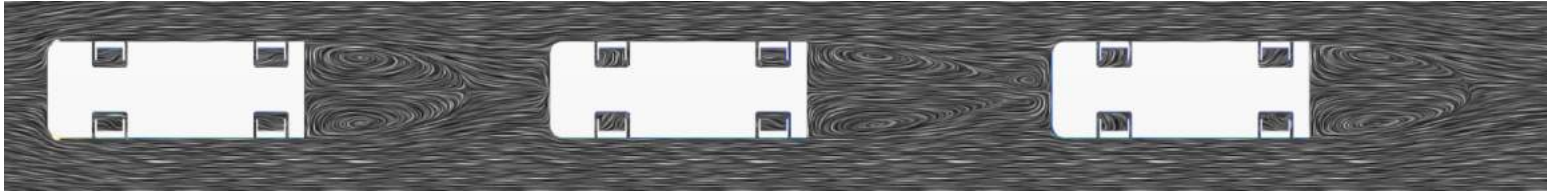
Figur A.3: 2,33 meter sett ovanifrån.



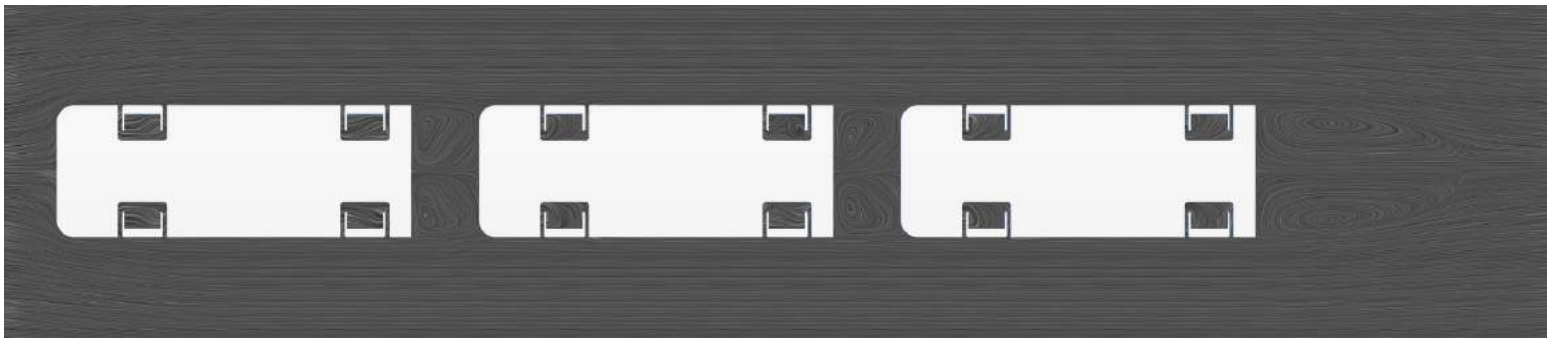
Figur A.4: 1,67 meter sett ovanifrån.



Figur A.5: 1,33 meter sett ovanifrån.



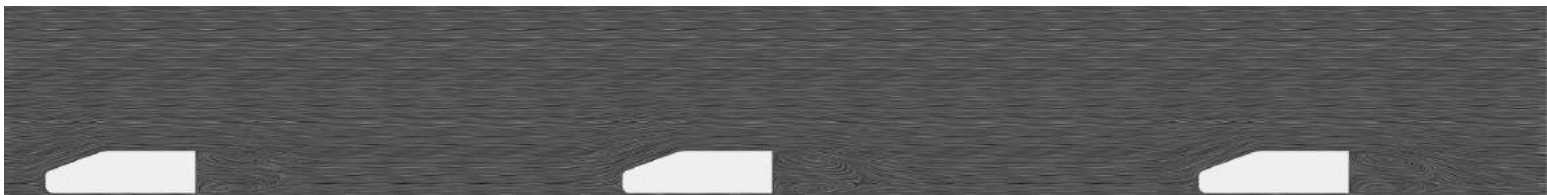
Figur A.6: 1,0 meter sett ovanifrån.



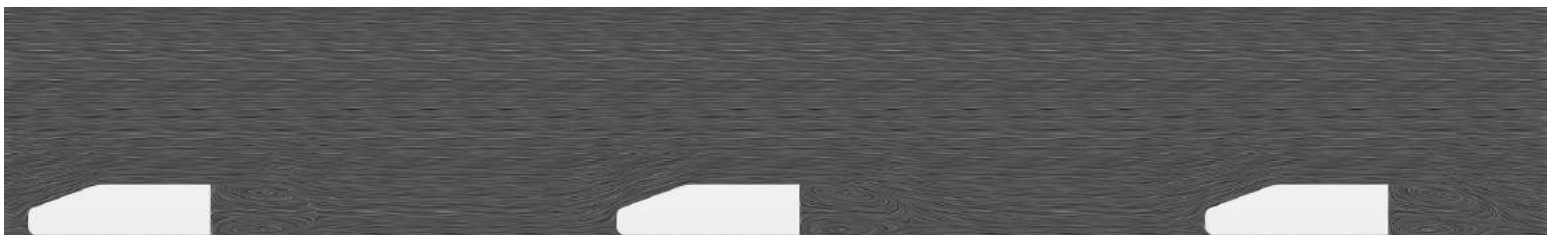
Figur A.7: 0,2 meter sett ovanifrån.



Figur A.8: 5 meter sett från sidan.



Figur A.9: 3 meter sett från sidan.



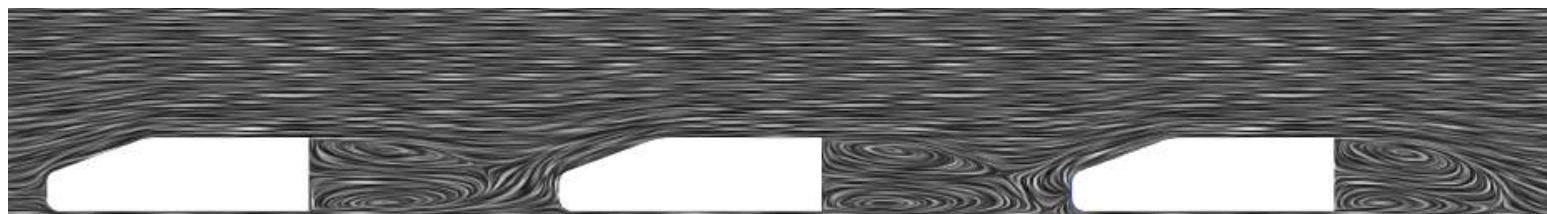
Figur A.10: 2,33 meter sett från sidan.



Figur A.11: 1,67 meter sett från sidan.



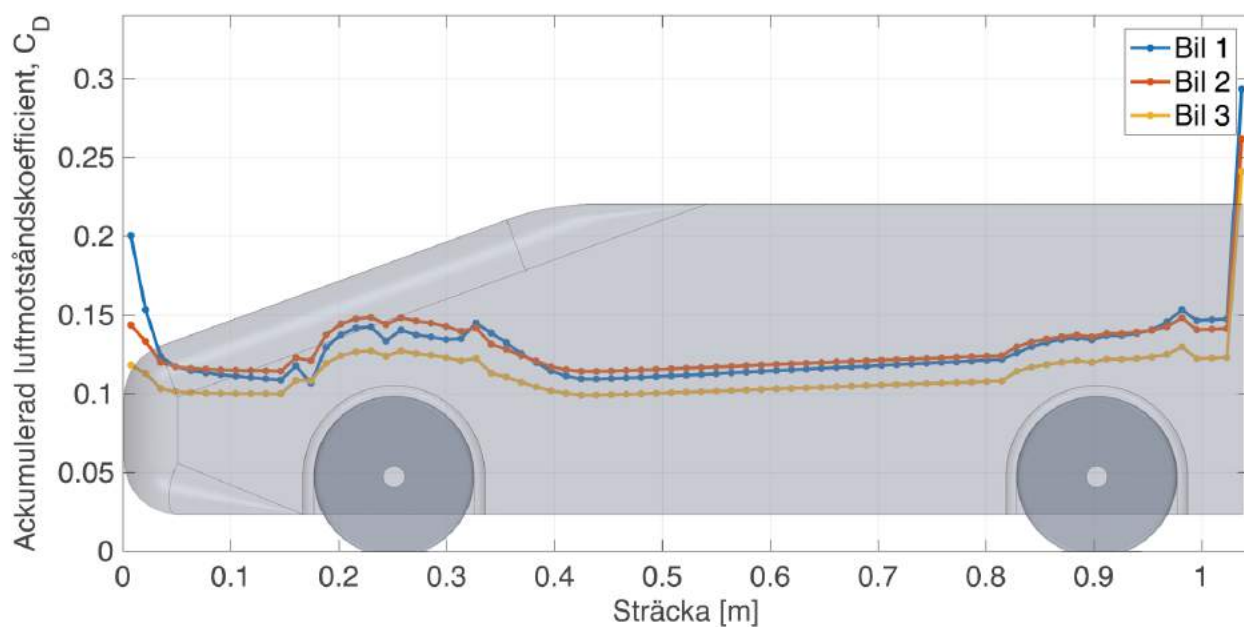
Figur A.12: 1,33 meter sett från sidan.



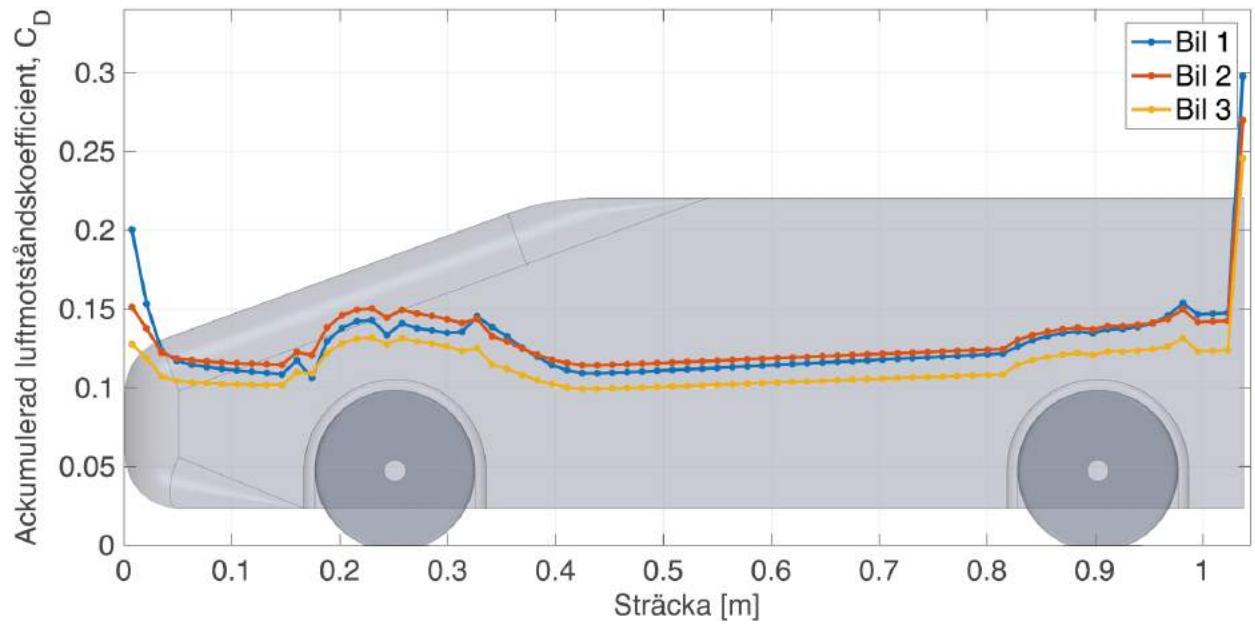
Figur A.13: 1,0 meter sett från sidan.



Figur A.14: 0,2 meter sett från sidan.



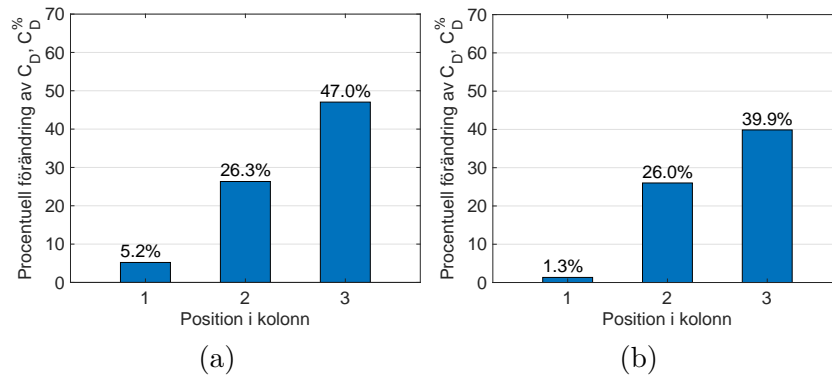
Figur A.15: Ackumulerade luftmotståndskoefficienten som funktion av sträckan då de interna avstånden är 7 meter.



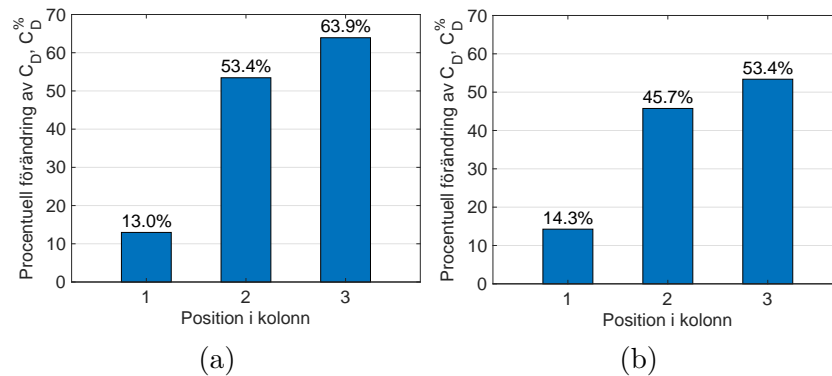
Figur A.16: Ackumulerade luftmotståndskoefficienten som funktion av sträckan då de interna avstånden är 9 meter.

B

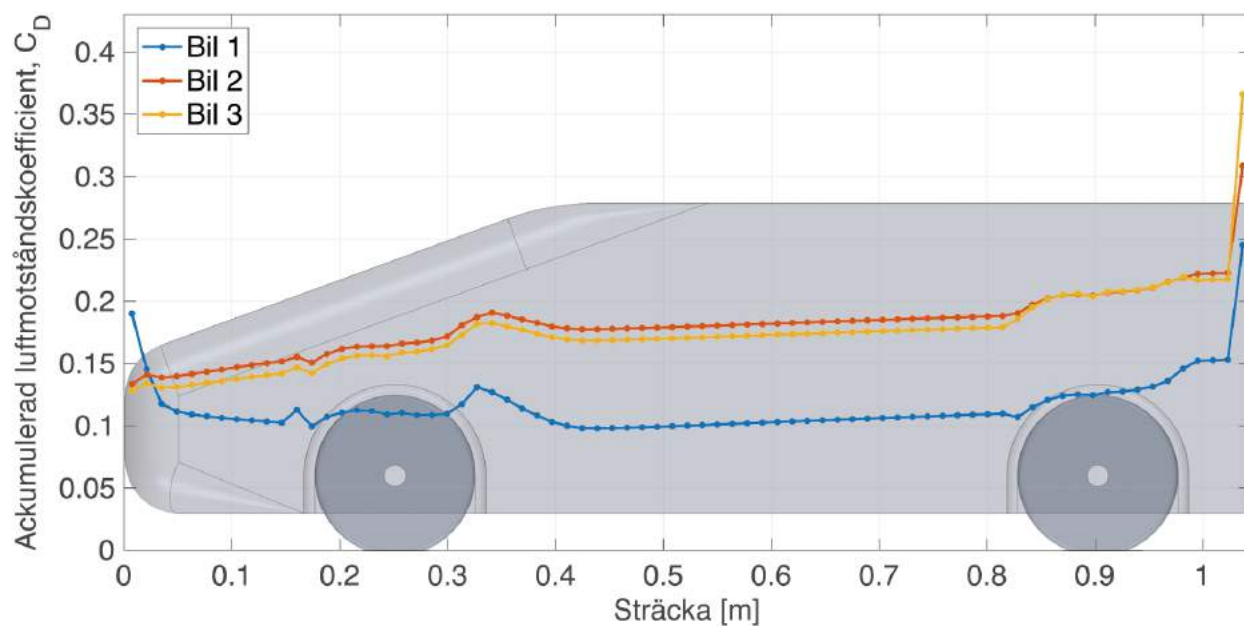
Kompletterande bilder för sidvindssimuleringarna



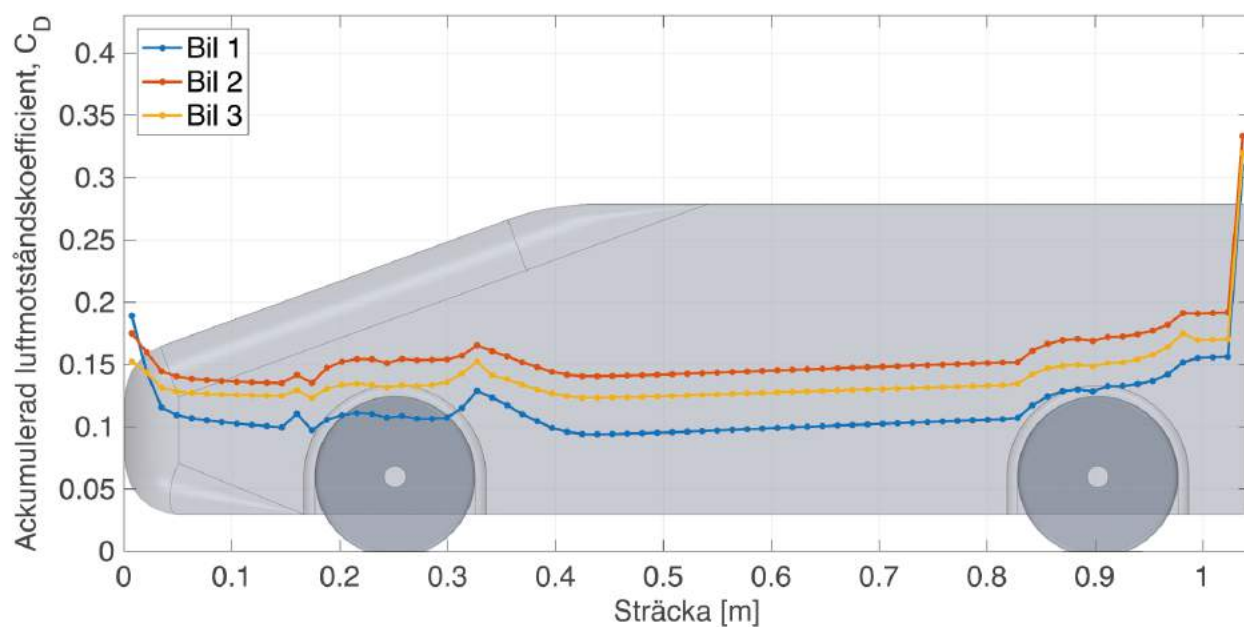
Figur B.1: Procentuella förändringen av C_D mot referenskolonnen för respektive bil. Figuren gäller testen med 7,5 grader sidvind.



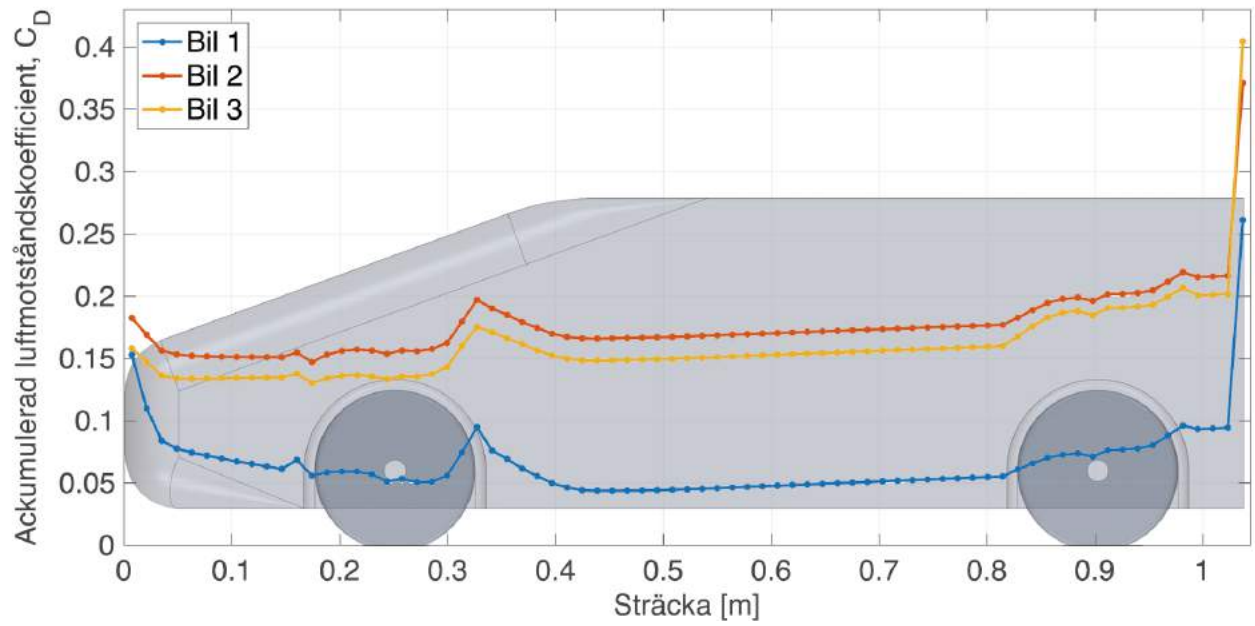
Figur B.2: Procentuella förändringen av C_D mot referenskolonnen för respektive bil. Figuren gäller testen med 15 grader sidvind.



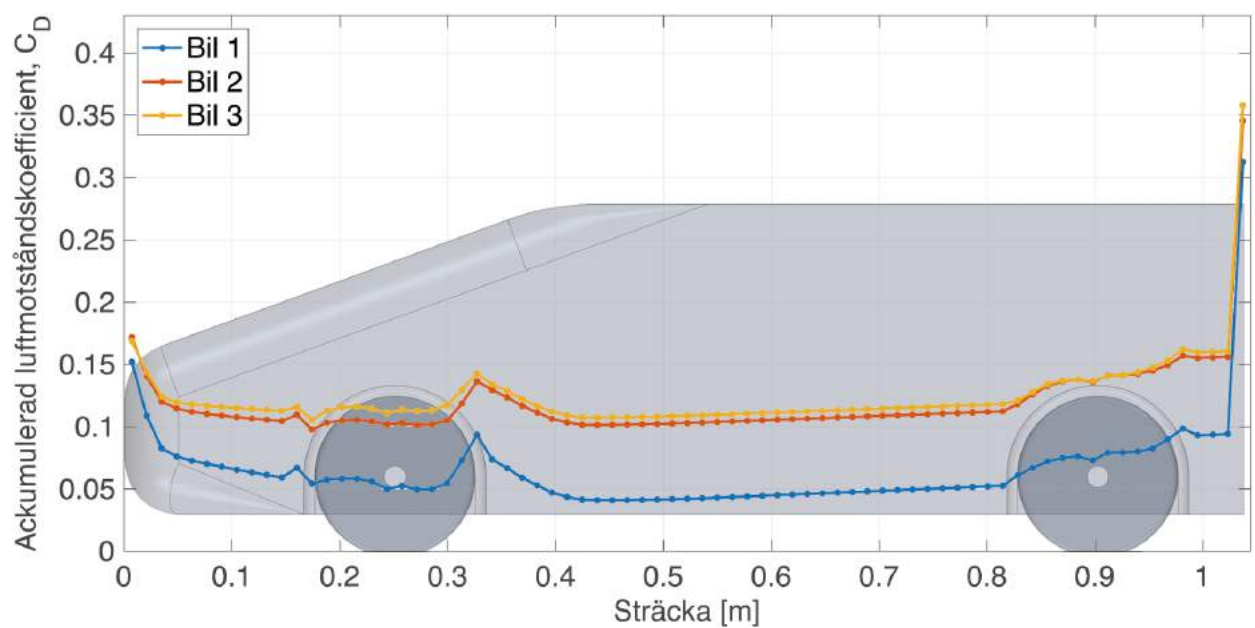
Figur B.3: Det ackumulerade C_D -värdet som funktion av sträckan för sidvindssimulering $7,5^\circ$ och avstånd 1 meter.



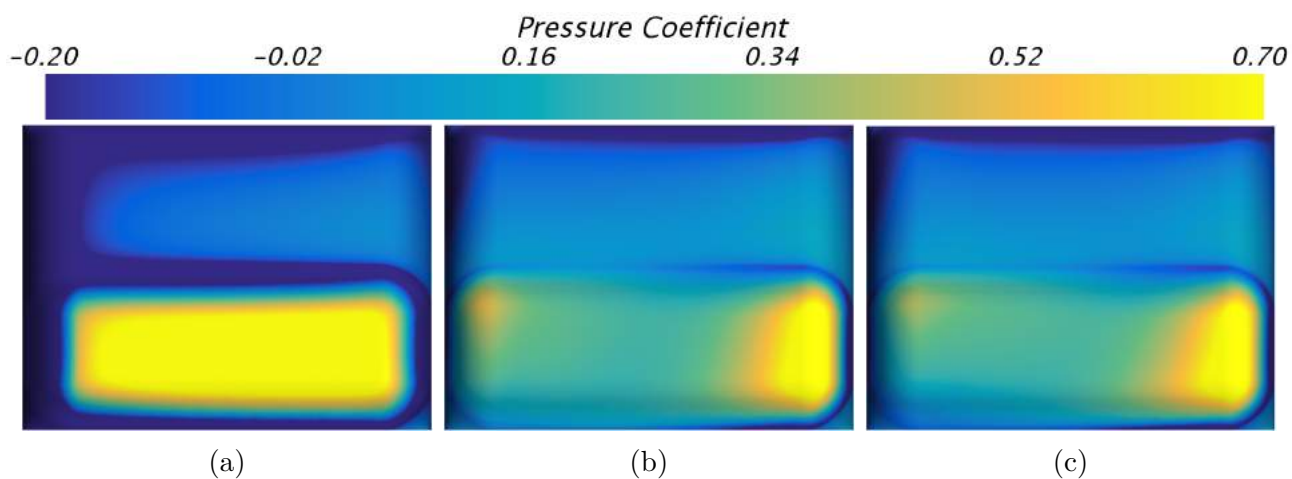
Figur B.4: Det ackumulerade C_D -värdet som funktion av sträckan för sidvindssimulering $7,5^\circ$ och avstånd 1,67 meter.



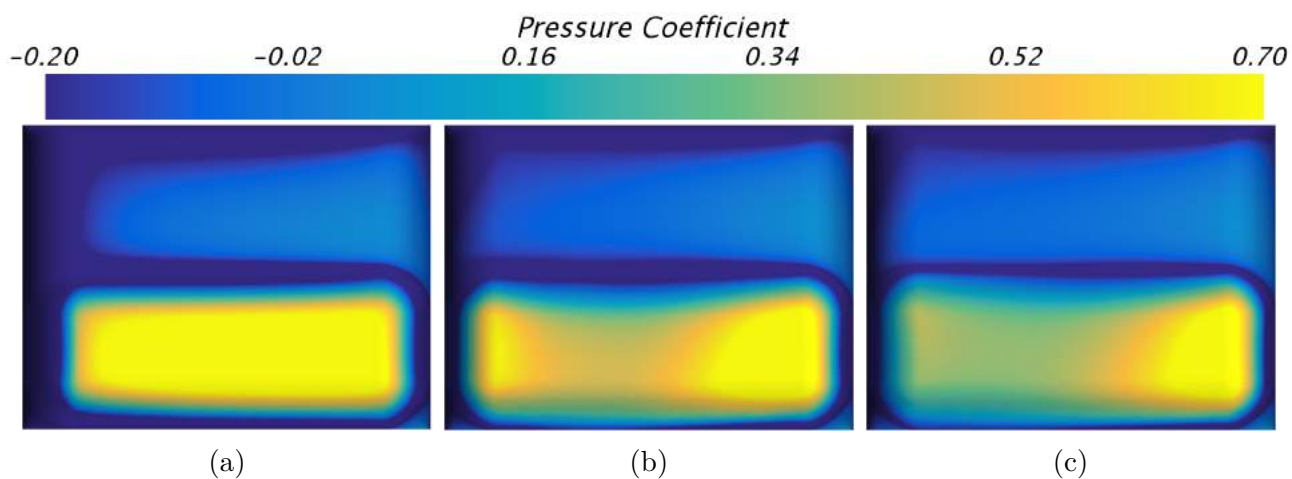
Figur B.5: Det ackumulerade C_D -värdet som funktion av sträckan för sidvindssimulering 15° och avstånd 1 meter.



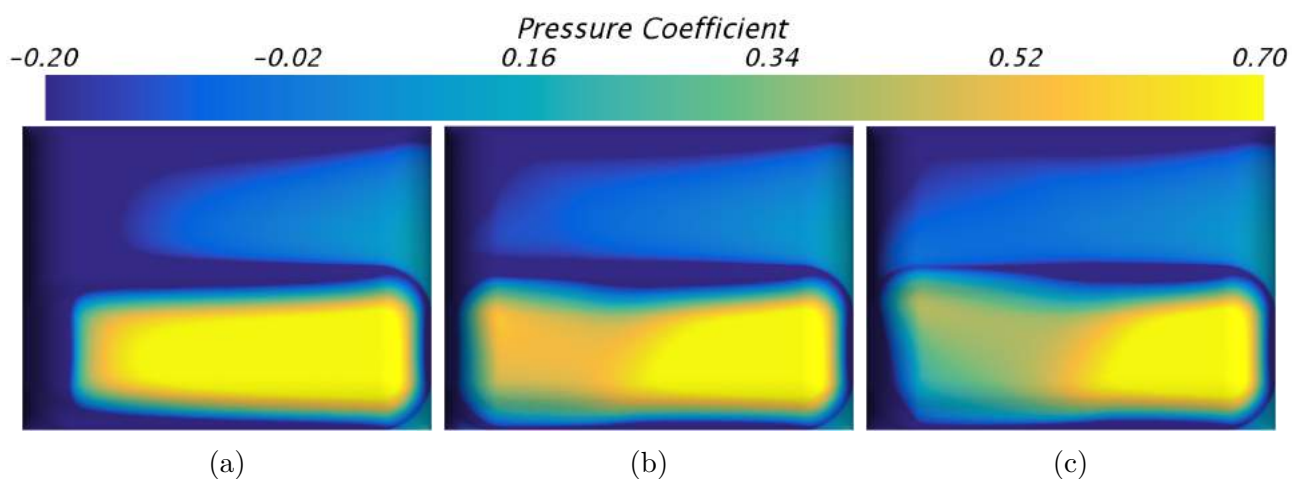
Figur B.6: Det ackumulerade C_D -värdet som funktion av sträckan för sidvindssimulering 15° och avstånd 1,67 meter.



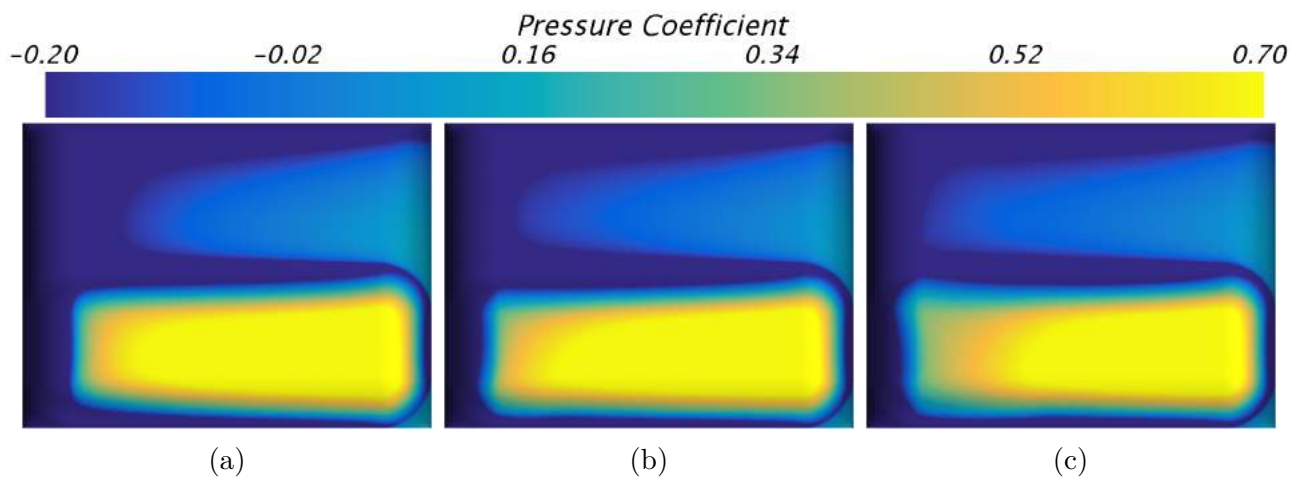
Figur B.7: Frontrycket på bil 1-(a), 2-(b), 3-(c) med 1 meters avstånd och sidvind 7,5°.



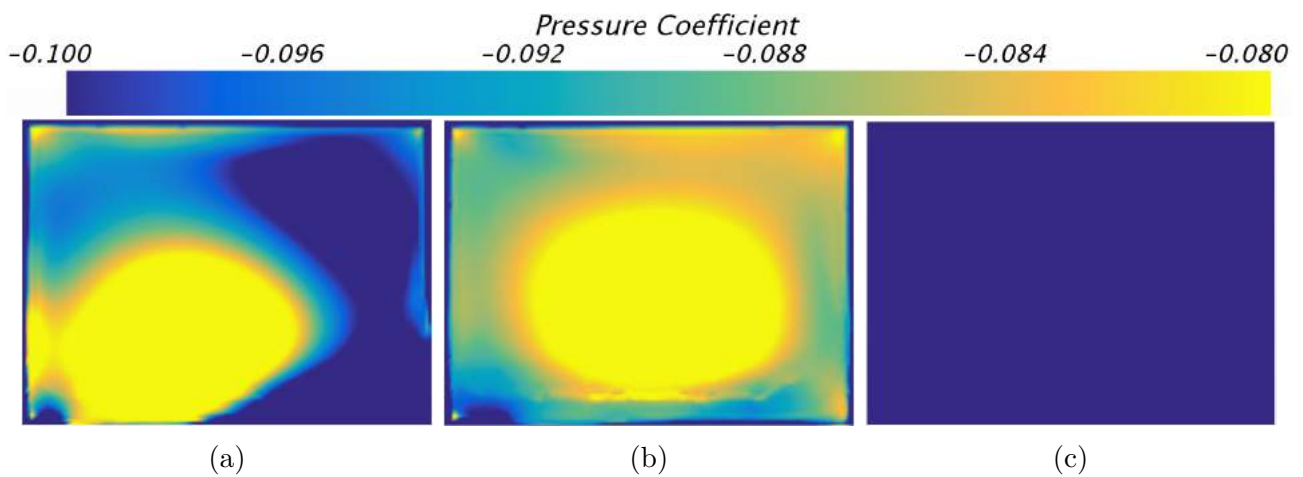
Figur B.8: Frontrycket på bil 1-(a), 2-(b), 3-(c) med 1,67 meters avstånd och sidvind 7,5°.



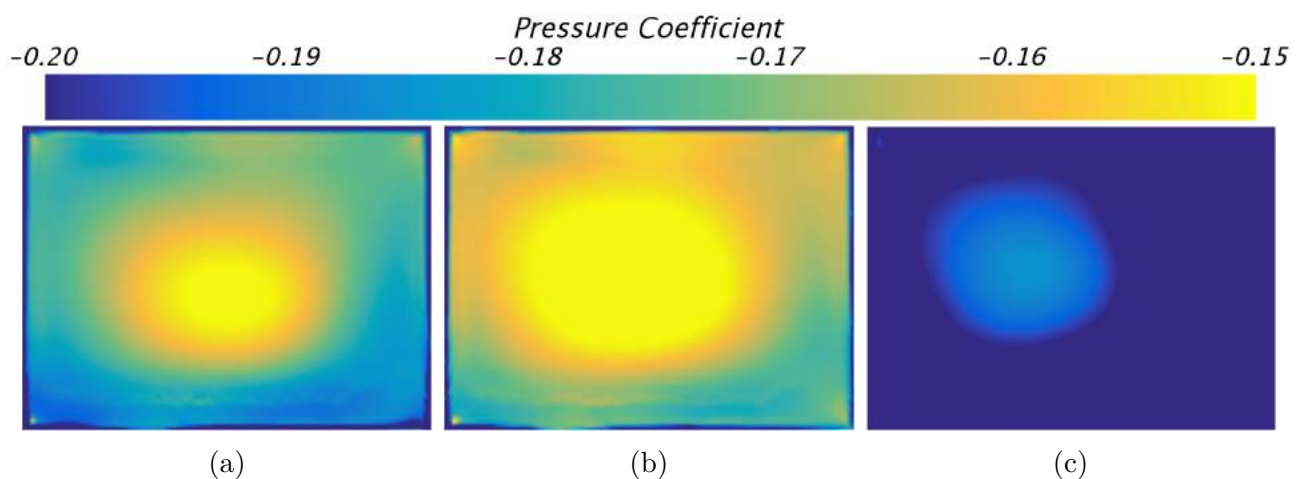
Figur B.9: Frontrycket på bil 1-(a), 2-(b), 3-(c) med 1 meters avstånd och sidvind 15°.



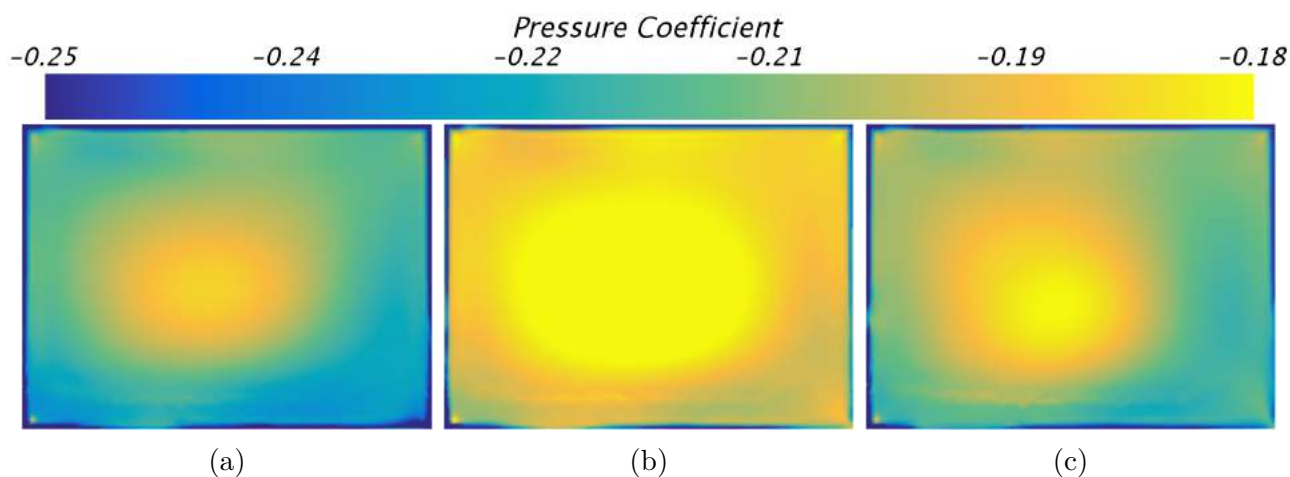
Figur B.10: Frontrycket på bil 1-(a), 2-(b), 3-(c) med 1,67 meters avstånd och sidvind 15°.



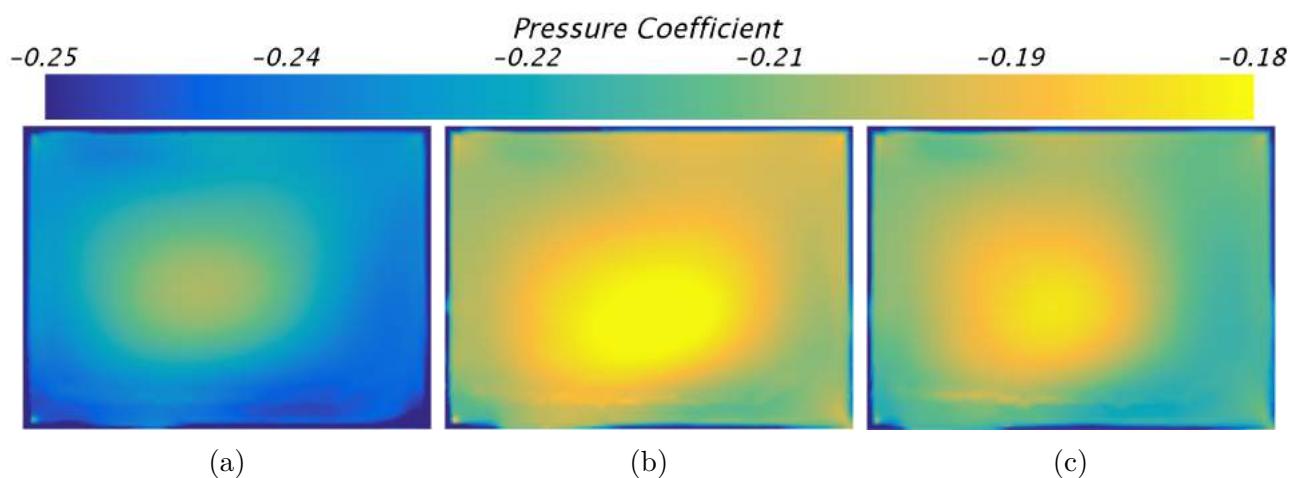
Figur B.11: Bastrycket på bil 1-(a), 2-(b), 3-(c) med 1 meters avstånd och sidvind 7,5°.



Figur B.12: Bastrycket på bil 1-(a), 2-(b), 3-(c) med 1 meters avstånd och sidvind 15°.



Figur B.13: Bastrycket på bil 1-(a), 2-(b), 3-(c) med 1,33 meters avstånd och sidvind 15°.



Figur B.14: Bastrycket på bil 1-(a), 2-(b), 3-(c) med 1,67 meters avstånd och sidvind 15°.



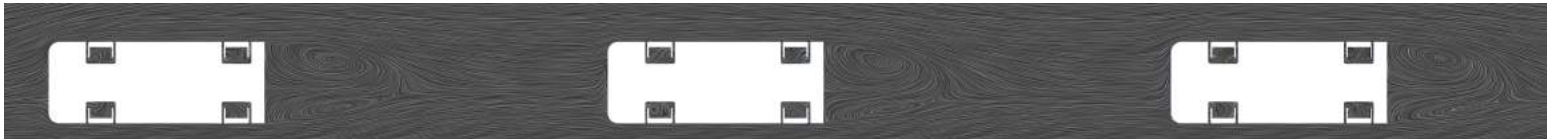
Figur B.15: Strömlinjer ifrån sidan sett. Avståndet mellan bilarna är 3 meter och sidvindens infallsvinkel är 15 grader.



Figur B.16: Strömlinjer ifrån sidan sett. Avståndet mellan bilarna är 4 meter och sidvindens infallsvinkel är 15 grader.



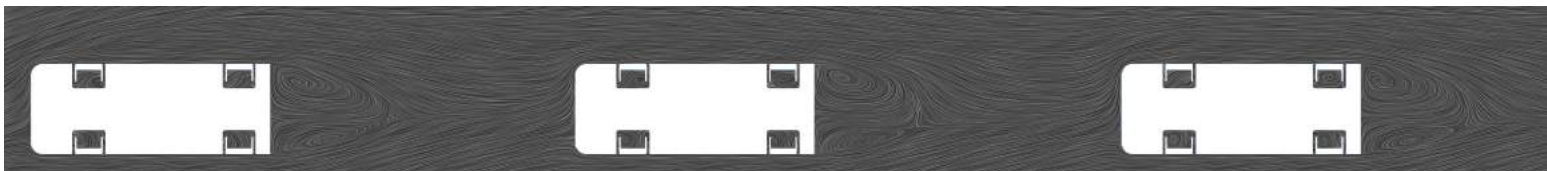
Figur B.17: Strömlinjer ifrån sidan sett. Avståndet mellan bilarna är 5 meter och sidvindens infallsvinkel är 15 grader.



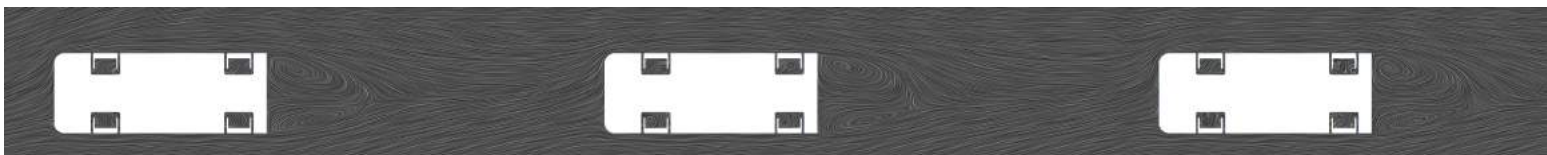
Figur B.18: Strömlinjer ovanifrån sett. Avståndet mellan bilarna är 5 meter och sidvindens infallsvinkel är 7,5 grader.



Figur B.19: Strömlinjer ovanifrån sett. Avståndet mellan bilarna är 3 meter och sidvindens infallsvinkel är 15 grader



Figur B.20: Strömlinjer ovanifrån sett. Avståndet mellan bilarna är 4 meter och sidvindens infallsvinkel är 15 grader.



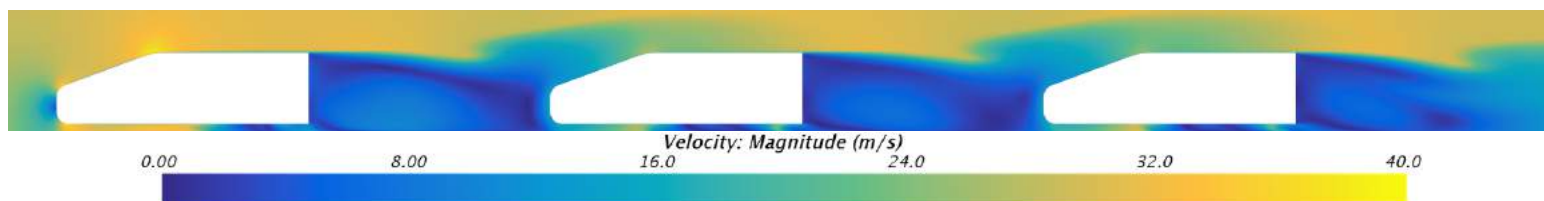
Figur B.21: Strömlinjer ovanifrån sett. Avståndet mellan bilarna är 5 meter och sidvindens infallsvinkel är 15 grader.



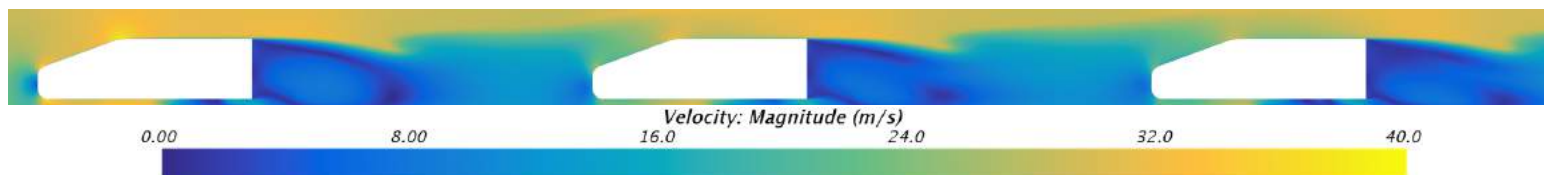
Figur B.22: Strömlinjer ovanifrån sett. Avståndet mellan bilarna är 3 meter och sidvindens infallsvinkel är 7,5 grader.



Figur B.23: Strömlinjer ovanifrån sett. Avståndet mellan bilarna är 5 meter och sidvindens infallsvinkel är 7,5 grader.



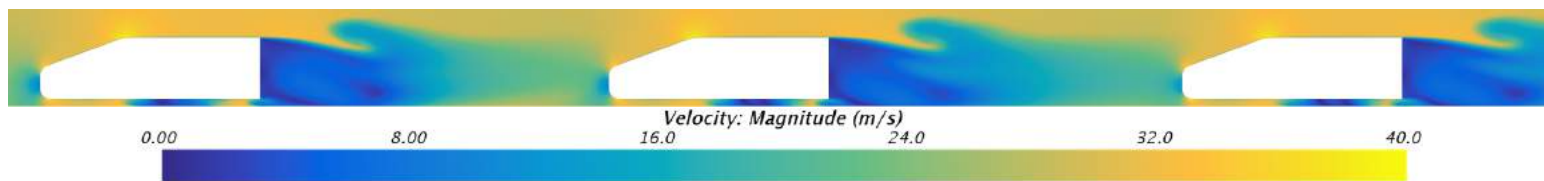
Figur B.24: Hastighetsfördelningen i systemet sett ifrån sidan. Avståndet mellan bilarna är 3 meter och sidvindens infallsvinkel är 7,5 grader.



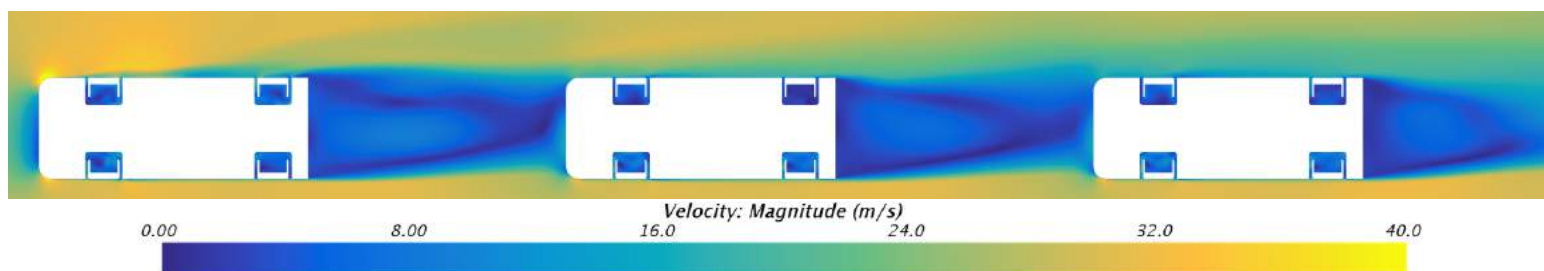
Figur B.25: Hastighetsfördelningen i systemet sett ifrån sidan. Avståndet mellan bilarna är 5 meter och sidvindens infallsvinkel är 7,5 grader.



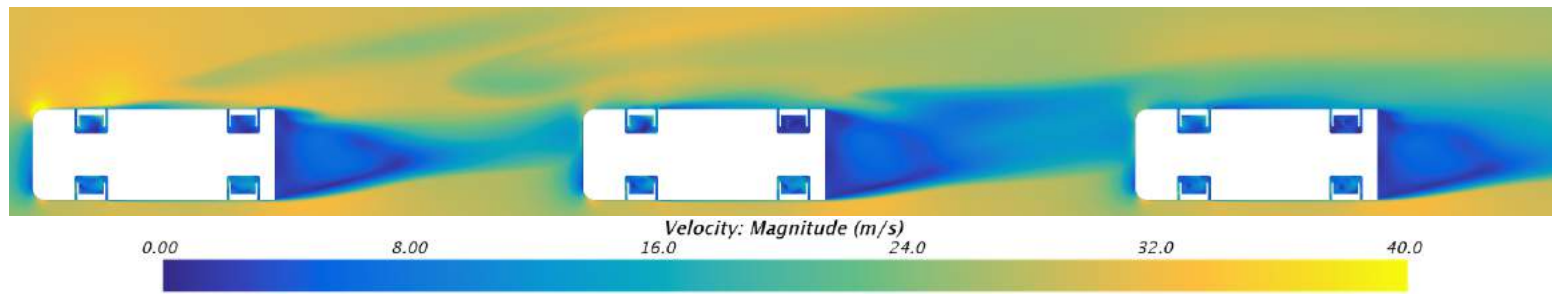
Figur B.26: Hastighetsfördelningen i systemet sett ifrån sidan. Avståndet mellan bilarna är 4 meter och sidvindens infallsvinkel är 7,5 grader.



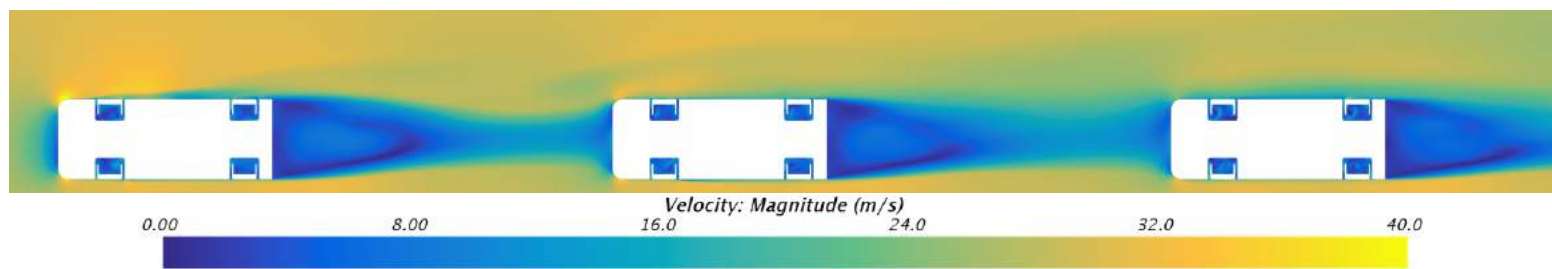
Figur B.27: Hastighetsfördelningen i systemet sett ifrån sidan. Avståndet mellan bilarna är 5 meter och sidvindens infallsvinkel är 15 grader.



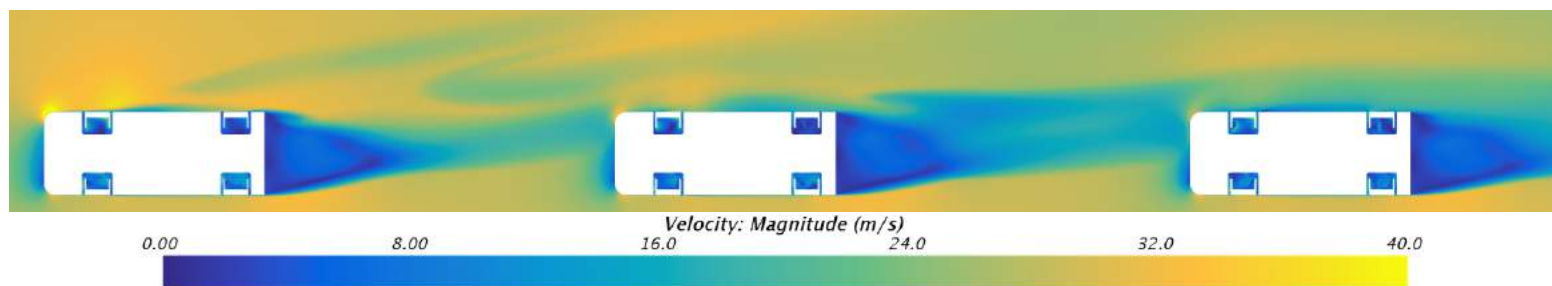
Figur B.28: Hastighetsfördelningen i systemet ovanifrån sett. Avståndet mellan bilarna är 3 meter och sidvindens infallsvinkel är 7,5 grader.



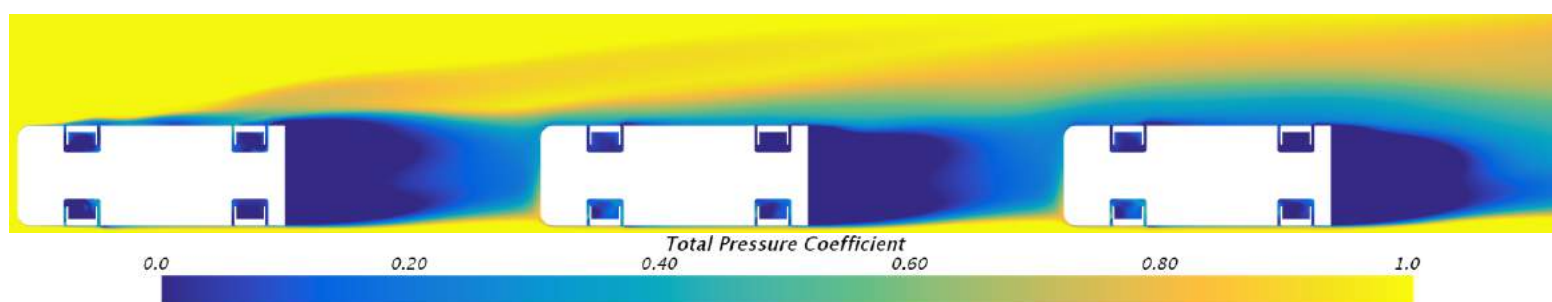
Figur B.29: Hastighetsfördelningen i systemet ovanifrån sett. Avståndet mellan bilarna är 4 meter och sidvindens infallsvinkel är 15 grader.



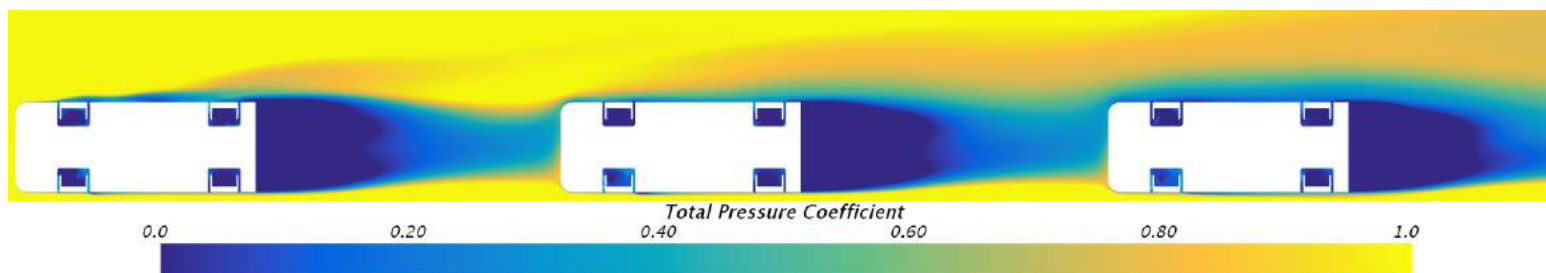
Figur B.30: Hastighetsfördelningen i systemet ovanifrån sett. Avståndet mellan bilarna är 5 meter och sidvindens infallsvinkel är 7,5 grader.



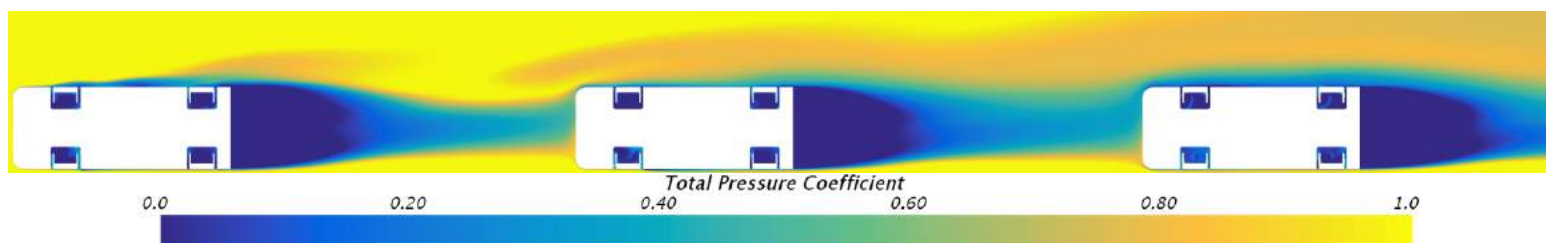
Figur B.31: Hastighetsfördelningen i systemet ovanifrån sett. Avståndet mellan bilarna är 5 meter och sidvindens infallsvinkel är 15 grader.



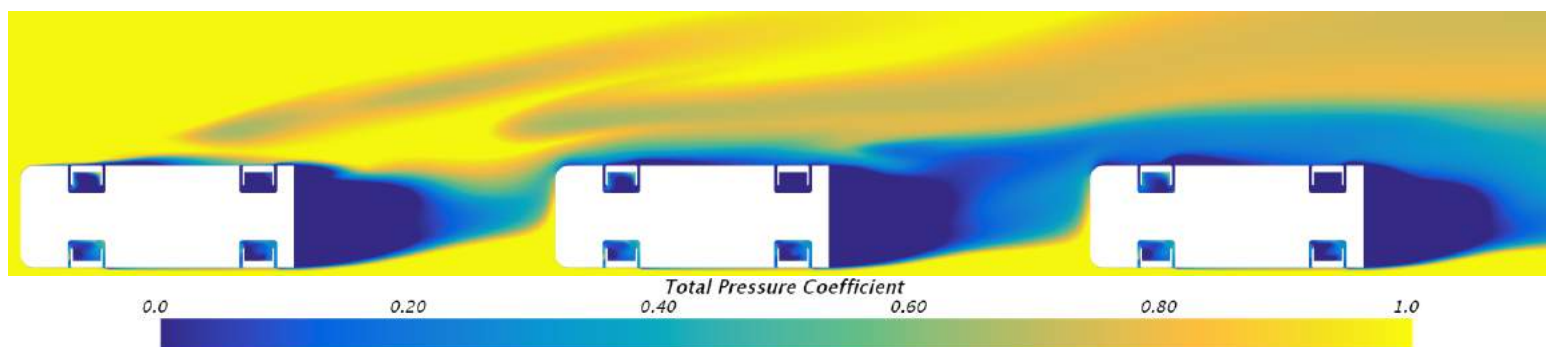
Figur B.32: Energin i flödet ovanifrån sett. Avståndet mellan bilarna 3 meter och infallsvinkeln är 7,5 grader.



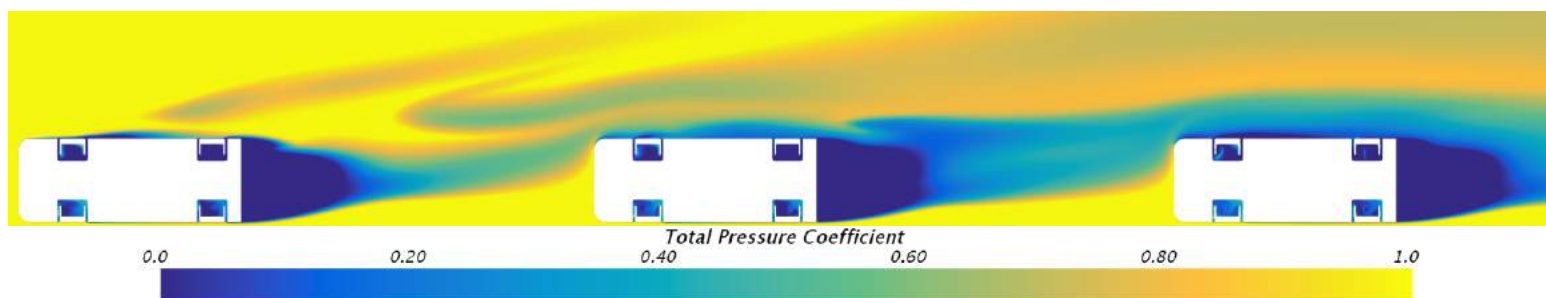
Figur B.33: Energin i flödet ovanifrån sett. Avståndet mellan bilarna 4 meter och infallsvinkeln är 7,5 grader.



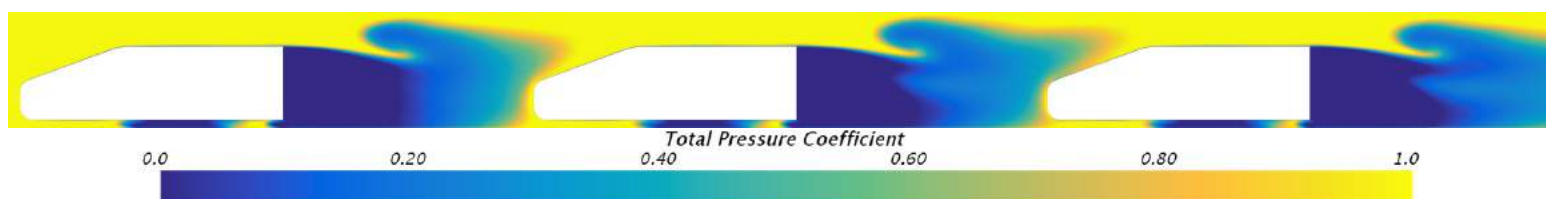
Figur B.34: Energin i flödet ovanifrån sett. Avståndet mellan bilarna 5 meter och infallsvinkeln är 7,5 grader.



Figur B.35: Energin i flödet ovanifrån sett. Avståndet mellan bilarna 3 meter och infallsvinkeln är 15 grader.



Figur B.36: Energin i flödet ovanifrån sett. Avståndet mellan bilarna 5 meter och infallsvinkeln är 15 grader.



Figur B.37: Energin i flödet sett ifrån sidan. Avståndet mellan bilarna 3 meter och infallsvinkeln är 15 grader.



Figur B.38: *Energin i flödet sett ifrån sidan. Avståndet mellan bilarna 5 meter och infallsvinkeln är 15 grader.*