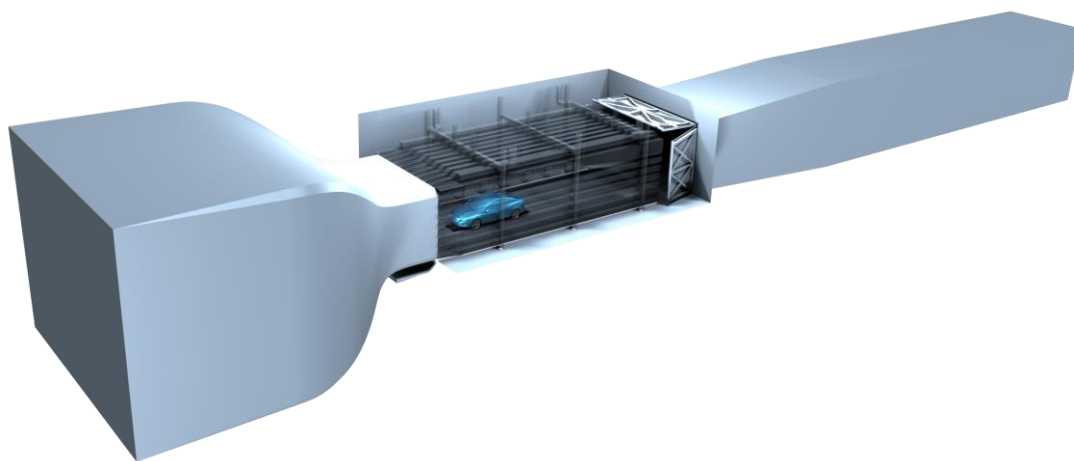


Utveckling av Volvos fullskalevindtunnel och virtuell tunnelmodell för framtida fordonscertifiering



Författare:

Alexander Broniewicz och Emil Ljungskog

Datum:

2020-01-24

Projekt inom:

Fordonsutveckling

FFI Fordonsstrategisk
Forskning och
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	3
2 Executive summary in English.....	3
3 Bakgrund.....	4
4 Syfte, forskningsfrågor och metod	4
5 Mål	5
6 Resultat och måluppfyllelse	5
7 Spridning och publicering	9
7.1 Kunskaps- och resultatspridning	9
7.2 Publikationer.....	10
8 Slutsatser och fortsatt forskning	10
9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....	11

Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Trafiksäkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör drygt 400 Mkr.

För närvarande finns fem delprogram; Energi & Miljö, Trafiksäkerhet och automatiserade fordon, Elektronik, mjukvara och kommunikation, Hållbar produktion och Effektiva och uppkopplade transportsystem. Läs mer på www.vinnova.se/ffi.

1 Sammanfattning

Volvo Cars har sedan 1986 nyttjat sin egen vindtunnel, där uppmätta värden använts som bas för kravsättning, utveckling av nya projekt och verifiering av produktionsbilar. Sedan införandet av WLTP-standarden 2018 används mätdata från vindtunneln även som underlag för skapande av väglastkurvor i samband med bränsleförbrukningscertifiering. Parallellt med detta används virtuella verktyg i utveckling av nya bilar, som nödvändigt komplement till fysisk utveckling.

Korrelationen i resultat mellan fysiska prov i vindtunneln (PVT) och virtuell utveckling (CFD) har genom åren blivit mer exakt tack vare förbättrad kunskap om verktygens tillkortakommanden samt robustare mjukvara och hårdvara. Trots detta kvarstår vissa skillnader mellan predikterade aerodynamiska egenskaper från CFD och uppmätta värden från PVT.

Projektets mål har varit att vidareutveckla numeriska modellen av vindtunneln för att därigenom reducera skillnaderna, och på sikt möjliggöra certifiering av bränsleförbrukning med virtuella verktyg. Ett annat mål har varit att undersöka visa tillkortakommanden i luftströmningen i vindtunneln.

För att validera den numeriska modellen har bland annat den longitudinella tryckfördelningen samt gränsskiktets utbredning uppmätts i den fysiska vindtunneln. Denna mätdata har använts för att kalibrera den virtuella modellen, med mycket goda resultat. Vidare har den longitudinella tryckfördelningen använts för att för att bestämma vilken typ av turbulensmodellering som är lämplig att använda i de numeriska simuleringarna.

För att kunna mäta flödesvinklar och homogenitet i flödet i tom testsektion har en ny så kallad Flow Measurement Rig konstruerats och införskaffats parallellt med projektet. Med denna nya utrustning har mätningar av mycket god noggrannhet kunnat genomföras [4], och två möjliga orsaker till uppkomsten av de flödesvinklar som förekommer i testsektionen har kunnat förkastas [5]. Genom att artificiellt öka dessa flödesvinklar och mäta krafter på en referensbil har det visats att dessa flödesvinklar inte har någon påverkan på de uppmätta krafterna.

Projektet har resulterat i en förbättrad virtuell modell av Volvos fullskalevindtunnel samt utökad förståelse för strömningen i tunnelns testsektion och dess påverkan på de uppmätta aerodynamiska krafterna i linje med projektets målsättning.

2 Executive summary in English

Today, high demands are placed on energy efficient, safe and quiet road vehicles. The fuel consumption caused by the aerodynamic air resistance is an essential part of a vehicle's total energy consumption, regardless of the type of fuel the vehicle is powered by. Upcoming targets for lower fuel consumption and reduced carbon dioxide emissions are placing increasing demands on low air resistance for both passenger cars and heavy vehicles, while maintaining stability and performance for the other properties concerned. In addition to direct coupling to energy consumption, aerodynamics also have a very strong safety impact on a vehicle's high-speed stability, lateral sensitivity, and handling characteristics during manoeuvring.

Improved prediction accuracy enables the development and implementation of solutions that reduce certified fuel consumption, as well as the consumption experienced by the end customer. The project supports Volvo Cars' goal of achieving 50% energy efficiency by 2020 through competitive passenger cars.

Volvo Cars has been using its own wind tunnel since 1986, where measured values have been used as a basis for requirements, development of new projects and verification of production cars. Since the introduction of the WLTP standard 2018, measurement data from the wind tunnel has also been used as a basis for the creation of road load curves in connection with fuel

consumption certification. Parallel to this, virtual tools are used in the development of new cars, which are necessary complement to physical development.

Over the years, the correlation in results between physical tests in the wind tunnel (PVT) and virtual development (CFD) has become more accurate thanks to improved knowledge of the tool shortcomings as well as more robust software and hardware. Nevertheless, some differences remain between predicted aerodynamic properties from CFD and measured values from PVT. The aim of the project has been to further develop the numerical model of the wind tunnel in order to reduce the differences, and in the long term enable certification of fuel consumption with virtual tools. Another goal has been to investigate the shortcomings in the airflow characteristics in the wind tunnel.

In order to validate the numerical model, among other things, the longitudinal pressure distribution and the distribution of the boundary layer have been measured in the physical wind tunnel. This measurement data has been used to calibrate the virtual model, with very good results. Furthermore, the longitudinal pressure distribution has been used to determine which type of turbulence modelling is suitable for use in the numerical simulations. The project has shown that modern methods that resolve larger parts of the turbulent spectrum are necessary to reach acceptable agreement between the numerically predicted and the physically measured flow in the wind tunnel.

In order to measure flow angles and homogeneity of the flow in an empty test section, a new so-called Flow Measurement Rig has been designed and acquired in parallel with the project. With this new equipment, measurements of very good accuracy have been possible [4], and two possible reasons for the occurrence of the flow angles that occur in the test section have been rejected [5]. By artificially increasing these flow angles and measuring forces on a reference car, it has been shown that these flow angles have no effect on the measured forces.

The project has resulted in an improved virtual model of Volvo's full-scale wind tunnel as well as increased understanding of the flow in the tunnel's test section and its impact on the measured aerodynamic forces in line with the project's objectives.

3 Bakgrund

Det ställs idag höga krav på energieffektiva, säkra och tysta vägfordon. Bränsleförbrukningen orsakad av det aerodynamiska luftmotståndet är en väsentlig del av ett fordon's totala energiförbrukning oavsett vilket typ av drivmedel fordonet drivs med. Kommande mål för lägre bränsleförbrukning och minskade utsläpp av koldioxid ställer allt större krav på lågt luftmotstånd för såväl personbilar som tunga fordon, med bibehållen stabilitet och prestanda för övriga berörda egenskaper. Aerodynamik har förutom direkt koppling till energiförbrukning även mycket stark säkerhetspåverkan på ett fordon's högfartsstabilitet, sidvindskänslighet, samt handlingsegenskaper vid undanmanöver.

Förbättrad predikteringsnoggrannhet möjliggör utveckling och implementering av lösningar vilka sänker den certifierade bränsleförbrukningen, liksom av den av slutkunden upplevda förbrukningen. Projektet stödjer Volvo Cars mål om att uppnå 50% energieffektivisering till 2020 genom konkurrenskraftiga personbilar.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Projektet är unikt inom svensk fordonsindustri då Volvos vindtunnel är den enda aerodynamiska fullskalevindtunneln för fordonsutveckling i Sverige. Utvecklingen av kompetensen kring denna är nödvändig för att säkerställa att Sveriges kompetens inom området numerisk simulering av aerodynamik ligger i framkant och därigenom bidrar till att skapa förutsättningar för tids- och kostnadseffektiv utveckling av miljöanpassade, energieffektiva fordon. Projektet är samtidigt forskningstungt, eftersom avancerade fysiska mätmetoder tillämpas i en mättekniskt komplex och utmanande miljö, och då slutmålet är vidareutveckling av avancerad virtuella utvecklingsverktyg.

Projektet resulterade i ökad kunskap om strömnings- och gränsskiktsförhållanden i vindtunneln. Med denna kunskap som bas kommer nödvändiga förbättringar av strömningen i vindtunneln kunna föreslås, relaterade bl.a. till strömningen vid snedanblåsning förbättrad strömningssymmetri, lägre gränsskiktstillväxt, osv. En annan mycket viktig del av leveransen är en virtuell kopia av den fysiska vindtunneln, vilken kommer att möjliggöra en hög grad av korrelation mellan verktygen. Metodkunskapen kommer även till nytta för institutioner och övrig svensk industri med vindtunnelteknik. Detta är väsentligt i alla faser av produktutveckling, verifiering, förkortade ledtider, och ökad konkurrenskraft.

Resultaten kommer att öka noggrannheten i Volvos beräkningsmetoder, vilket utgör ett nödvändigt steg för att minimera antalet kostsamma fysiska prov. Förbättrade numeriska metoder möjliggör dessutom virtuell reproduktion av verkliga förhållanden vilka råder på väg, exempelvis transienta förlopp nödvändiga för korrekt optimering av fordonets handlingsegenskaper.

5 Mål

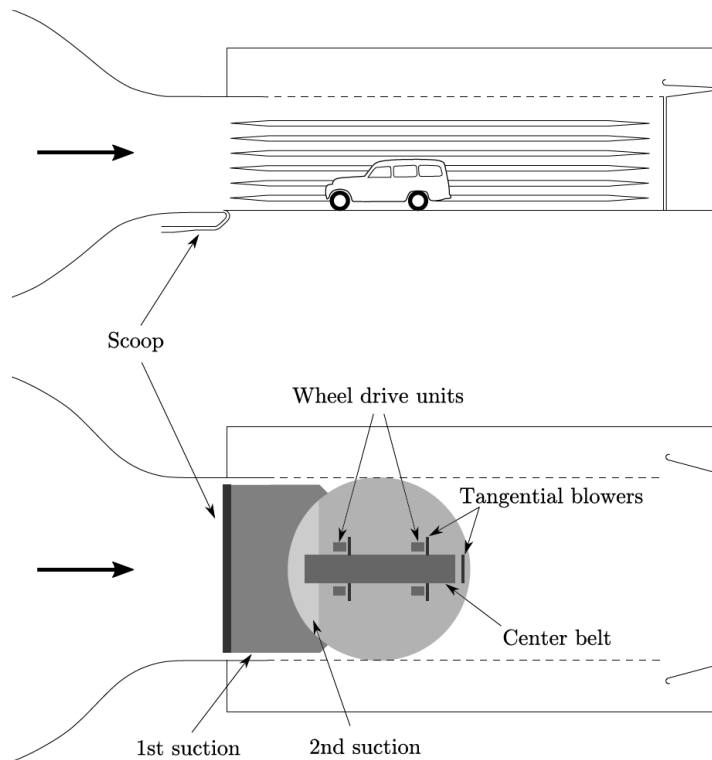
Målet med projektet är att vidareutveckla kompetens och metoder kopplade till aerodynamisk optimering av vägfordon. Specifikt handlar det om att skapa ny kunskap, eliminera brister i fysiska och numeriska metoder som är kopplade till utformningen och modelleringen av Volvos vindtunnel. Detta för att på kortare tid kunna utveckla miljö- och säkerhetsmässigt ännu bättre fordon, och successivt möjliggöra en vridning mot virtuell, och därmed kostnadseffektivare, utveckling och verifiering. Projektets slutsatser kommer att utgöra strategiskt viktiga grundstenar för en konkurrenskraftig svensk fordonsindustri.

Målsättningen är att utveckla båda verktygen, dvs. den fysiska och den virtuella vindtunneln, genom forskning inriktad på att identifiera och minimera skillnaderna mellan den fysiska verkligheten i vindtunneln och den virtuella avbildningen av densamma. Båda delar behöver utvecklas, eftersom de kompletterar varandra och kommer att användas i produktutvecklingsprocessen under överskådlig framtid.

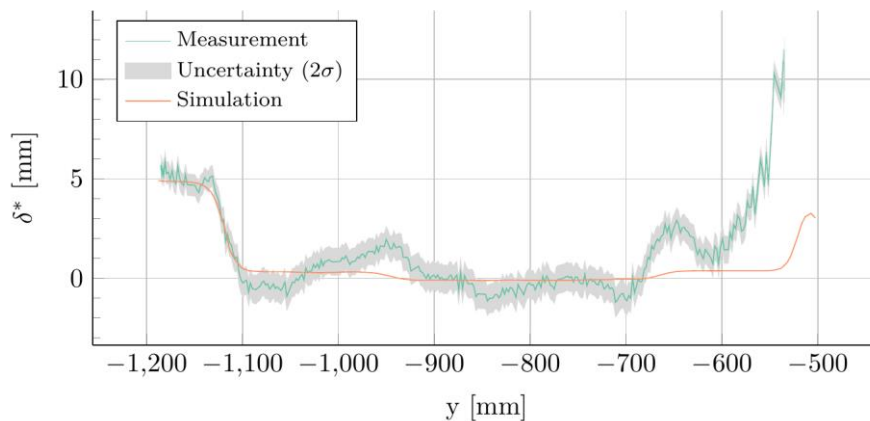
6 Resultat och måluppfyllelse

Projektet har resulterat i en förbättrad virtuell modell av Volvos fullskalevindtunnel samt utökad förståelse för strömningen i tunnelns testsektion och dess påverkan på de uppmätta aerodynamiska krafterna i linje med projektets målsättning.

För att validera den numeriska modellen har bland annat den longitudinella tryckfördelningen samt gränsskiktets utbredning uppmätts i den fysiska vindtunneln. Denna mätdata har använts för att kalibrera den virtuella modellen, med mycket goda resultat för gränsskiktsreduktionen från Tangential Blowers [2,7], ett av delsystemen i gränsskiktskontrollsystemet. Se även Figur 1, för utformning av gränsskiktskontrollen. Överensstämmelsen kan ses i Figur 2, vilken visar att såväl gränsskiktet utanför blowers påverkan ($y < -1150$ mm) samt området påverkat av tangential blowing ($y > -1150$ mm) överlag är välpredikerat i de numeriska simuleringarna. Dock avviker de uppmätta och simulerade profilerna från varandra kring $y = -950$ mm och $y = -650$ mm. Detta tros bero på luftläckage via springor kring de så kallade Wheel Drive Units (WDU), vars funktion är att driva hjulens rotation, som är monterade uppströms om Tangential Blowers. Samma fenomen, fast orsakat av springor kring centrumbältet som löper under bilen tros orsaka avvikelser i området $y > -600$ mm. Dessa springor är ej med i den numeriska modellen då detta skulle leda till kraftigt ökade simuleringskostnader.



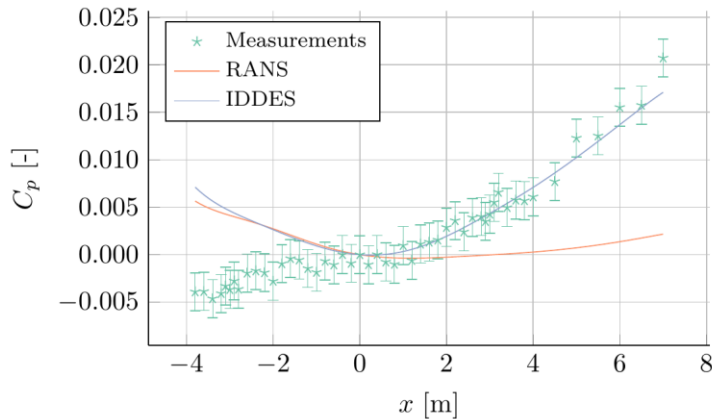
Figur 1: Layout av gränsskiktssystemet samt markeffektsimuleringen i PVT.



Figur 2: Uppmätt samt simulerad gränsskiktstjocklek bakom en av Tangential Blowers.

Vidare har den longitudinella tryckfördelningen använts för att för att bestämma vilken typ av turbulensmodellering som är lämplig att använda i de numeriska simuleringarna [3]. Figur 3 visar en jämförelse mellan mätdata och två olika turbulensmodeller; en stationär och därmed relativt billig i termer av datorkraft, samt en tidsupplöst och därmed ungefär tio gånger mer beräkningskrävande. Den potentiella vinsten i att utnyttja den tidsupplösta metoden är att den löser en större del av det turbulenta spektret, medan den stationära metoden modellerar all turbulens. Utifrån denna data är det uppenbart att tidsupplösta metoder krävs för att prediktera tryckutbredningen nedströms bilens position i vindtunneln ($x > 0$ m). Denna data har även använts för att förbättra simuleringen av Distributed Suction [1,3,7], vilket är ytterligare ett delsystem för gränsskiktssystemet. Som ses i Figur 3 är överensstämmelsen mellan tryckfördelningen i den virtuella modellen och de fysiska mätningarna fortfarande inte helt

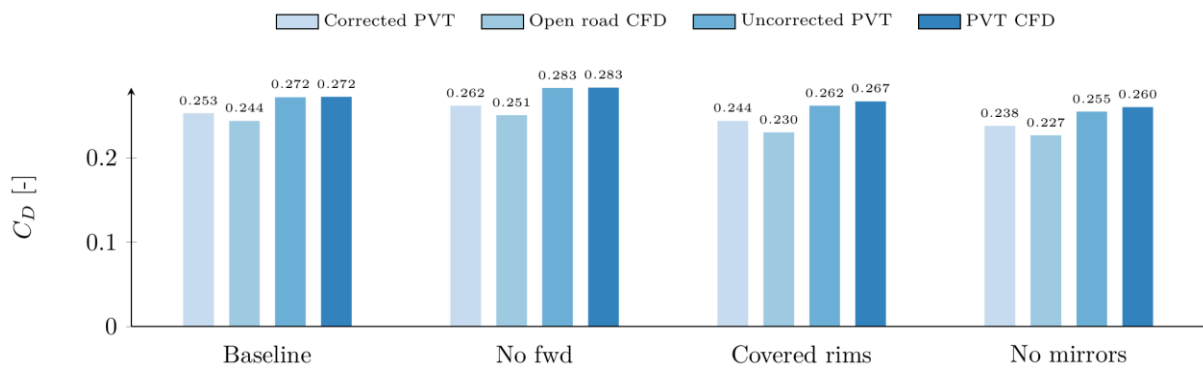
tillfredsställande i området $x < 0$ m. Tryckfördelningen i detta område är direkt påverkad av Distributed Suction, och avvikelserna mellan mät- och simuleringsdata tyder på att det finns potential för förbättring av den numeriska modelleringen av detta system [7].



Figur 3: Uppmätt samt simulerad longitudinell tryckfördelning i testsektionen. RANS är en stationär metod och IDDES en tidsupplöst dito.

För att kunna mäta flödesvinklar och homogenitet i flödet i tom testsektion har en ny så kallad Flow Measurement Rig konstruerats och införskaffats parallellt med projektet. Med denna nya utrustning har mätningar av mycket god noggrannhet kunnat genomföras [4], och två möjliga orsaker till uppkomsten av de flödesvinklar som förekommer i testsektionen har kunnat förkastas [5]. Genom att artificiellt öka dessa flödesvinklar och mäta krafter på en referensbil har det visats att dessa flödesvinklar med största sannolikhet inte har någon påverkan på de uppmätta krafterna [5]. Dessa mätningar har inte heller visat på några avvikelser från de krav som finns på flödesvinklar och homogenitet.

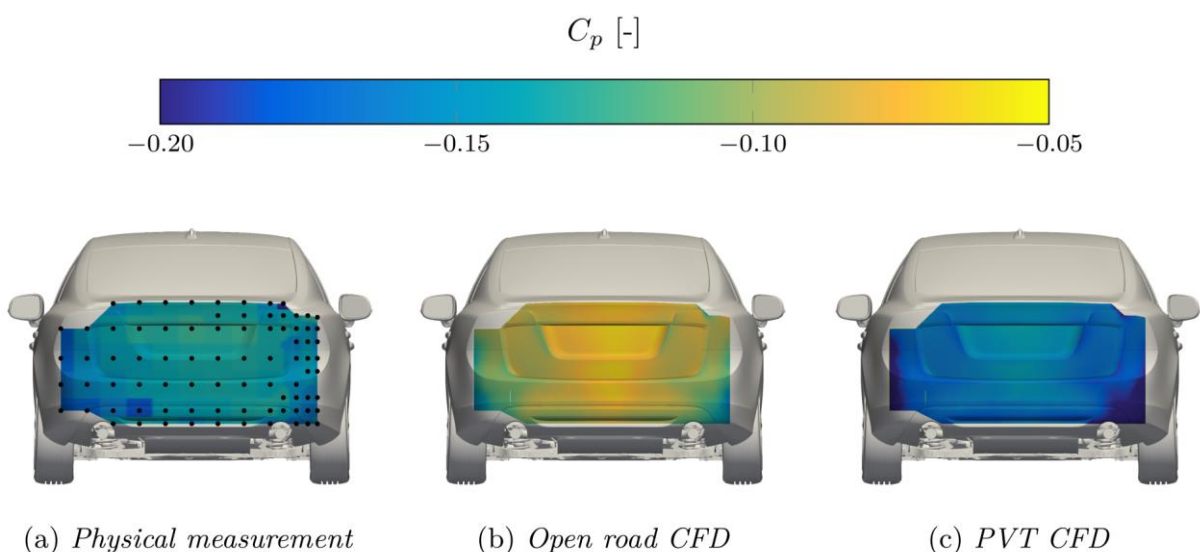
Genom att simulera två olika bilar i olika konfigurationer både i en rektangulär standarddomän samt i den virtuella vindtunnelmodellen, och sedan jämföra data med fysiska mätningar, har det visats att mycket god överensstämmelse kan fås mellan de två verktygen [6,7]. Detta kan ses i Figur 4, där mätdata som ej korrigerats för blockage (Uncorrected PVT) stämmer mycket väl överens med motsvarande numeriska simuleringar av bilen inne i vindtunnels testsektion (PVT CFD). Värt att notera är att blockagekorrigeringen som används för att korrigera för tunnelns inverkan på de fysiska mätningarna (Corrected PVT) inte leder till överensstämmelse med de blockagefria simuleringarna utförda i en rektangulär standarddomän (Open road CFD). Eftersom överensstämmelsen är god mellan okorrigerade mätdata och simuleringar av bilen i vindtunneln indikerar avvikelserna för den korrigerade data att korrektionsmetoden kan förbättras ytterligare med hjälp av numeriska simuleringar av vindtunneln.



Figur 4: Luftmotståndskoefficienten för en sedan i fyra olika konfigurationer uppmätt i vindtunneln (Corrected PVT respektive Uncorrected PVT) samt simulerat både i en standarddomän (Open road CFD) och i vindtunnelgeometrin (PVT CFD).

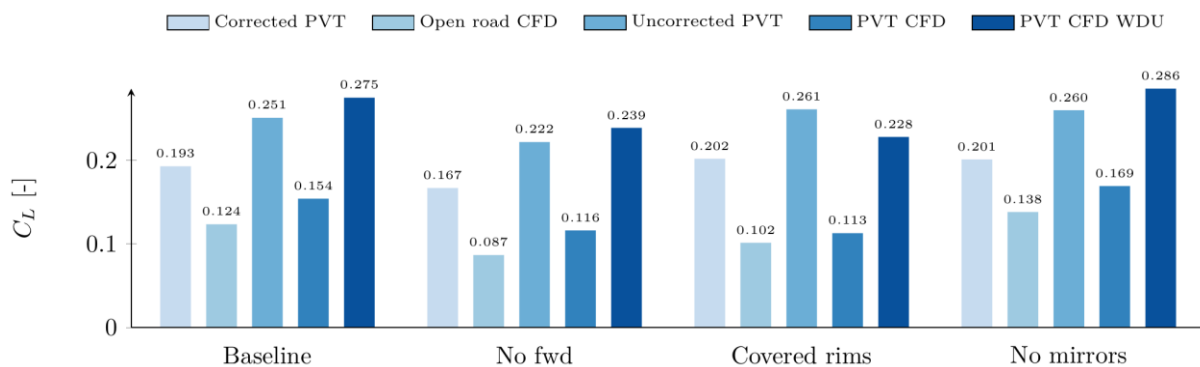
En förutsättning för att nå denna goda överensstämmelse är att stor hänsyn tas till att normalisera data från simuleringarna på samma sätt som mätdata, samt att den virtuella geometrirepresentation av bilen som används överensstämmer mycket väl med det fysiska provobjektet. Prediktionen för vissa fordonskonfigurationer fortfarande inte tillfredsställande, vilket härrörs till osäkerheter i den nämnda geometriska beskrivningen [7].

Huvudanledningen till att resultaten skiljer mellan de två simuleringsdomänerna är de ovan nämnda blockageeffekterna, vilka leder till högre strömningshastigheter kring bilen när den är placerad i vindtunneln jämfört med om den hade kört på väg. Detta leder i sin tur till att trycket kring bilen, bortsett från fronten, blir lägre i vindtunneln, vilket resulterar i ett större uppmätt luftmotstånd. I Figur 5 visas trycket på bilens bakände från fysiska mätningar i vindtunneln, såväl som från numeriska simuleringar i rektangulär standarddomän och med vindtunnelgeometrin som simuleringsdomän. Utifrån dessa resultat är det tydligt att tryckpredikteringen förbättras av att inkludera vindtunnelns domänen i simuleringarna, vilket stämmer väl överens med resultaten för krafterna i Figur 4.



Figur 5: Tryck på bilens bakände uppmätt i vindtunnel (a), simulerat enligt standardmetod (b), samt simulerat med vindtunneln som simuleringsdomän (c).

Som nämnt ovan används i den fysiska vindtunneln ett så kallat fembältesystem för att representera vägens relativa rörelse i förhållande till bilen. Detta system består av ett långt centerbälte som löper under bilen och fyra så kallade Wheel Drive Units (WDU), vilka är placerade under hjulen och driver rotationen av dessa. En viktig upptäckt från projektet är att god överensstämmelse i de predikterade lyftkrafterna på fordonet mellan virtuella simuleringar och fysisk provning i vindtunneln kräver att lyftkraften som induceras på WDU:erna tas med i simuleringarna, vilket annars resulterar i en kraftig avvikelse mot de uppmätta krafterna [6,7]. Detta kan ses i Figur 6, vilken visar att lyftkraften som verkar på bilen är kraftigt underpredikerad för båda simuleringsdomänerna, men förbättras avsevärt om bidraget från WDU:erna tas med i simuleringresultaten.



Figur 6: Lyftkraft för en sedan i fyra olika konfigurationer uppmätt i vindtunneln (Corrected PVT respektive Uncorrected PVT) samt simulerat både i en standarddomän (Open road CFD) och i vindtunnelgeometrin (PVT CFD), respektive inkluderande lyftkraften på Wheel Drive Units (PVT CFD WDU).

Resultaten av projektet ligger väl i linje med visionen för FFI Fordonsutveckling om att etablera världsledande metoder och verktyg för fordonsutveckling. Detta genom att projektet resulterat i en virtuell modell av vindtunneln som visats vara kapabel till utmärkt överensstämmelse med fysiska mätningar.

7 Spridning och publicering

7.1 Kunskaps- och resultatsspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	x	Numeriska modeller vilka används inom VCC har uppdaterats baserat på projektets slutsatser
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	x	Numeriska modeller vilka används i pågående forskningsprojekt har uppdaterats baserat på projektets slutsatser
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	x	Resultat från projektet har redan infogats i utvecklingsprocesser på Volvo Cars vilka används dagligdags.
Introduceras på marknaden		
Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut		

7.2 Publikationer

- [1] Emil Ljungskog, Simone Sebben, Alexander Broniewicz, och Christoffer Landström. "A Parametric Study on the Influence of Boundary Conditions on the Longitudinal Pressure Gradient in CFD Simulations of an Automotive Wind Tunnel". *Journal of Mechanical Science and Technology* 31, nr 6 (01 juni 2017): 2821–27. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0525-2>.
- [2] Emil Ljungskog, Simone Sebben, Alexander Broniewicz, och Christoffer Landström. "On the Effects of Wind Tunnel Floor Tangential Blowing on the Aerodynamic Forces of Passenger Vehicles". *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems* 10(2) (2017): 591–99. <https://doi.org/10.4271/2017-01-1518>.
- [3] Emil Ljungskog. "Investigations of Flow Conditions in an Automotive Wind Tunnel". Licentiatavhandling, Chalmers Tekniska Högskola, 2017. <http://publications.lib.chalmers.se/publication/249000-investigations-of-flow-conditions-in-an-automotive-wind-tunnel>.
- [4] Emil Ljungskog, Simone Sebben, och Alexander Broniewicz. "Uncertainty Quantification of Flow Uniformity Measurements in a Slotted Wall Wind Tunnel". I *SAE Technical Paper 2019-01-0656*, 2019. <https://doi.org/10.4271/2019-01-0656>.
- [5] Emil Ljungskog, Simone Sebben, och Alexander Broniewicz. "Flow Angularity Investigations in an Automotive Slotted Wall Wind Tunnel". *Energies* 12, nr 23 (januari 2019): 4575. <https://doi.org/10.3390/en12234575>.
- [6] Emil Ljungskog, Simone Sebben, och Alexander Broniewicz. "Inclusion of the physical wind tunnel in vehicle CFD simulations for improved prediction quality." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 197 (2020): 104055. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.104055>
- [7] Emil Ljungskog. "Evaluation and Modeling of the Flow in a Slotted Wall Wind Tunnel". Doktorsavhandling, Chalmers Tekniska Högskola, 2019. <https://research.chalmers.se/en/publication/514006>.

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Projektet har bidragit till förbättrad korrelation mellan virtuella simuleringar och fysiska vindtunnelmätningar genom att visa att utmärkt överensstämmelse är möjlig om hänsyn tas till att normalisera simuleringsdata på samma sätt som fysisk mätdata, och att geometribeskrivningen av det virtuella provobjektet matchar det fysiska.

För att prediktionen av lyftkrafter på bilen skall stämma överens mellan fysisk mätning och simulering är det av yttersta vikt att ta hänsyn till mätupställningen i den fysiska vindtunneln och inkludera samtliga krafter som mäts. Detta gäller speciellt för de så kallade Wheel Drive Units, vilka utsätts för en lyftkraft som i den fysiska tunneln attribueras till bilen. Genom att ta med dessa krafter i de numeriska simuleringarna förbättrades lyftprediktionen avsevärt.

De numeriska metoder som används för strömningssimulering har i projektet förbättrats genom validering mot fysiska mätningar, både med och utan fordon i vindtunneln. I projektet har visats att moderna metoder som löser upp större delar av det turbulenta spektret är nödvändiga för att nå acceptabel överensstämmelse mellan den numeriskt predikterade och den fysiskt uppmätta strömningen i vindtunneln.

De mätningar och datorsimuleringar som genomförts i projektet har ej påvisat några signifikanta brister i strömningen i vindtunnels testsektion. Genom att introducera artificiella störningar i flödet i testsektionen har det visats att tidigare kända flödesvinklar med stor sannolikhet ej har en påverkan på mätkvaliteten i vindtunneln.

För fortsatt forskning rekommenderas ytterligare virtuella simuleringar av fler fordon för att öka konfidensen i metoden. Vidare bör ytterligare simuleringar och mätningar ske vid snedanblåsning för att förbättra förståelsen för vindtunnels inverkan på sådana mätningar.

Vidare kan den framtagna virtuella modellen användas för att förbättra de korrektionsmetoder som används för att korrigera fysiska mätdata för interferenseffekter mellan vindtunneln och provobjektet.

9 Deltagande parter och kontaktpersoner

Chalmers Tekniska Högskola
Prof. Simone Sebben

Volvo Cars
Alexander Broniewicz

