

Slutrapport för ETTaero2

Aerodynamisk utformning av tunga timmer- och flisfordon

Matts Karlsson, Linköpings universitet

Henrik von Hofsten, Skogforsk

Daniel Noreland, Skogforsk

Petter Ekman och Sadegh Fattahi, Linköpings universitet



Exempel på en enkel variant av aerodynamisk konfiguration som testats i projektet. Sidokjolarna på släpet är gjorda i ett eftergivligt plastmaterial som inte tar skada av yttre påverkan.

Innehåll

Förord	3
Summary	4
Sammanfattning	6
Ordförklaringar	8
Introduktion	9
Mål med projektet	11
Material och metod	12
Från vindtunnel till numeriska beräkningar	13
Validering av beräkningsmetoder	16
En virtuell vindtunnel	20
Ett applikationsexempel	21
Resultat	24
Den virtuella vindtunneln använd för konceptanalys	33
Kranar och extrautrustning	37
Flyttbara bankar och stakar	38
Praktiska körprov	39
Studieresultat	40
Slutsatser av ETTaero2	41
Referenser och litteratur	43



Uppsala Science Park, 751 83 Uppsala
skogforsk@skogforsk.se
skogforsk.se

Kvalitetsgranskning (Intern peer review) har genomförts 14 juni 2022 av Gert Andersson, Programchef. Därefter har Magnus Thor, Forskningschef, granskat och godkänt publikationen för publicering den 28 juni 2022.

Redaktör: Anna Franck, anna@annafranck.se
©Skogforsk 2022 ISSN 1404-305X

Förord

Denna rapport utgör slutrapporteringen av projektet ”ETTAero2 – Aerodynamisk utformning av tunga timmer- och flisfordon”. Projektet, som vid planeringen utgjorde en direkt fortsättning på förstudien ETTaero, var från början tänkt att ta förstudiens mycket preliminära resultat och omsätta dessa till praktiskt genomförbara prototyper att testa på verkliga fordon.

Projektet har kantats av svårigheter på många olika sätt och dragit ut på tiden bland annat på grund av att den vid planeringen befintliga vindtunneln togs ur bruk och därmed ändrade förutsättningarna radikalt. På grund av detta genomfördes en omfattande kursomläggning men med slutmålet intakt: att utveckla en virtuell vindtunnel avsedd för just denna typ av fordon och skapa förutsättningar för att testa nya koncept i form av simuleringar, i stället för skalmodeller i en vindtunnel, och därefter testa dessa i verkliga vägprov. Man skulle kunna säga att ETTaero2 på detta sätt blev ETTaero2.1 – en annan väg till målet men med ett bestående värde i de kunskaper och verktyg som kommit fram längs vägen.

Efter många vedermödor är vi framme vid slutet på projektet. Vi har utvecklat, verifierat och validerat den virtuella vindtunneln, testat mängder med koncept och testat några av dessa på det rullande demonstrationsfordonet med god framgång.

Vi vill tacka alla inblandade i projektet: Scania, ExTe, Parator, MT Maskin och Truck, BergsFegen, Landberg Solutions, Fröjds Åkeri i Kisa AB, Södra samt Göranssons åkeri som bidragit med kunskap, utrustning, personal och resurser i olika faser i projektet. Dessutom vill vi rikta ett tack till PLS och Alfredssons Åkeri för gott samarbete i teknikstudien. Utan ett genuint deltagande och intresse från många av projektparterna hade detta projekt aldrig gått att genomföra.

Slutligen vill vi tacka Energimyndigheten som genom VINNOVA och FFI finansierat projektet.

Prof. Matts Karlsson
Linköpings universitet
Projektledare

Summary

In Sweden, there are about 2,000 timber trucks that carry out transport work equivalent to six billion tonne-kilometers every year. For one tonne-kilometer, a truck consumes about 0.025 liters of diesel, which means that each reduced percentage in fuel consumption means very large savings of diesel on an annual basis, with a corresponding reduction in CO₂ emissions as well as other emissions.

Preliminary studies have shown that it may be possible to reduce this consumption by 10–20 percent by introducing several measures where aerodynamic optimization is one. Timber vehicles make up a small proportion of all the lorries on our roads, but on the other hand, these vehicles form a homogeneous group with a number of very specific requirements and challenges such as frequent empty driving due to lack of back hauling possibilities, difficult climatic conditions and the fact that a complete timber truck is created by a number of different, often small, companies who deliver "their" part to form a complete truck with trailer.

The purpose of the project has been to investigate, develop, test, and verify the aerodynamic design of timber and wood chip vehicles that are heavier and longer than today's vehicles and to study possibilities to implement modifications to existing vehicles. The goal was to reduce fuel consumption by 10 percent.

Total reduced fuel consumption has been used as the main parameter, i.e., the stipulated 10 percent is stated for an entire trip (loaded and unloaded vehicle, round trip). Any optimization of the unladen vehicle must not lead to unwanted deterioration of the aerodynamics of the loaded vehicle and vice versa.

By being able to iterate between simulation and driving tests, it is possible to find the level of aerodynamic design that is suitable in the different cases. If these are different for driving loaded and empty, the need arises to find the "optimal compromise".

The biggest change within the project was that instead of being dependent on an external wind tunnel, focus was placed on building a virtual wind tunnel using CFD (Computational Fluid Dynamics) and at the same time ensuring that it becomes an, in principle, automatic tool where a few keystrokes can generate a good answer. This development has been possible thanks to several factors. There has been an enormous development in terms of simulation tools and an equally large and accelerating development in terms of computer power.

By using the virtual wind tunnel to perform large amounts of calculations and then planning for a small number of relevant and selected wind tunnel tests, the two resources are utilized in an optimal way.

With the CFD platform, we can not only calculate the aerodynamic forces, the flow field, and many other parameters. We can also divide the aerodynamic drag to analyze all different parts of the vehicle separately. In this way, certain components can be studied and their contributions to the whole vehicle can be analyzed e.g., by studying their effects at different head-wind angles.

Summarizing the results of the project, we can point to three different parts: the virtual wind tunnel, a reduced (minimalist) aerodynamic kit that is easy to assemble and put into operation and finally a detailed description of a comprehensive and optimized aerodynamic configuration that reaches the set goal of the project.

A large part of the project has been spent on creating the virtual wind tunnel that contains all parts; we have developed a reference car, equipped with a reference load, on which different types of modifications can be placed, an automated method of making the necessary calculations for a pre-specified number of crosswind directions and extract relevant parameters for evaluation. Basically, four configurations will always be compared: loaded/unloaded and with/without aero kit.

In order to test the developed concepts, an aero-kit was created, which is mounted in the form of a skirt package on the trailer of the demonstrator vehicle used to carry out road tests. The results are very promising, and it is found that the results of the virtual wind tunnel correspond well with the data from the road tests.

To develop a holistic concept, an extensive calculation campaign was carried out, with the result completely in line with the project's goals. These extensive changes to the vehicle's geometry have been limited to a type that can be implemented on a real vehicle.

In summary, it can be stated that the project goals have been achieved, although along a different path, and that the virtual wind tunnel means that a foundation has been laid for future development projects in the forest transportation sector.

Sammanfattning

I Sverige finns cirka 2 000 timmerfordon som varje år utför ett transportarbete motsvarande sex miljarder tonkilometer (tonkm). För en tonkm går det åt cirka 0,025 liter diesel, vilket innebär att varje minskad procent i bränsleförbrukning betyder mycket stora besparingar av diesel på årsbasis, med motsvarande minskning av CO₂-utsläpp och andra emissioner. Preliminära studier har visat att det kan finnas möjlighet att minska denna förbrukning med 10–20 procent genom att införa ett antal åtgärder där aerodynamisk optimering är en. Timmerfordon utgör en liten del av alla de lastfordon som trafikerar våra vägar, men å andra sidan utgör dessa fordon en homogen grupp behäftad med ett antal mycket specifika krav och utmaningar såsom tomkörning halva tiden, svåra klimatförhållanden och krävande vägförhållanden samt det faktum att ett komplett timmerfordon skapas genom att ett antal olika, ofta mindre, företag levererar ”sin” del för att forma en helhet.

Syftet med projektet har varit att undersöka, utveckla samt testa och verifiera aerodynamisk utformning av timmer- och flisfordon som är tyngre och längre än dagens fordon samt att studera möjligheter att genomföra enklare modifieringar på befintliga fordon. Målet är att minska bränsleförbrukningen med tio procent.

Totalt minskad bränsleförbrukning har använts som huvudparameter, det vill säga de stipulerade tio procenten anges för en hel körning (lastat och olastat fordon, tur och retur). En eventuell optimering av det olastade fordonet får inte leda till oönskade försämringar på det lastade fordonet och vice versa.

Genom att kunna iterera mellan simulering och körprov kan man att på ett enkelt sätt finna den nivå på aerodynamisk utformning som är lämplig i de olika fallen. Om dessa är olika för körning med och utan last uppstår behovet av att hitta den ”optimala kompromissen”.

Den största förändringen inom projektet var att i stället för att vara beroende av en extern vindtunnel bygga upp en virtuell vindtunnel med hjälp av CFD (Computational Fluid Dynamics) och samtidigt se till att den blir ett i princip automatiskt verktyg där ett fåtal knapptryck kan generera ett bra svar. Att denna utveckling skulle vara möjlig har påverkats av flera faktorer, framför allt av att det har skett en enorm utveckling vad gäller simuleringsverktyg och en lika stor, och accelererande utveckling när det gäller datorkraft.

Genom att utnyttja den virtuella vindtunneln för att genomföra stora mängder beräkningar och dessutom planera ett mindre antal relevanta och utvalda vindtunnelprov kan man utnyttja de båda resurserna optimalt.

Med CFD-plattformen kan man beräkna de aerodynamiska krafterna, flödesfältet och många andra parametrar. Man kan även dela upp luftmotståndet så att det kan tas fram för alla olika delar var för sig. På detta sätt kan man i detalj studera hur en viss komponent bidrar till helheten men även studera hur den påverkar vid olika anblåsningsvinklar.

Om man sammanfattar resultaten från projektet kan man peka på tre olika delar:

- den virtuella vindtunneln,
- ett reducerat (minimalistiskt) aerodynamiskt kit som är enkelt att montera och sätta i drift samt

- en detaljerad beskrivning av en omfattande och optimerad aerodynamisk konfiguration som når det uppsatta målet.

En stor del av tiden inom projektet har ägnats åt att skapa den virtuella vindtunneln som innehåller alla delar från ax till limpa: vi har utvecklat en referensbil, försedd med en referenslast, på vilken olika modifieringar kan placeras, en automatiserad metod för att göra de nödvändiga beräkningarna för ett i förväg angivet antal sidvindriktningar samt extrahera relevanta parametrar för utvärdering. I grunden kommer alltid fyra konfigurationer att jämföras: lastad/olastad samt med/utan aero-kit.

I syfte att testa de framtagna koncepten skapades ett aero-kit som placeras i form av ett kjolpaket på släpet till demonstrationsfordonet, vilket sedan användes för att genomföra vägprov. Resultaten är mycket lovande och man finner att den virtuella vindtunnelns resultat överensstämmer väl med data från vägproven.

För att ta fram ett helhetskoncept genomfördes en omfattande beräkningskampanj vars slutresultat ligger helt i linje med projektets mål. Dessa omfattande förändringar av fordonets geometri har begränsats till den typ som kan implementeras på ett verkligt fordon.

Sammanfattningsvis kan konstateras att projektmålen nåtts om än längs en annorlunda väg och att den virtuella vindtunneln innebär en framtidssäkring för kommande utvecklingsprojekt inom området skogliga transporter.

Ordförklaringar

I rapporten används frekvent att antal förkortningar och enheter kopplade till aerodynamik och beräkningarna kring det. Nedan följer kortfattade beskrivningar av vad som avses.

När det gäller olika typer av beräkningar används olika typer av turbulensmodeller. Själva sättet att beräkna flödesfältet kallas **CFD, Computational Fluid Dynamics**, och innebär att man delar in fluid-domänen i ett mycket stort antal beräkningsceller och löser Navier-Stokes strömningsmekaniska ekvationer för var och en av dessa celler. Problemet är icke-linjärt, mycket svårt att lösa och kräver i allmänhet en superdator. För att kunna räkna ut hur strömningen beter sig även om den är turbulent behövs en turbulensmodell. Inom projektet har vi använt RANS, DES och LES.

RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) modeller innebär att all turbulens modelleras.

DES (Detached Eddy Simulation) är en intressant metod och innebär att man använder LES ute i själva flödet (friströmmen) medan man använder RANS inne vid ytan på fordonet.

LES (Large Eddy Simulation) innebär att man löser upp (faktiskt beräknar) de största virvlarna.

DNS (Direct Numerical Simulation) används i extremfallet och innebär att man löser upp i princip alla virvlar men det fungerar idag bara för kraftigt förenklade geometrier vid låga hastigheter och används uteslutande i ren forskning.

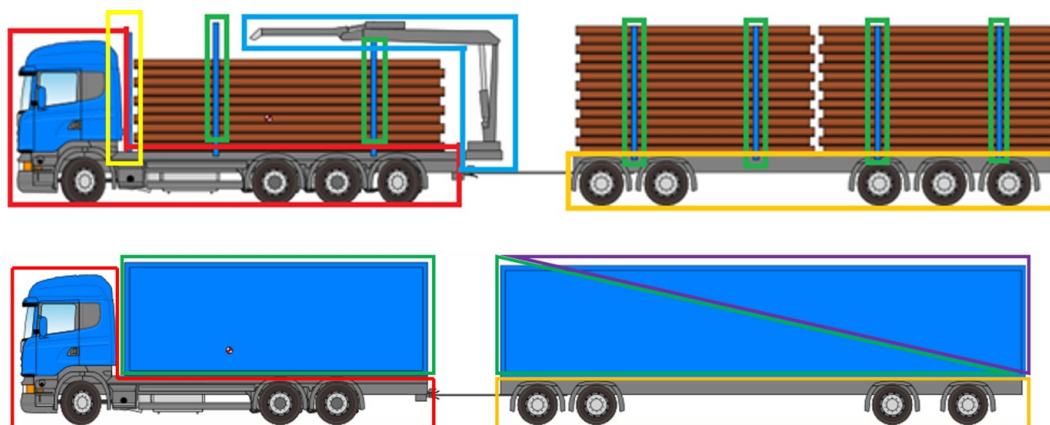
För resultat används värden som beskriver tryck och luftmotstånd. I fallet tryck redovisas **tryckkoefficienten C_p** som beräknas som det statiska trycket minus atmosfärstrycket delat med det dynamiska friströmstrycket. I figurerna är en tryckkoefficient på noll grön, medan ett undertryck går mot blått och ett övertryck går mot rött. I vissa fall finns figurer med en lila yta och där är det tryckkoefficienten lika med noll som visas. Denna lila yta används för att snabbt och enkelt visa ett snapshot av hur det ser ut.

På liknande sätt kan man få fram **luftmotståndskoefficienten C_d** genom att dela luftmotståndskraften med det dynamiska friströmstrycket gånger arean.

Introduktion

Syftet med projektet var att undersöka, utveckla samt testa och verifiera aerodynamisk utformning av timmer- och flisfordon som är tyngre och längre än dagens fordon. Dessutom avsåg ansökan att studera möjligheter att genomföra enklare modifieringar på befintliga fordon. Målet är att minska bränsleförbrukningen med tio procent.

De 2 000 timmerlastbilar som finns i Sverige utför varje år ett transportarbete motsvarande sex miljarder tonkilometer (tonkm). För en tonkm går det åt cirka 0,025 liter diesel vilket innebär att varje minskad procent i bränsleförbrukning betyder mycket stora besparingar av diesel på årsbasis, med motsvarande minskning av CO₂-utsläpp och andra emissioner. I ett internationellt perspektiv kan man se att det finns mycket stor besparingspotential både vad gäller drivmedel och CO₂-utsläpp och att det skulle finnas möjlighet att minska denna förbrukning med 10–20 procent genom att införa en stor mängd åtgärder där aerodynamisk optimering är en. Trots denna potential finns det förvånansvärt lite gjort inom området. För klassiska lastfordon finns däremot en stor mängd referenslitteratur. En tänkbar förklaring är att timmerfordon trots allt utgör en liten del av alla de lastfordon som trafikerar våra vägar, men å andra sidan utgör dessa fordon en homogen grupp behäftad med ett antal mycket specifika krav och utmaningar såsom tomkörning halva tiden, svåra klimat- och vägförhållanden och det faktum att en komplett timmerbil skapas genom att ett antal olika, ofta mindre, företag levererar "sin" del för att forma en helhet (Figur 1).



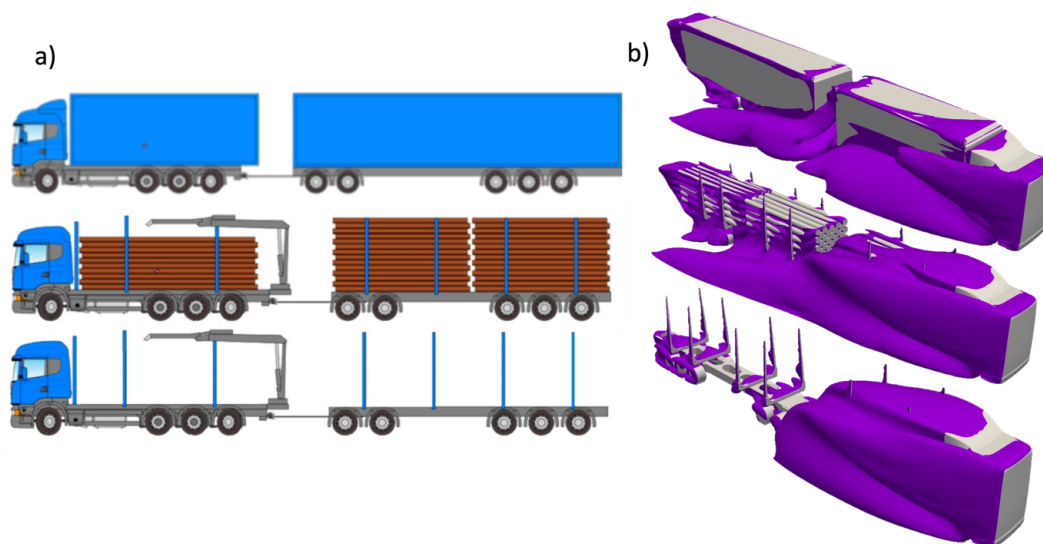
Figur 1: Rundvirkesfordon och flisfordon med de olika delsystemleverantörernas bidrag markerade med färgade boxar.

För ett nytt timmerfordon (transport av rundvirke) kan så många som fem olika tillverkare vara inblandade. Först en tillverkare av själva lastbilen (röd ram) som dock levereras utan någon påbyggnad. Därefter behövs chassit till släpfordonet (gul ram). Slutligen ska det till en påbyggnad för att göra fordonet komplett, vilket ofta (men inte alltid) görs av en och samma påbyggare, som levererar och monterar stakar, bankar, framstam och kran. Stakarna (grön ram) stöttar rundvirket på lasset och är i regel fastmonterade (ej fällbara) för att nå tillräcklig stabilitet. Detta faktum utgör en speciell aerodynamisk utmaning vid tomkörning. I vissa fall väljer åkaren att köpa de olika delarna från olika påbyggare (gul, grön, respektive blå ram). För flisfordon (transport av bränsle- och cellulosaflis) är principen densamma även om dessa sällan utrustas med kran. Lastbil, vagnschassi och skåp kan komma från olika leverantörer. I båda fallen handlar det om att det kompletta fordonet i slutänden är produkten av en komplicerad

systemintegration där det är oklart vem som verkligen kan påverka helheten – till syvende och sist blir det upp till beställaren att ta ansvar för att det blir en funktionell produkt.

Skogsbruket är en betydande arbetsgivare i glesbygd och basen för den nationalekonomiskt viktiga skogsindustrin. Den är också konkurrensutsatt på en global marknad. Långa avstånd mellan skog och industri ställer höga krav på effektiva transporter. Transporten från skogsbilväg till industri står för drygt 25 procent av den totala kostnaden för att få träden från stubben till industrin och utgör därmed en betydande kostnad för Sveriges skogsindustrier vad gäller anskaffning av råvara. För att skogsindustrins produkter ska kunna vara konkurrenskraftiga mot andra branscher i en globaliserad värld krävs effektivare och billigare transporter. Vid körning i 80 km/h med lastbil motsvarar luftmotståndet cirka hälften av det totala motståndet där den andra stora faktorn är rullmotståndet. Varje förändring inverkar stort på bränsleförbrukningen och därmed emissionerna. Utöver den utveckling som lastbilstillverkarna driver mot mjuka och rätt avvägda former på själva bilarna finns nu effektiva tillbehör som märkbart förbättrar aerodynamiken. Det handlar exempelvis om takspoiler med vindavvisare som leder luftströmmen upp över förarhytten och släpet, sidluftriktare, med samma uppgift från hyttsidor och ut till släp, samt chassijolar mellan hjulen.

Inom ramen för den omställning till en hållbar energiproduktion som pågår i Sverige finns även ett ökande behov av flistransporter. Dessa fordon har en hel del gemensamt med timmerfordonen så till vida att de alla behöver ha en hög kapacitet, de färdas relativt långa avstånd och de kör tomma uppemot hälften av tiden. Samtidigt finns givetvis en viktig skillnad ur aerodynamisk synpunkt då flisbilarna i princip ser likadana ut i båda riktningarna. Figur 2 visar hur tryckkoefficienten breder ut sig kring ett flisfordon respektive lastat och olastat timmerfordon. Notera att det lastade timmerfordonet och flisfordonet får snarlika utseenden på tryckkoefficienten.



Figur 2. Vänster: Generell uppbyggnad av flisfordon samt lastat och olastat rundvirkesfordon. Höger: Trycktältet runt de tre fordonstyperna. Bilden visar isoytan där tryckkoefficienten är noll.

Mål med projektet

Projektets mål var att med hjälp av genomtänkt aerodynamik utforma skogstransportfordon som kan minska bränsleförbrukningen med upp till tio procent.

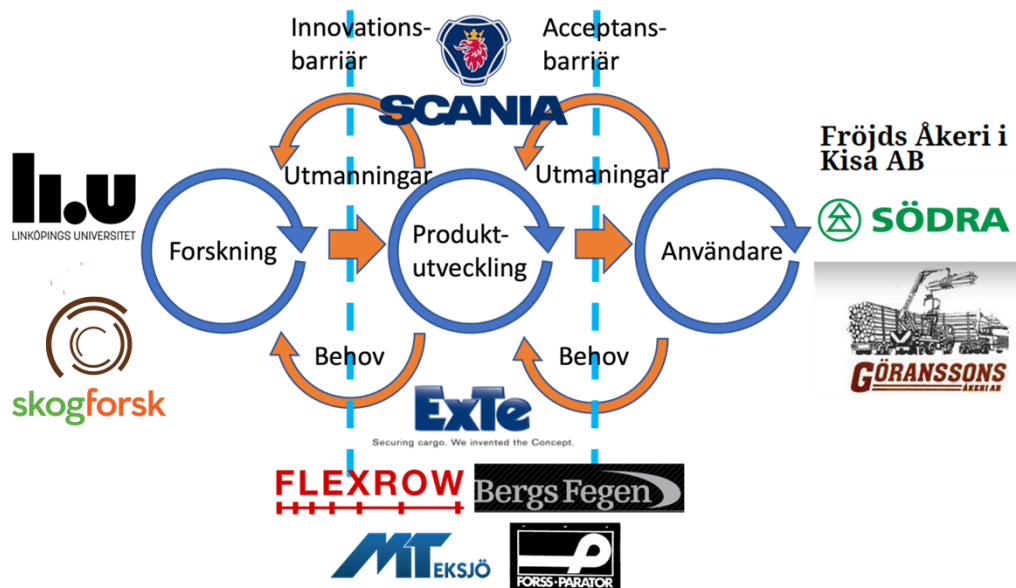
För att kunna uppnå projektets mål att verifiera och validera minskningar i bränsleförbrukning var den allra viktigaste uppgiften inhämtningen av data kring bränsleförbrukning och funktionalitet genom driftsuppföljning av fordon i produktion. Studierna kan då ge svar på hur mycket bränsle som kan sparas som en konsekvens av den aerodynamiskt anpassade extrautrustningen och hur användarvänlig denna extrautrustning är. Det finns exempelvis praktiska komplikationer som att spill vid lastning orsakar problem eller att delar lätt går sönder. Andra viktiga aspekter var om det går att observera några säkerhetsmässiga risker. Denna del av projektet har möjliggjorts genom insamling av såväl kvantitativa data som bränsleförbrukning men också kvalitativa data som hur föraren upplever funktionaliteten i extrautrustningen.

Totalt minskad bränsleförbrukning har använts som huvudparameter, det vill säga de stipulerade tio procenten anges för en hel körning (lastat och olastat fordon, tur och retur). Denna helhetsparameter är mest relevant eftersom en uppdelning i exempelvis lastad/olastad inte ger en komplett bild av hur fordonet verkligen körs. Det är ändå intressant att studera de olika delmomenten för att kunna se för vilken av momenten det är enklast att skapa en aerodynamisk förbättring. En eventuell optimering av det olastade fordonet får inte leda till oönskade försämringar på det lastade fordonet och vice versa.

Genom att kunna iterera mellan simulering och körprov kan man att på ett enkelt sätt finna den nivå på aerodynamisk utformning som är lämplig i de olika fallen. Om dessa är olika för körning med last och tomkörning uppstår behovet av att hitta den ”optimala kompromissen”. Man kan inte nog understryka vikten av körprov, dels för att kunna hantera verkliga vägförhållanden vad gäller till exempel varierande sidvind, dels effekter från olika årstider, som i sig inte påverkar aerodynamiken men däremot hur vägbanan ser ut. Alla parametrar som påverkar resultatet uppkommer i produktionen och därför är det viktigt att i alla olika utvecklingssteg försöka fånga upp så många parametrar som möjligt. Ett exempel på detta är att samtliga simuleringar som körts genomförts med ett antal olika sidvindssvep för att dels se effekten av sidvind, dels kunna studera effekter från asymmetriska objekt, såsom kranen.

Material och metod

Arbetsmodellen innehåller två barriärer, dels en innovationsbarriär, dels en acceptansbarriär. I Figur 3 är de olika parterna inplacerade på en position som närmast beskriver hur respektive partner verkar inom projektet. I ett projekt av föreliggande karaktär är det i själva verket så att alla parter från och till återfinns i det kreativa samtal som uppstår i den centrala cirkeln *Produktutveckling*. Detta beror på att produktutveckling befinner sig mellan de två barriärerna för innovation och acceptans, vilket i praktiken innebär att det är just här som möjligheter och begränsningar möter utmaningar, behov och önskemål. Det har visat sig att trots det stora antalet deltagare i projektet har detta varit en fruktsam arbetsform, delvis beroende på det faktum att det finns flera aktörer inom projektet som har en bredare roll. Exempelvis verkar Scania inom såväl forskning som produktutveckling, medan Skogforsk har en väletablerad direktkontakt med användarna. Dessutom arbetar användarna i detta projekt hela tiden med ständiga förbättringar på alla nivåer. Således ger figuren i viss mån en bild av distinkta och tydliga roller, medan det i realiteten är ett omfattande teamwork som ligger bakom projektet och dess resultat.

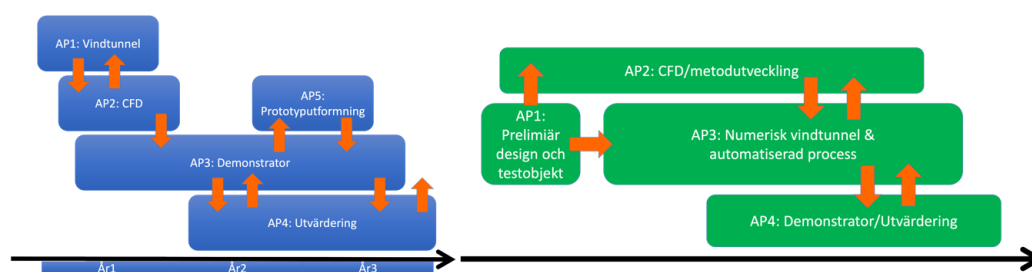


Figur 3. Arbetsmodellen som etablerats inom ETTaero2 där olika intressenter har sin relativa huvudplacering och samverkar i en helhet med data-/informationsutbyte. De två barriärerna ger en möjlighet att kvantifiera data-/informationsbehovet och kvalitetssäkra detsamma.

Med utgångspunkt i förstudien ETTaero, som till sin helhet genomfördes i en vindtunnel i Bromma, planerades ETTaero2 som en direkt fortsättning. Genom att använda det material som framkom inom ETTaero, och med en efterföljande analys av dessa data, var det tämligen enkelt att planera för en eller några ytterligare mer detaljerade studier i vindtunneln. Syftet med dessa studier var att dels använda en mer förfinad och korrekt modell av fordonet, som kunde förses med olika aerodynamiska detaljer i rätt skala och med rätt toleranser, dels att genomföra en eller flera kampanjer i syfte att skaffa fram referensdata för kommande CFD-modellutveckling. Dessa båda moment skulle ligga till

grund för framtagande av en demonstrator (prototypformning med hjälp av validerad CFD) och därtill en utvärderingsfas innefattande vägprov.

En rad omständigheter utanför projektets påverkan medförde att vindtunneln lades ner för aerodynamiska studier, samtidigt som en förändring av några av de ingående parternas intressen och/eller engagemang inträffade. Tillsammans med en viss personalomsättning påverkade det projektets förmåga att genomföras i enlighet med den första planen, varför en omfattande omställning av projektet genomfördes. Projektets grundläggande mål kvarstod dock men såväl metodfokus som genomförandetid fick ändras. Genom att fokusera på CFD som metod för aerodynamiska analyser krävdes ett omfattande validerings- och verifieringsarbete, vilket påverkat tiden för att genomföra och avsluta respektive delsteg inom projektet. Samtidigt har det skapat ett avsevärt utökat behov av kompetens- och metodutveckling.



Figur 4. Den vänstra figuren visar det planerade arbetsflödet medan den högra visar en schematisk representation av det reviderade arbetsflödet när det stod klart att en ändring från vindtunnel till virtuell vindtunnel var nödvändig.

Den största förändringen inom projektet var att lämna beroendet av en extern vindtunnel för att i stället fokusera på att bygga upp en virtuell vindtunnel med hjälp av CFD och samtidigt se till att den blev ett i princip automatiskt verktyg där ett fåtal knapptryck kan generera ett bra svar. Nu är det inte riktigt så enkelt. I rapporten kommer vi att presentera dels vägen dit, något om funktionalitet och framtidssäkring, dels de resultat avseende aerodynamisk utformning av fordon för skogliga transporter som framkommit. Dessa resultat ligger i linje med det som fanns i den initiala planeringen och dessutom har en del nya områden tillkommit längs vägen.

I och med man inte bara fortsatt med samma teknik som förstudien använt kan man i praktiken säga att ETTaero2 snarare representerar ETTaero2.1. En för området helt ny och utmanande teknik har utvecklats och tillämpats, vilket bidragit till att ett stort kliv framåt tagits.

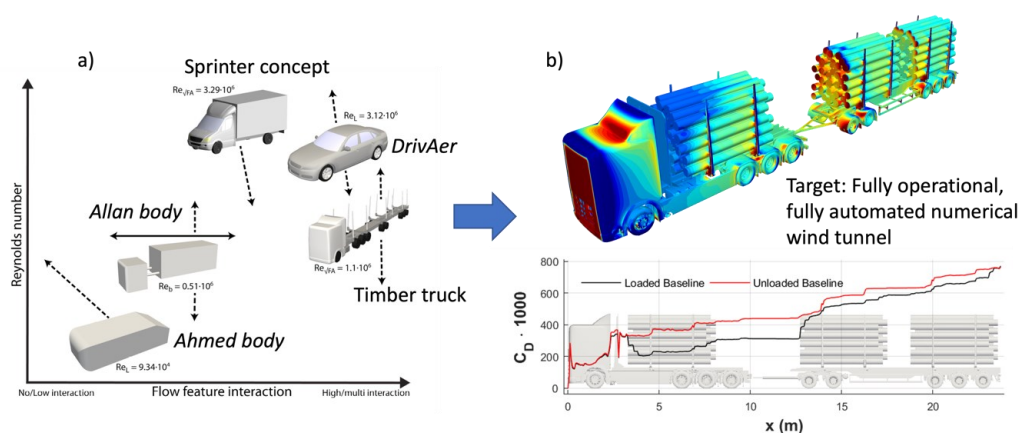
Från vindtunnel till numeriska beräkningar

För att säkerställa robusthet när man går från vindtunnel till CFD (från 2 till 2.1). krävs fokus på metodutveckling. Det är ett relativt långt steg mellan mätkampanjer i en väletablerad vindtunnel med personal med mångårig erfarenhet och kompetens och en virtuell vindtunnel. Men det kan hanteras genom att vägen bryts ner i ett antal distinkta delmål som var och en bidrar med kunskap, erfarenhet och fakta. En virtuell vindtunnel kräver till exempel en robust metod på alla nivåer, en enkel och automatiserad hantering samt god tillgång till relevant datorkraft. Samtidigt ger den virtuella vindtunneln hela hastighetsfältet, de aerodynamiska krafterna, hela sidvindssvepet, mycket lägre kostnader

på sikt, avsevärt kortare tid för analyser samt möjlighet till att variera yttre förhållanden på ett sätt som knappast är möjligt i en vanlig vindtunnel. Genom att utnyttja den virtuella vindtunneln för att genomföra stora mängder beräkningar och dessutom planera ett mindre antal relevanta och utvalda vindtunnelprov kan man utnyttja de båda resurserna på ett optimalt vis.

Att denna utveckling skulle vara möjlig har påverkats av flera faktorer, framför allt att det har skett en enorm utveckling vad gäller simuleringsverktyg och en lika stor och accelererande utveckling när det gäller datorkraft.

Figur 5 visar en schematisk bild av processen avseende a) bakomliggande metod- och kompetensutveckling samt b) målbilden i form av den virtuella vindtunneln, som automatiskt levererar efterfrågad information i form av tryckfördelning (överst) och den lokala luftmotståndskoefficienten som funktion av läget på fordonet (nederst).



Figur 5. a) Schematisk beskrivning av den del av utvecklingsfasen som bygger konfidens i beräkningsverktygens förmåga. b) Exempel på utdata från den virtuella vindtunneln.

Figur 5 visar exempel på de två referenskonfigurationerna (lastad och olastad) som jämförelse. I den vänstra panelen (a), finns fem olika konfigurationer representerade. Dessa fem konfigurationer används för olika delar av metodutvecklingen. Notera att de tre kropparna med kursiv text (*Ahmed body*, *Allan body* och *DrivAer*) är välkända och mycket använda referenskonfigurationer där mängder av simuleringar och referensmätdata föreligger, medan *Sprinter concept* och *Timber truck* är interna konfigurationer. *Sprinter concept* är en demonstratorstudie med flera likheter med projektets huvudfokus *Timber truck* (i många olika konfigurationer);

- *Ahmed body*: Välkänd förenklad fordonskropp med komplicerad lutning på bakdelen. Denna modell är extremt välstuderad och det föreligger omfattande experimentella data från många olika vindtunnlar. Inom metodutvecklingen har denna geometri använts tillsammans med publicerade vattentunneldata vid låga hastigheter för att möjliggöra detaljerade simuleringar.
- *Allan body*: Förenklad fordonsmodell med variabel geometri för studier av gap mellan hytt och skåp. Inom metodutvecklingen har denna geometri använts tillsammans med publicerade vindtunneldata.
- *DrivAer*: Referensmodell för fordonsindustrin avseende personbilar. Framtagen för att kunna möjliggöra delande av data samt utveckling av metoder, numeriska scheman och turbulensmodeller. Inom metodutvecklingen har denna geometri använts tillsammans med publicerade vindtunneldata.

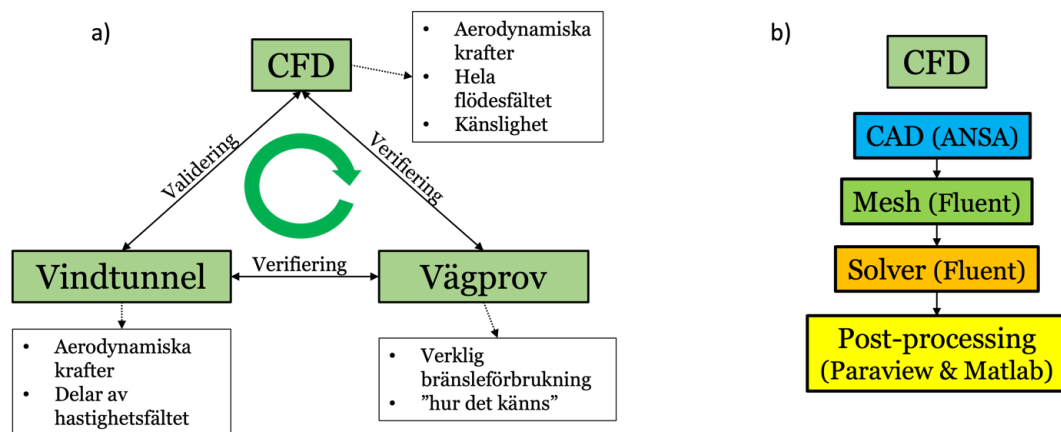
- De tre referenskonfigurationerna har huvudsakligen använts för projektets kunskapsuppbyggnad och kompetensutveckling. Figuren avser att visa en sammanfattning av det omfattande kringarbetet som varit nödvändigt för att utveckla den virtuella vindtunneln. För att ge en helhetsbild redovisas kortfattat några resultat från dessa delar nedan (tillsammans med referenser till tillhörande publikationer).
- *Sprinter Concept*: Från CFD till produkt. Parallellt med projektet har arbete pågått som gett stora synergifördelar. Inom ramen för detta projekt har en komplett transportbil med mycket goda aerodynamiska egenskaper tagits fram tillsammans med ett åkeri (Alfredsson Transport AB, Norrköping) och en påbyggare (PLS Truck Bodies AB, Rydaholm).
- *Timber truck*: Representerar här alla de olika fordonstyper och konfigurationer som förekommer inom projektet från numeriska simuleringar av den förenklade vindtunnelmodellen hela vägen till det kompletta fordonet med och utan last.

Genom att använda i huvudsak tre metoder: vindtunnel, CFD (Computational Fluid Dynamics) och vägprov (Figur 12 kan man möjliggöra tydlig validering och verifiering mellan de olika metoderna, vilka kommer att komplettera varandra genom att tillföra olika typer av data och information till projektet. I en vindtunnel kan man mäta aerodynamiska krafter såväl som delar av flödesfältet. I de fall en personbil studeras kan man använda fullskalemodeller medan man i fallet timmer- och flisfordon måste använda sig av modeller i lämplig skala. Dessutom är vindtunnlar individer vilket innebär att det krävs kunskap och erfarenhet för att använda dem på bästa sätt.

När det gäller CFD kan man beräkna de aerodynamiska krafterna och dessutom erhålla hela flödesfältet liksom många viktiga fluidmekaniska egenskaper. Men CFD kan inte leverera bättre resultat än de numeriska modeller som används eller hur komplicerade fenomen, till exempel turbulens, modelleras. Dessutom behövs omfattande datorkraft för att köra dessa simuleringar.

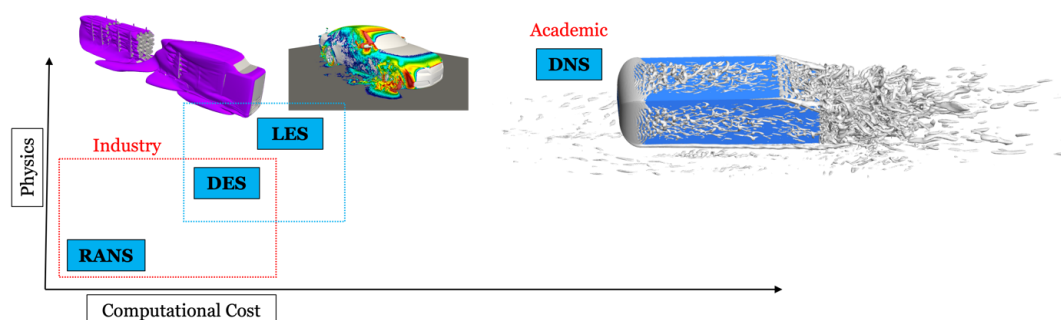
Vägprov, slutligen, ger exempelvis resultatet på de införda förändringarna i form av bränsleförbrukning. I viss mån kan man även få data i form av förarintryck som kan vara av stort intresse. Inom projektet har vi arbetat med alla dessa steg på olika sätt. Genom att tillse att validering och verifiering kommer in i projektet i rätt fas har vi kunnat utnyttja olika typer av kompetenser, kunskaper och erfarenheter.

Om man jämför vindtunnelexperiment med datorsimuleringar kan man se att det är relativt omständligt att köra många omfattande geometriska variationer i en vindtunnel medan det är enkelt att köra många små. När man väl är i tunneln med en modell kan den tillföras små aerodynamiska förändringar mycket enkelt medan stora förändringar är avsevärt mer komplicerade. I fallet CFD är det lika lätt att göra såväl små som stora förändringar förutsatt att man kan lita på de numeriska modellerna.



Figur 6. a) Förhållandet mellan vindtunnel, CFD och vägprov och dess inbördes informationsutbytesvägar. b) Förenklad beskrivning av beräkningsprocessen. Från en ritning byggs en modell (CAD) som förses med ett beräkningsnät (Mesh). Simuleringen körs (Solver) på en lämplig dator och resultaten bearbetas (Post-processing) så att man kan jämföra och dra slutsatser.

För att kunna göra beräkningar med lämplig noggrannhet och samtidigt på en rimlig tid måste vissa avväganden göras. Figur 7 visar mycket schematiskt förhållandet mellan den fysik man kan lösa upp och behovet av beräkningskraft. Inom projektet har vi använt RANS, DES och LES. RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) modeller innebär att all turbulens modelleras med en sorts medelvärden medan LES (Large Eddy Simulation) innebär att man löser upp (faktiskt beräknar) de största virvlarna. I extremfallet kan man använda DNS (Direct Numerical Simulation) som innebär att man löser upp (i princip) alla virvlar men den fungerar idag bara för kraftigt förenklade geometrier vid låga hastigheter och används uteslutande i ren forskning. En intressant metod är DES (Detached Eddy Simulation) som innebär att man använder LES ute i själva flödet (friströmmen) medan man använder RANS inne vid väggen (ytan på fordonet).

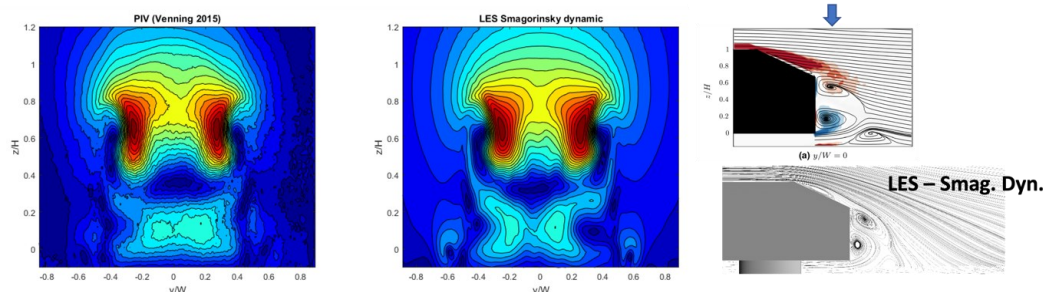


Figur 7. En schematisk beskrivning av förhållandet mellan hur mycket fysik (detaljer i strömningen) som man löser upp (får med) och behovet av datorkraft. Inom projektet har vi huvudsakligen arbetat med RANS och DES.

Validering av beräkningsmetoder

En viktig del vid utvecklingen av en virtuell vindtunnel är att validera mot verkliga vindtunneldata eller motsvarande (exempelvis vattentunnel). Detta kan göras mot egna data, till exempel från förstudien ETTaero eller från data i litteraturen. Det ställs mycket höga krav på denna typ av data och tillgången är relativt begränsad. För att se hur noga

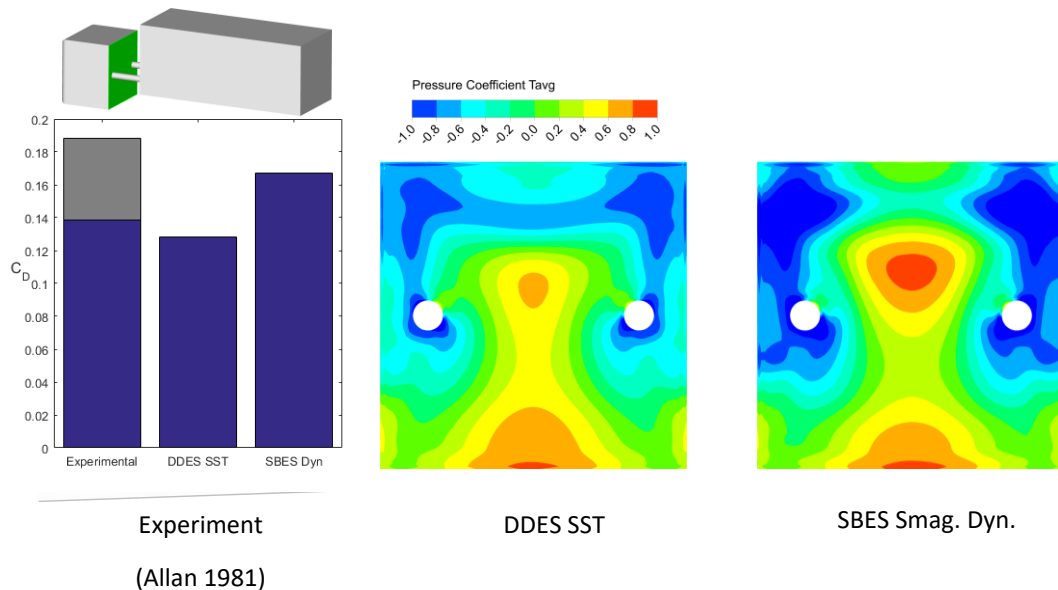
man kan räkna ut ett strömningsfält runt en starkt förenklad fordonskropp (Ahmed body, Figur 5) genomfördes en LES-studie där publicerade data från en vattentunnel användes som jämförelse för validering.



Figur 8. Höger: sidovy av bakre delen av en Ahmed body (Figur 5), mätdata och LES-simulering, till vänster ett snittplan (vid pilen) som visar mätning och simulering.

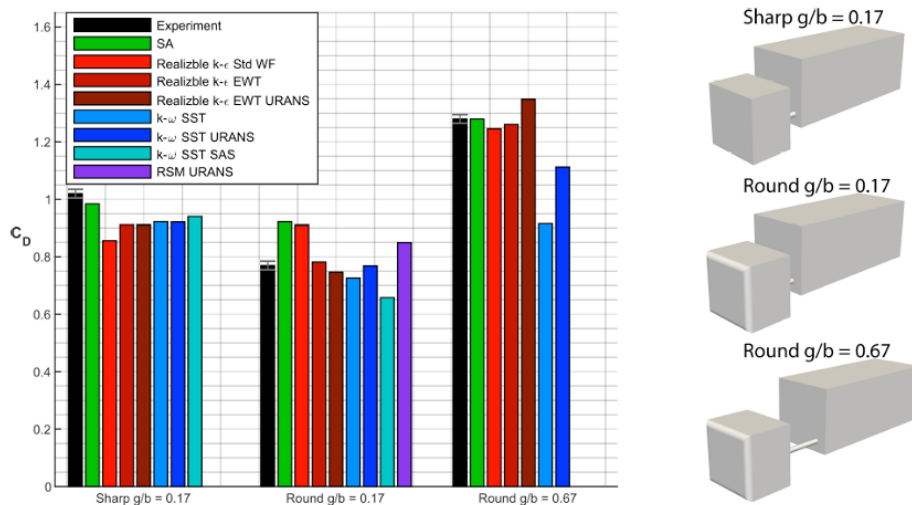
Man finner då att överensstämmelsen är utomordentligt god (Figur 8. Detta gäller för en enkel kropp vid låg hastighet vid användande av en mycket beräkningstung metod. Det ger viktig information om att det är möjligt att skapa en numerisk vindtunnel. För att kunna använda en sådan för mer komplexa geometrier och även kunna göra ett stort antal beräkningar krävs olika typer av förenklingar. Dessa ska väljas så att man för det givna fallet kan erhålla den efterfrågade informationen med en tillräcklig noggrannhet på en rimlig tid, vilket är en svår och komplicerad fråga som kräver många olika avväganden.

Som ett första steg på vägen genomfördes en andra validering där en Allan body (Figur 9 och Figur 5) används för att studera hur olika DES-metoder kan användas för en mer fordonslik konfiguration. Då tillgången på data för denna typ av fordon är begränsad och i många fall mycket specialiserad används ett testfall från litteraturen. I Figur 9 kan man se att träffsäkerheten att beräkna luftmotståndskoefficienten är mycket god.



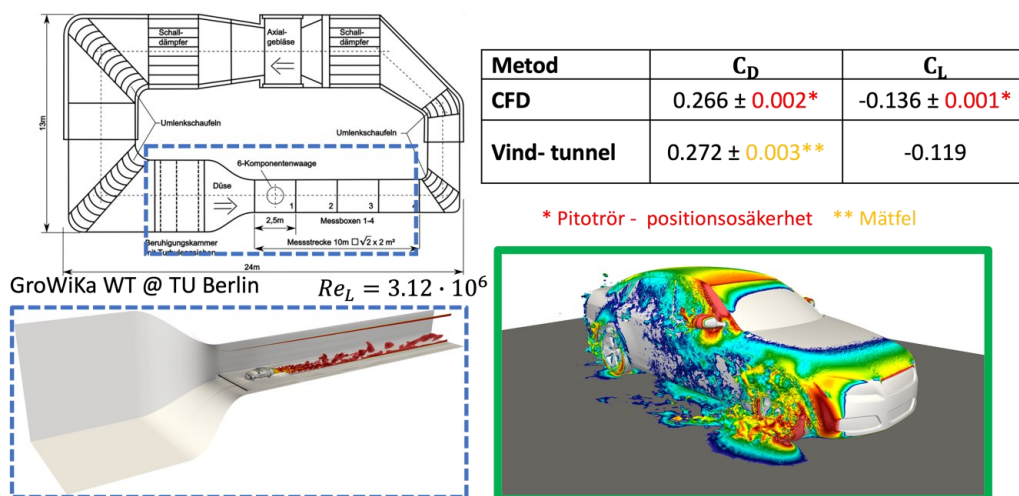
Figur 9. Allan-body experiment i vindtunnel och simuleringar med DES-metoder. Till höger C_D , integrerat värde för hyttens baksida. Den grå delen av stapeln för "Experimental" representerar felmarginalen i mätningen. Man ser också att SBES-metoden är mycket bra och prickar luftmotståndet med god precision. Samtliga värden avser hyttens baksida.

Man ska inte låta sig luras av Allan body-modellens relativa enkelhet. Den innehåller två olika delar vars inbördes avstånd kan ändras (se även Figur 5 för hur detta påverkar situationen). Genom att använda denna modell och genomföra ett omfattande arbete med att studera dessa ändringar kan man få en bild av hur väl olika modeller för turbulensen påverkar resultatet. I Figur 10 visas resultatet från ett antal olika modeller på tre olika geometriska fall. Alla dessa metoder är av RANS-typ, det vill säga förenklade så att man modellerar all turbulens, vilket i praktiken innebär att man inte kan lösa upp alla detaljer men att beräkningstiden är avsevärt kortare. Detta ger en stor potential för en funktionell virtuell vindtunnel. Spridningen mellan de olika simuleringarna är ganska stor, men trots det kan man utifrån detta dra många viktiga slutsatser som innebär att man kan välja ut en eller flera huvudkandidater. Det är särskilt en av dessa modeller kallad "*Realizable k-epsilon*" (mörkt röd) som presterar bäst och är därför den metod som används i den virtuella vindtunneln.



Figur 10. Allan body-simuleringar med olika turbulensmodeller för tre olika geometriska fall. Sharp respektive Round avser hyttens framkant, kvoten g/b beskriver det relativa avståndet mellan hytt och skåp.

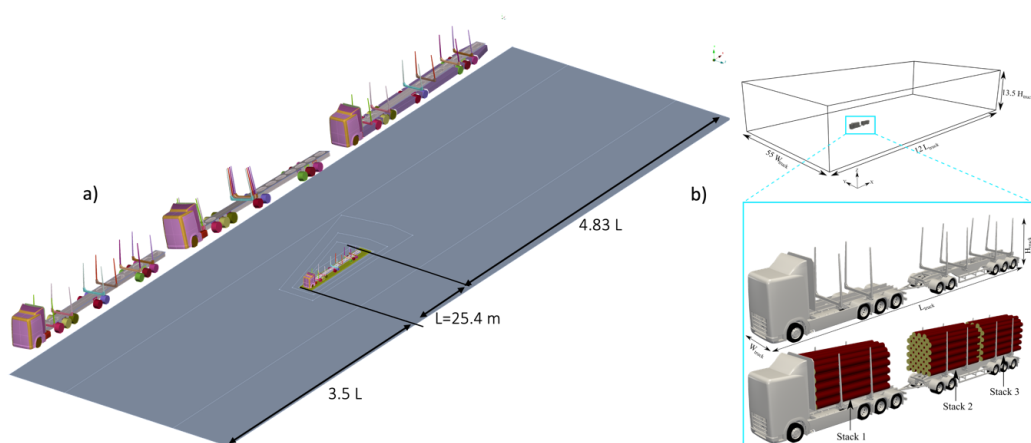
Som en framtidsspaning och framtidssäkring, och dessutom för att vid behov kunna simulera en komplex fordonskropp så verkligt som möjligt, genomfördes även en djupdykning i DES-modeller med DrivAer (Figur 5) som testgeometri. DrivAer är mycket välförankrad i fordonsindustrin med många publicerade dataset från vindtunnelmätningar och avancerade simuleringar. Även om DrivAer inte är geometriskt lika stor som till exempel en rundvirkesbil är den komplex i geometrin och mätningarna är genomförda vid höga och realistiska hastigheter. För att verkligen göra detta grundligt testades ett stort antal olika modeller, där SBES-modellen, som är en mycket modern DES-variant, framstod som klar vinnare (Figur 11). Man kan tydligt se att det är möjligt att med mycket hög precision prediktera luftmotstånd och lyftkraft.



Figur 11. En detaljerad simulering av ett komplett fordon för en realistisk hastighet. Till vänster vindtunneln och den del som simulerades. Till höger resultat i form av luftmotstånd och lyftkraft samt ett exempel på detaljeringsgraden av en DES (SBES) simulering (5 grader sidvind).

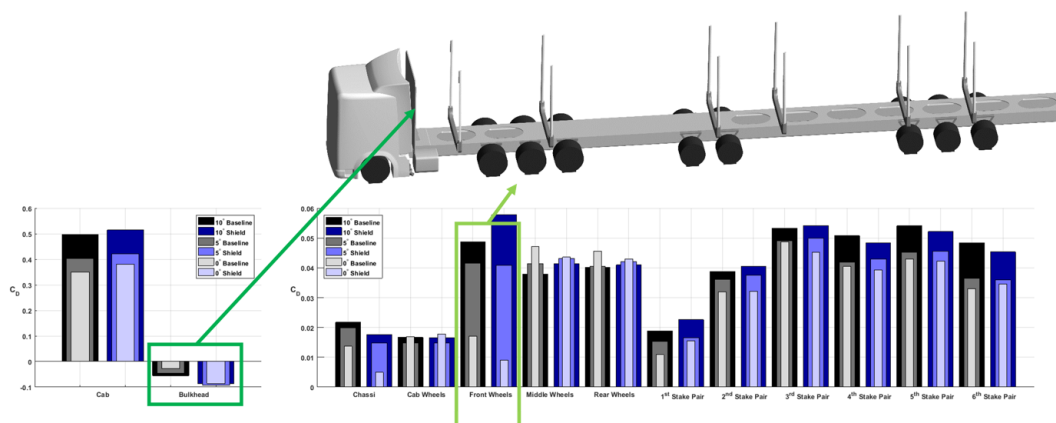
En virtuell vindtunnel

Genom att kombinera CFD, vindtunnel och vägprov med en stor portion ingenjörskunnande har projektet kunnat bygga upp just en sådan testmiljö. Denna miljö har sedan använts för att genomföra ett stort antal simuleringskampanjer. Dessutom har olika nya och moderna metoder för numerisk analys, som framkommit under projektets gång, studerats och analyserats för att därmed kunna framtidssäkra beräkningsmiljön avseende fortsatt användning inom detta och andra närliggande områden. Plattformen är baserad på ett antal OpenSource och/eller kommersiella programvaror som kan bytas och utvecklas på ett modulärt sätt (Figur 11 b). Vidare är hela plattformen anpassad för att köras på lämpliga superdatorer. Den utvecklade plattformen har haft som mål att användas exklusivt inom det föreliggande projektet. Utvecklingen har skett av doktorander med visst stöd från examensarbetare. Under utvecklingens gång har erfarenhetsutbyte med närliggande industri inneburit att en viss benchmarking avseende kapabilitet och kapacitet genomförts, vilket ger vid handen att den utvecklade plattformen ligger väl i linje med industrins arbetssätt och förmåga. Plattformen är idag särskilt anpassad för aerodynamiska studier med tillhörande optimering av timmerfordon.



Figur 12. Den virtuella vindtunnelns generella utseende (a) med några olika testkonfigurationer i början på projektet när man genomförde simuleringar av vindtunnelmodellen. Den kompletta beräkningsboxen (b) och två mer realistiska konfigurationer. Beräkningsboxen är 12 billängder lång.

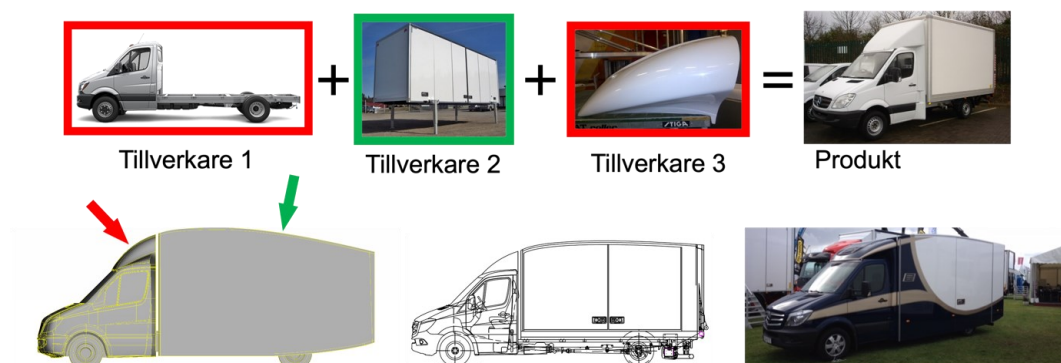
I grunden utgörs plattformen av ett antal delsteg (Figur 5 b samt Figur 12). I den senare ser man den initiala (Figur 12 a) och den slutgiltiga (Figur 12 b) beräkningsdomänen. I den vänstra figuren (a) ser man en modell placerad på botten i beräkningsvolymen och vid sidan finns några exempel på tidiga geometrier som analyserades. Denna fordonsgemetri är samma som användes i vindtunnelproven i ETTaero och visar referenskonfigurationen, ett utförande med samlade bankar/stakar och en konfiguration med ett kjolpaket monterat. I den högra figuren (b) ser man den slutliga virtuella vindtunneln och exempel på hur en referenskonfiguration av ett detaljerat fordon med och utan travar ser ut. Denna geometriska beskrivning fungerar som indata till den process som finns beskriven i Figur 6 b.



Figur 13. I den virtuella vindtunneln kan man dela upp bidraget från varje del till det totala luftmotståndet för hela fordonet. Här visas en beräkningsmodell av den vindtunnelmodell som användes i ETTaero som exempel.

Ett applikationsexempel

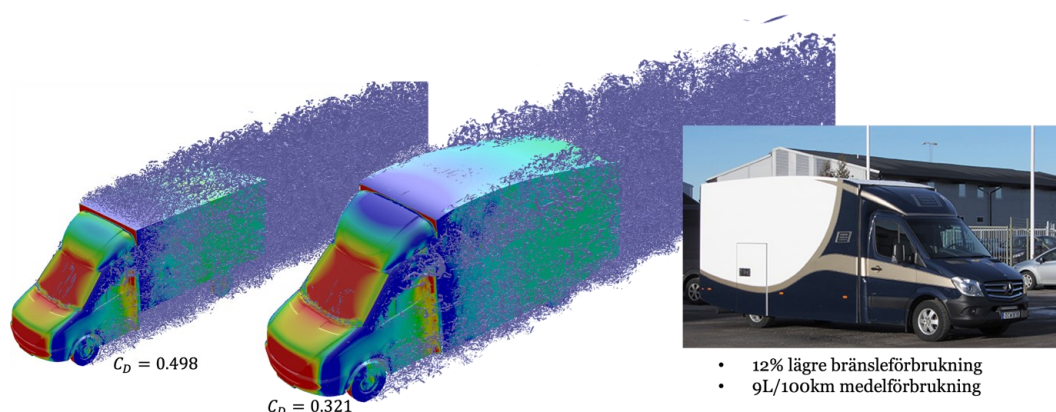
För att studera och testa den tilltänkta design- och utvecklingsprocessen för att påverka aerodynamiken på ett befintligt fordon på nära håll genomförde LiU-teamet ett projekt parallellt med ETTaero2 i syfte att genom ett slags aktionsforskning gemensamt arbeta fram en metod som löste själva problemet. Som exempel på ett fordon som består av flera delar använde vi här en 3,5 tons lätt lastbil. Som framgår av Figur 14 ser man att den kompletta produkten består av bidrag från tre olika tillverkare (övre raden) där röd box indikerar tillverkare vars produkter inte får ändras (i detta fall bil och takspoiler, röd pil) medan skåpet (grön box, grön pil) kan påverkas. Den nedre raden visar konceptet med tillåtna och otillåtna zoner för aerodynamisk utformning (pilar), ritning på den slutgiltiga designen och den färdiga bilen.



Figur 14. Från koncept till produkt. Övre raden visar de tre delsystemen bil, skåp och takspoiler. Röda boxar innebär fixerad form medan grön innebär att formen kan optimeras. Nedre raden visar koncept, ritning och färdigt fordon.

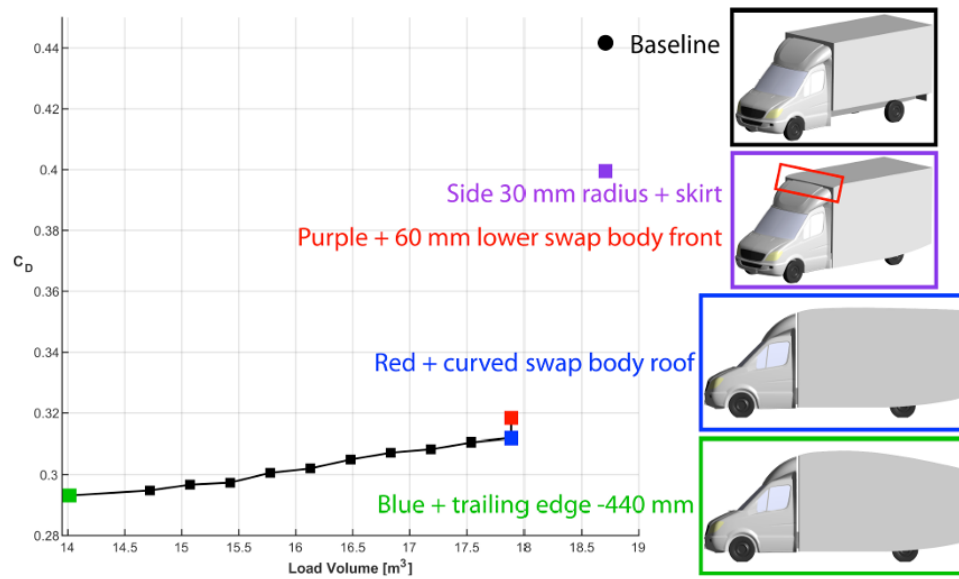
Under den genomförda designprocessen genomfördes ett antal skalupplösta, kostsamma men mycket detaljerade, simuleringar på en konceptmodell (Figur 15, där C_d minskade från ett referensvärde på 0,498 till ett bästa värde på 0,321. Detta resulterade i 12 procent lägre bränsleförbrukning (9,0 l/100km i medel) på den verkliga bilen under verkliga

körförhållanden. Man bör notera att Figur 15 visar två extremvärden för en tämligen förenklad geometri och man kan därför inte ta siffrorna från dessa simuleringar som värden på hur det kommer att se ut i verkligheten. Man kan som tumregel tänka sig att den faktiska bränsleförbrukningen minskar med cirka $\frac{1}{4}$ till $\frac{1}{3}$ av den relativa luftmotståndsminskningen. I detta fall minskar C_d med 36 procent, vilket skulle indikera att tumregeln är en relativt god skattning.



Figur 15. Aerodynamisk utformning av skåp på lätt transportbil.

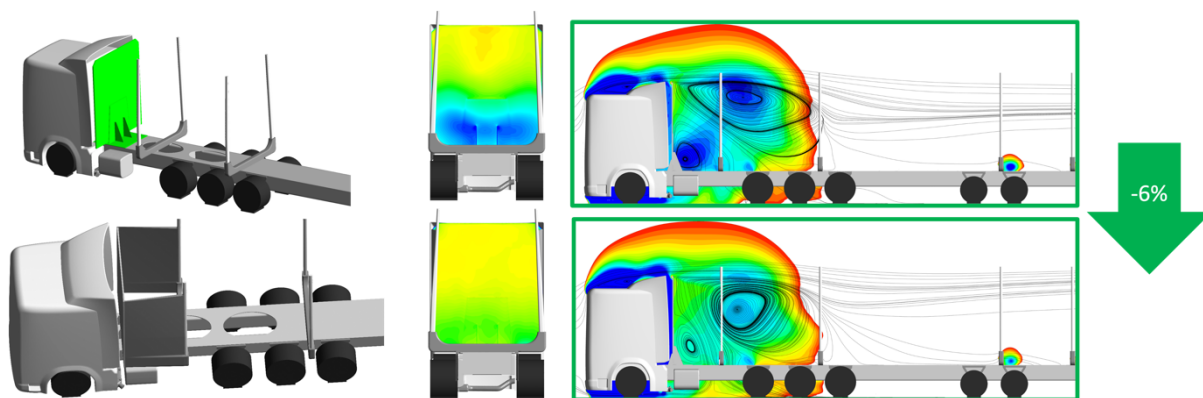
Den faktiska designprocessen (Figur 16 innehåller många fler steg än bara två ytterligheter och nu på en mer detaljerad geometri. Om man börjar i det övre högra hörnet vid den svarta punkten och rör sig nedåt mot de lila, röda och blå fyrkanterna ser man att C_d sjunker med ett antal distinkta, stora ändringar i geometrin på fordonet. Men från blå till grön fyrkant, när det gäller själva avrundningen på skåpet, erhålles inte alls samma stora förändringar i C_d . Här kan man verkligen tala om att hitta de viktigaste faktorerna, vilket är precis syftet med just detta exempel. Eftersom detta är en skåpbil kommer den att få en minskad volym beroende på hur mycket bakkanten på skåpet sveps ner. I det verkliga fallet innebär det att man kan hitta en avvägning som kommer att uppfylla kraven för att passera acceptansbarriären. I detta fall är acceptansbarriären rationellt motiverad eftersom en marginell minskning av C_d på bekostnad av minskat lastutrymme sänker transporteffektiviteten. Man kan notera att den bästa lösningen i detta fall representeras av den blå konfigurationen i Figur 16. Från referenskonfigurationen med ett C_d på 0,44 till den valda konfigurationen (blå) med ett C_d på 0,315 erhåller man en minskning av C_d med cirka 28 procent medan man från blå till grön bara minskar C_d med cirka sex procent.



Figur 16. Optimeringsprocessen för den aerodynamiska lätta lastbilen. Från referenskonfigurationen (svart box) till en extrem aerodynamisk konfiguration (grön box). Blå box visar det valda konceptet.

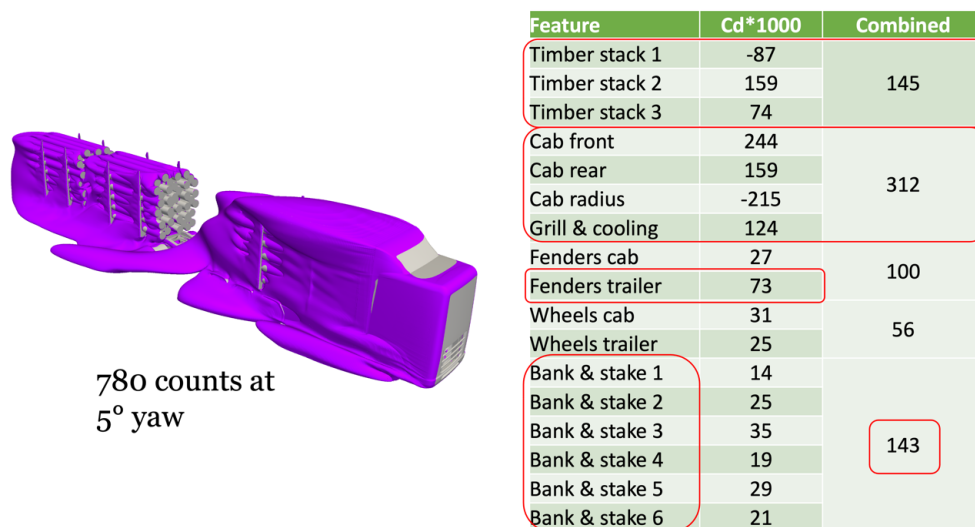
Resultat

Genom att använda CFD-plattformen kan man inte bara beräkna de aerodynamiska krafterna, flödesfältet och många andra parametrar, man kan även dela upp luftmotståndet så att det kan tas fram för alla olika delar var för sig (Figur 17). På detta sätt kan man i detalj studera hur en viss komponent bidrar till helheten men även studera hur den påverkar vid olika anblåsningsvinklar. Detta innebär att man enkelt kan identifiera de olika komponenternas inbördes ordning när det gäller påverkan på luftmotståndet. Det är viktigt att notera att två centrala aspekter avseende luftmotstånd måste beaktas vid design av en konfiguration. Dels att den fungerar vid olika vinklar när det gäller sidvind, dels att den fungerar för såväl lastat som olastat fordon. Om man återvänder till processen i Figur 3 har man då passerat innovationsbarriären. För att passera acceptansbarriären krävs ytterligare kunskap och erfarenhet som kräver fullskaleprov för att verifiera att konceptet fungerar, i första skedet på vägen och senare även vid full drift.



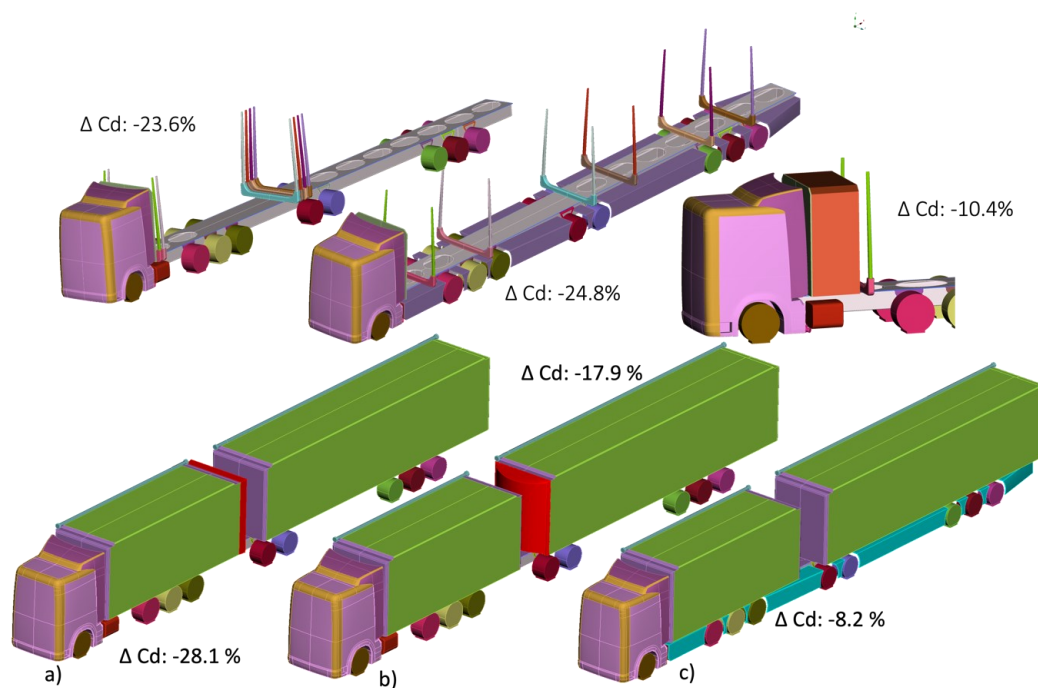
Figur 17. Exempel på en aerodynamisk förbättring. I detta exempel monteras en extra sköld mellan framstammen och första stakparet (vänster). Tryckkoefficienten på bakstammen (mitten) och tryckkoefficienten med strömlinjer i sidvy (höger) visar skillnaden. Man ser att lågtrycket på nedre delen av framstammen försvinner och luftmotståndskoefficienten minskar med 6 %.

Figur 17 visar ett exempel på en aerodynamisk mindre åtgärd. I detta fall används den förenklade skalmodellen som utgångspunkt. För att ändra luftmotståndet monteras en sköld på var sida om hytten mellan framstammen och första stakparet (Figur 17 vänster), där den gröna ytan representerar framstammen. Figur 17 mitten visar trycket på framstammen för de två olika fallen medan den högra bilden visar tryck med överlagrade strömlinjer. Man ser att strömningsfältet är relativt lika men att trycket på framstammen nu är utjämnat. I detta exempel resulterar det i en minskning av luftmotståndet med cirka sex procent. Detta resultat verkar lovande men pekar på en viktig detalj – detta gäller det olastade fordonet. Mer om detta senare i rapporten.



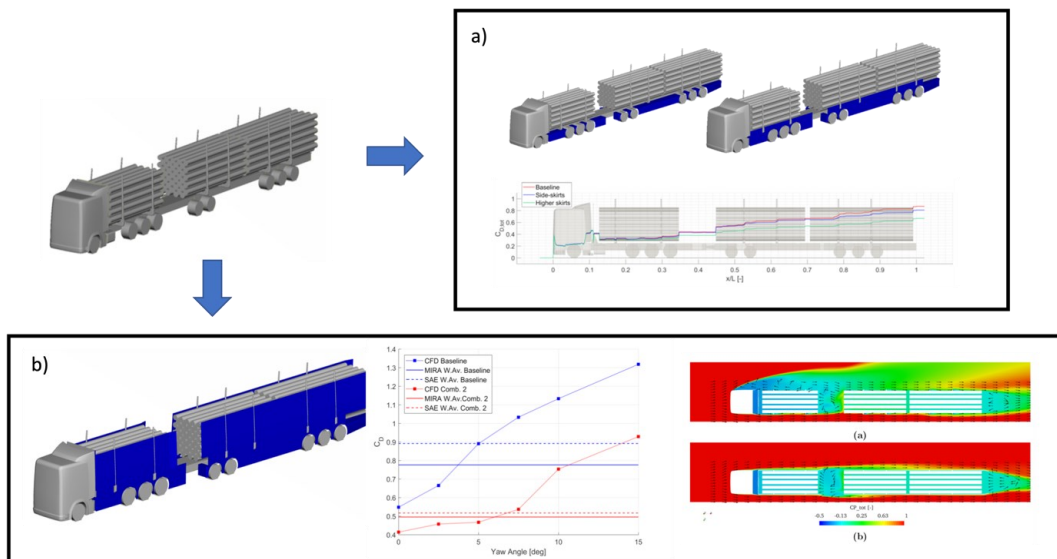
Figur 18. Uppdelning av luftmotståndet på respektive del på den detaljerade referensmodellen. Till vänster tryckkoefficienten (lila färg visar $C_p=0$). Till höger de olika komponenternas bidrag till luftmotståndet.

Genom att analysera varje del var för sig kan man se vilka delar som påverkar luftmotståndet och på vilket sätt, positivt eller negativt. Detta innebär också att de delar eller komponenter som av olika skäl inte kan eller får påverkas kan exkluderas i den fortsatta processen för att ta fram ett nytt och attraktivt koncept. Figur 18 visar hur en typisk sådan uppdelning kan se ut och hur olika delar bidrar. Genom att detaljstudera de olika delarnas individuella påverkan kan man skapa en initial bild av hur luftmotståndet påverkas och därmed se var aerodynamiska justeringar kan ha störst verkan. Man måste dock hålla i minnet att olika delar kan samverka på olika sätt, vilket gör att man inte alltid kan utnyttja superposition av enskilda ändringar.



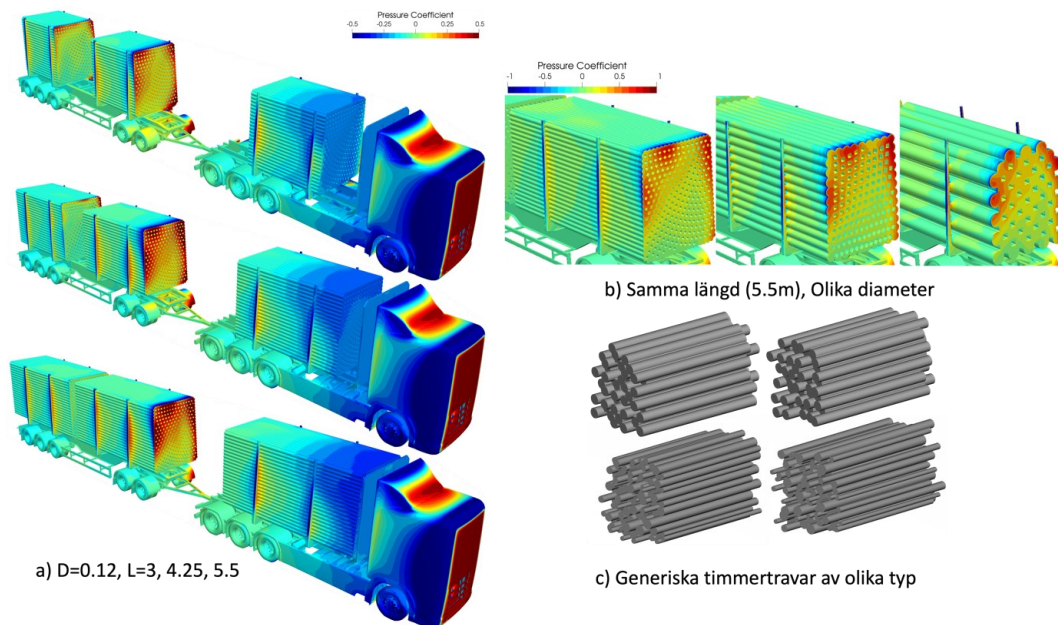
Figur 19. Några exempel på olastade rundvirkes- och flisbilar. Resultat från tidiga simuleringar med den förenklade vindtunnelmodellen. Resultaten ska tolkas som indikationer på intressanta möjliga koncept. I flisbilsfallet finns en restriktion i det att skåpen inte får ändra form.

Figur 19 visar ett antal exempel på hur det totala luftmotståndet kan ändras genom olika typer av åtgärder på den förenklade skalmodellen, dels konfigurerad som ett olastat timmerfordon (övre raden), dels som ett flisfordon. För timmerfordonet (vänster till höger) visas sammandragna stakar, sidokjolar och en kort hyttsköld. För flisbilen visas en boat-tail på lastbilen, en vindriktare på framsidan av släpets framstam och slutligen sidokjolar. Dessa analyser har som huvudsakligt syfte att påvisa olika typer av möjliga koncept för vidare, mer detaljerad, analys samt göra en preliminär rangordning av de olika koncepten.



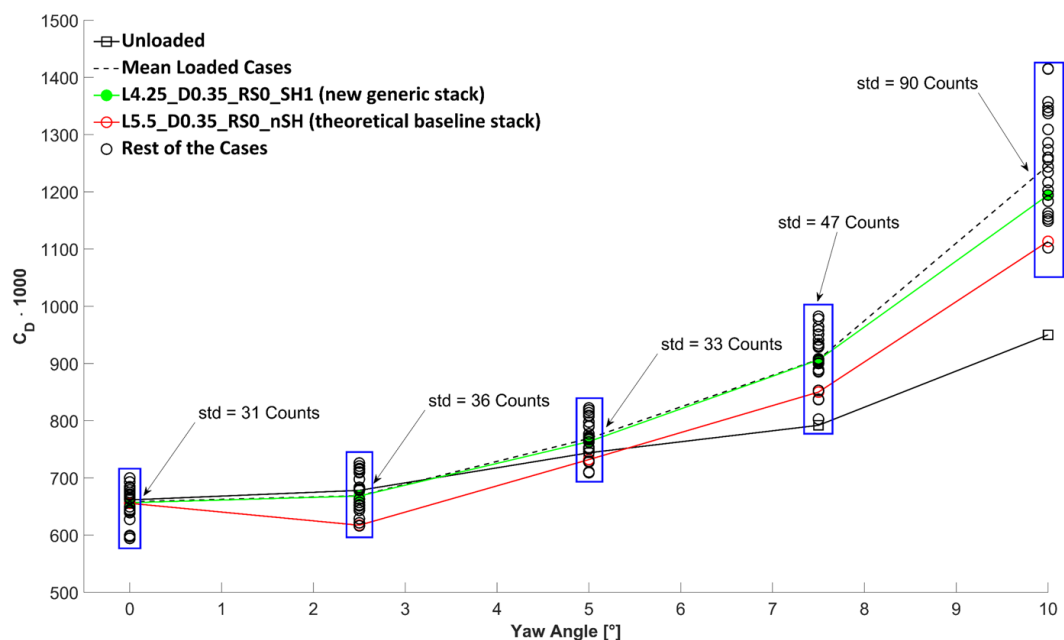
Figur 20. Exempel på konceptstudier med den detaljerade simuleringsmodellen. Ett fall (ovan) visar två olika kjolkonfigurationer vilket ger ett minskat luftmotstånd i storleksordningen 10 % medan det andra fallet (nedan) visar en komplett inkapsling av lasten som ger i storleksordningen 40 % lägre luftmotstånd.

Som ett exempel på vad denna typ av analys kan resultera i kan man tänka sig två extremfall; ett kjolpaket med hög acceptansfaktor (Figur 20 a) och ett heltäckt fordon med avsevärt lägre acceptansfaktor på grund av att påbyggnaderna kommer att komplicera lastning och lossning samt att vikten ökar (Figur 20 b). I det första fallet handlar det som en minskning av C_d med mindre än tio procent medan det i det senare fallet rör sig om 40 procents minskning. Utifrån tumregeln om $1/4$ till bränsleförbrukning innebär det 2,5 respektive 10 procents minskning i bränsleåtgång.



Figur 21 Utredning av timmertravar. Under projektets genomförande framkom att timmertravarnas beskaffenhet är viktig för att kunna göra en rättvis jämförelse mellan olika konfigurationer. Till vänster olika längder, till höger olika diametrar (överst) samt olika varianter av travar med blandade längder och dimensioner (nederst). De senare ligger till grund för den slutliga referenstraven.

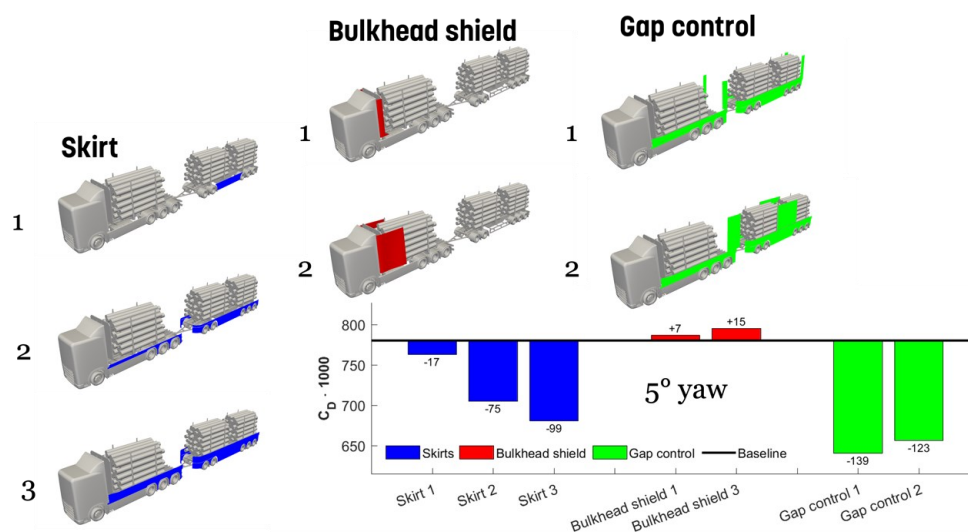
Under arbetets gång uppkom ett behov av att hantera virket och dess beskaffenhet. Den grundläggande frågeställningen var huruvida det var nödvändigt att modellera virket som travar med diskreta stockar eller om det räckte att göra en "låda" med eller utan "vågiga" kanter. Även inverkan från den skrovliga ytan på stockarna var av intresse att utreda. Genom att utgå från ett antal olika idealiserade, teoretiska timmertravar (Figur 21) genomfördes ett stort antal simuleringar där olika parametrar varierades för att utröna den aerodynamiska betydelsen av exempelvis längder, diametrar och hålrum för ett antal väldefinierade travar.



Figur 22. Luftmotståndskoefficienten som funktion av sidblåsningsvinkeln (yaw angle). Den gröna kurvan visar den valda referenstraven som genomgående hamnar mycket nära mitten av intervallet för variationen vid varje vinkel.

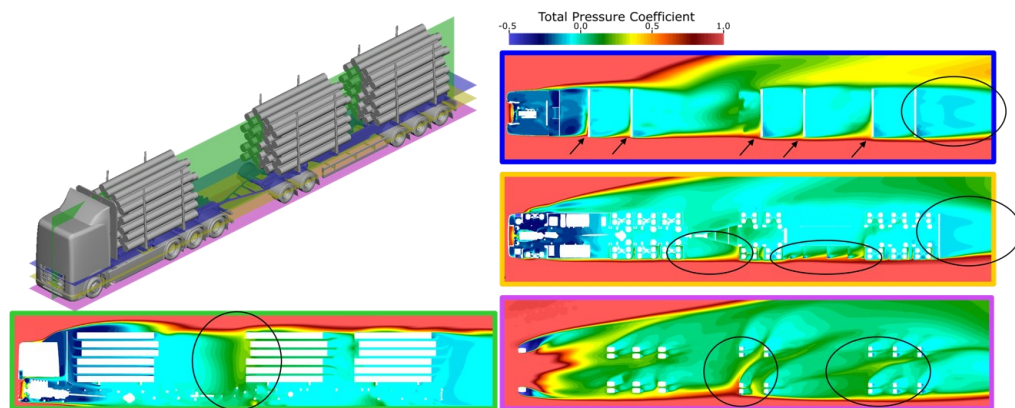
Det visade sig att när dessa teoretiska travar användes i simuleringarna underpredikterades luftmotståndet för ökande sidvind (Figur 22, röd kurva). För att kompensera för det skapades några olika generiska travar med stockar av olika längd, diameter och med en viss grad av blandning (Figur 21 c). I Figur 22 visar den streckade kurvan medelvärde för alla dessa olika travar medan den gröna kurvan representerar den slutliga generiska timmertraven. På detta sätt skapades en referenstimmertrave som därefter fungerat som standardkonfiguration (baseline) för alla designkoncept i syfte att kunna dra slutsatser mellan olika designkoncept. Eftersom det lastade fordonet är helt olik det olastade fordonet när det gäller aerodynamik är det viktigt att låsa denna parameter med ett relevant referensvärde. I det fall man verkligen i detalj vill studera hur en viss konfiguration beter sig kan det vara lämpligt att genomföra ett antal simuleringar med alla de olika konfigurationerna (ringarna i figuren) för att sedan använda medelvärden och standardavvikelse som jämförelsetal. I figuren finns också en svart kurva som representerar det olastade fordonet i referenskonfiguration.

Ett referensfordon med referenslast



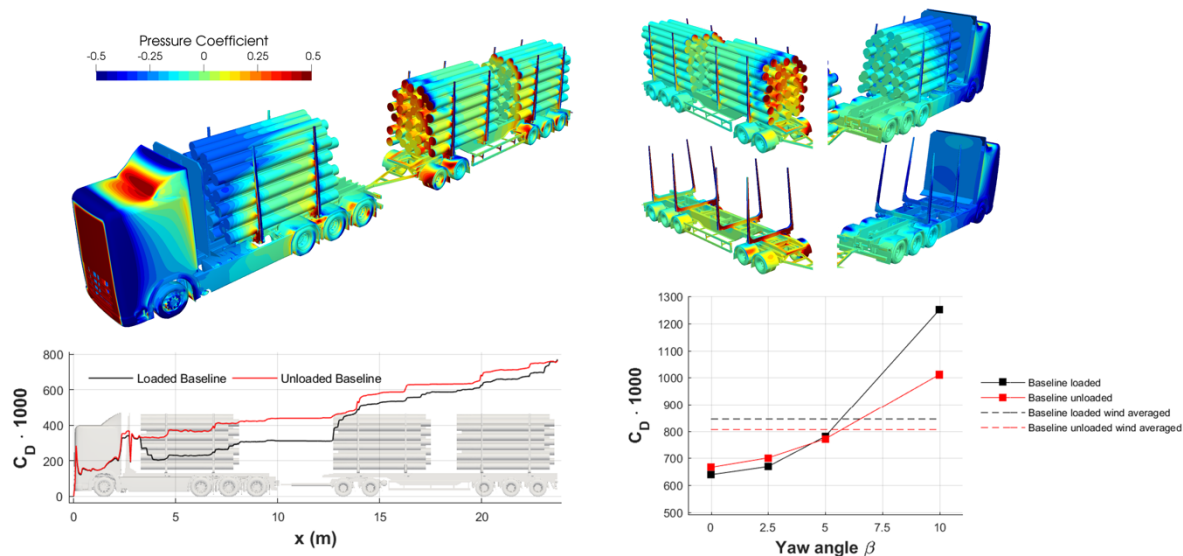
Figur 23. Tre olika koncept baserade på den detaljerade referenskonfigurationen. Tre olika områden med kjolar, hyttsköld och gap har valts ut som utgångspunkt för en mer detaljerad optimering. Alla tre är valda så att de skulle kunna tillverkas som ett påbyggnadskit på ett befintligt fordon.

För en detaljerad referensgeometri med tillhörande standardtimmertrave kan man studera och jämföra olika möjligheter. Figur 23 visar tre olika koncept: kjolpaket (*skirt*), hyttsköld (*bulkhead shield*) och hantering av gap mellan bil-släp och/eller mellan travar (*gap control*). För dessa tre kan man se att kjolpaketen (blå) i deras olika utföranden alltid ger en positiv effekt genom minskat luftmotstånd även om det första fallet med kjol endast mellan axlarna på släpet ger en mycket liten effekt. I fallet hyttsköld erhåller man den omvända effekten – den kommer att försämra luftmotståndet något, till skillnad från den positiva effekt som påvisats i en tidigare delstudie rörande en olastad konfiguration. För olika typer av hantering av gapet mellan bil-släp eller travar kan man se att det ger en hög effekt samtidigt som dessa utföranden är mer komplexa. Vidare kan man dra slutsatsen att ju mer komplexa de olika utförandena blir, desto mer interaktion mellan de olika delarna och därmed ökad risk för att de olika aerodynamiska komponenterna motverkar varandra.



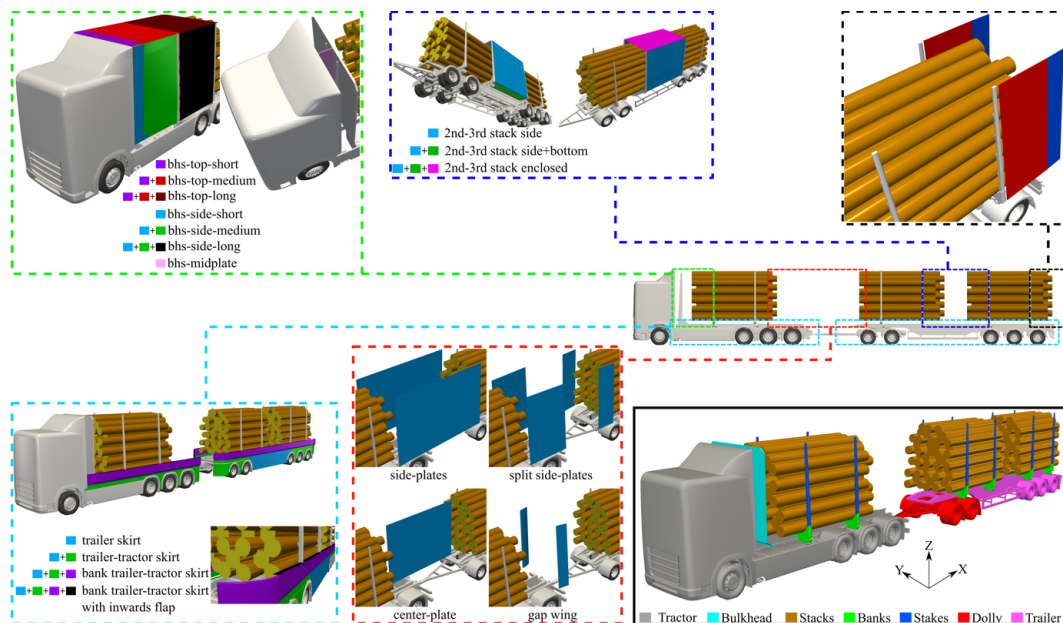
Figur 24. Ett simuleringsresultat från den detaljerade referenskonfigurationen redo för analys. De fyra utlagda planen (höger) ger automatiskt ett antal figurer där olika områden för vidare analys är enkla att identifiera. Genom att automatisera post-processingen blir det enkelt att på ett kvantitativt sätt jämföra olika konfigurationer.

För att snabbt och enkelt kunna analysera effekten av olika aerodynamiska konfigurationer behövs ett standardiserat format och en automatiserad process för att kunna plocka fram relevanta data. Genom att automatisera post-processen underlättas att på ett kvantitativt sätt jämföra olika konfigurationer. Figur 24 visar referenskonfigurationen och de fyra snittplanen som ger en snabb och tydlig överblick. I figuren är intressanta områden för vidare analys alternativt åtgärder markerade med ringar. Genom att hela tiden utgå från en väldefinierad referenskonfiguration och jämföra den med olika koncept är det dessutom lätt att se såväl positiva som negativa skillnader.



Figur 25. Resultat från den virtuella vindtunneln. Färgmappningen på fordonet visar tryckkoefficienten. De två figurerna visar den ackumulerade luftmotståndskoefficienten (vänster) och den totala luftmotståndskoefficienten för olika sidanblåsning. I exemplet jämförs det lastade och det olastade fordonet.

För att genomföra en beräkningsstudie på en konfiguration genomförs de steg som beskrivits ovan i Figur 6 b samt Figur 12 b. Resultaten av en sådan serieberäkning kan sammanfattas i Figur 25. I den övre radens färgbilder visas tryckkoefficienten för att ge en överblick. Till vänster hela fordonet och till höger bil och släp för lastad respektive olastad konfiguration. I den nedre raden finns den ackumulerade luftmotståndskoefficienten längs med fordonet för lastad (*loaded baseline*) och olastad (*unloaded baseline*) konfiguration. Denna figur visar på ett tydligt sätt påverkan av exakt hur C_d varierar längs fordonet och ger en snabb och mycket noggrann bild av skillnaden mellan de olika konfigurationerna. Notera att bilden av ett fordon som är avsedd för orientering bara visar en av de testade konfigurationerna. I samtliga fall är det den lastade referenskonfigurationen som utgör bakgrund. Till höger i nedre raden finns två heldragna kurvor som beskriver hur luftmotståndskoefficienten varierar med sidblåsningsvinkeln (yaw). De horisontella streckade linjerna representerar den så kallade vindvägda luftmotståndskoefficienten som alltså blir ett värde för en konfiguration där fartvinden varierar i sin anfallsvinkel mot fordonet. Man finner att vid fem graders sidblåsningsvinkel sammanfaller den enskilda simuleringen med det vindvägda värdet. Genom att använda detta faktum kan man reducera antalet simuleringar när det gäller att köra fram resultat för ett stort antal konceptkonfigurationer genom att hela tiden bara köra ett fall med en sidvind på fem grader. För en detaljerad analys görs dock i allmänhet en återgång till att köra simuleringar för hela vinkelsvepet.



Figur 26. Grundkoncept för aerodynamiska förbättringar. Dessa koncept är skapade utgående från tidigare vunnen kunskap från vindtunnelstudier inom ETTaero samt utvecklingsarbetet av den virtuella vindtunneln inom ETTaero2.

Den virtuella vindtunneln använd för konceptanalys

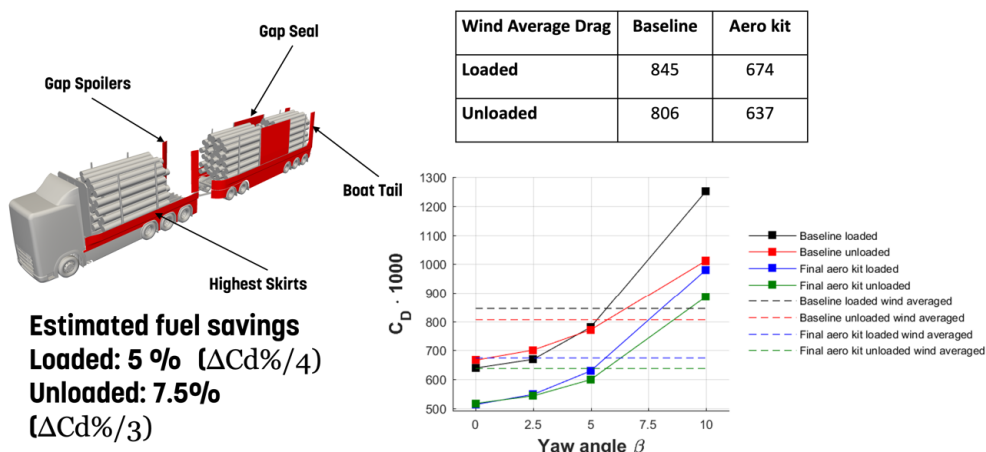
För att kunna minska bränsleförbrukningen på ett komplett timmerekipage används nu det framtagna kompletta verktyget. Utgångspunkten för analysen är en omfattande genomgång av erfarenheter från vindtunneldata genererade i förstudien ETTaero och det preliminära material som framkommit tidigt i processen under utarbetandet av verktyget. Dessa omfattande studier indikerade att det finns ett antal områden som är intressanta där man på ett eller annat sätt kan påverka strömningen och därmed sänka luftmotståndet. I Figur 26 finns dessa beskrivna: nära hytten (grön box), mellan travarna (blå box), i aktern på släpet (svart box), mellan bil och släp (röd box) samt som kjolpaket (ljusblå box). Notera den lilla bilden nere till höger som visar på den tidigare nämnda komplexiteten i det kompletta fordonet där olika delar utvecklas och tillverkas av ett antal olika företag och kan varieras på många olika sätt.

Utgående från de olika designkoncepten i Figur 26 kan man definiera tre olika mer detaljerade konceptstudier för att undersöka metodens kapabilitet. Dessa tre sammanfattar flera av de olika delprojekt som genomförts inom ramen för ETTaero2. Genom att ta fram en genomförbar konfiguration som närmar sig målet med projektet och dessutom studera två olika koncept med ytterligare förbättring, det ena i syfte att nå praktisk genomförbarhet med enkla medel och det andra genom att variera de aerodynamiska förbättringarna avseende storlek och placering för att utröna om det finns en ”bästa” konfiguration. I det senare fallet kan man inte prata om en optimering i sann anda eftersom det handlar om att beräkna utfallet för ett diskret antal konfigurationer kombinerade på olika sätt. De tre exemplen är:

- Aerodynamisk timmerbil som är möjlig att implementera praktiskt och har minst 20 procent lägre luftmotstånd, vilket betyder cirka 5–5,5 procent lägre bränsleförbrukning. Denna aerodynamiska referenskonfiguration fungerar därmed som ett riktvärde på vad som kan uppnås på lite sikt men fortfarande inte

mer extrem än att den kan passera acceptansbarriären i den grundläggande arbetsmodellen. Konceptet innehåller kjolpaket, boat-tail, stående vingar bak på bilen samt sköldar som täcker gapet mellan travarna på släpet.

- En konfiguration som i princip enbart består av ett sidokjolpaket av olika storlek och omfattning. Denna lösning undersöks primärt för att ta fram ett exempel på en enkel aerodynamisk anpassning som inte påverkar lastning/lossning och som fungerar under daglig drift. Dessutom kan denna typ av konfiguration eftermonteras på ett stort antal fordon. Konceptet är inte exakt anpassat till någon fordons- eller släptillverkare vilket i praktiken innebär att det exakta utseendet hos sidokjolpaketet kan skilja sig lite åt beroende på tillverkare.
- Utgående från den aerodynamiska referenskonfigurationen ovan genomförs en detaljerad studie av olika montage av en blandning av sidokjolar, sköldar och vingprofiler i syfte att förbättra aerodynamiska prestanda ytterligare. Inom ramen för denna designövning tas mindre hänsyn till vissa praktiska aspekter som lastning och lossning för ett se hur långt man kan komma.

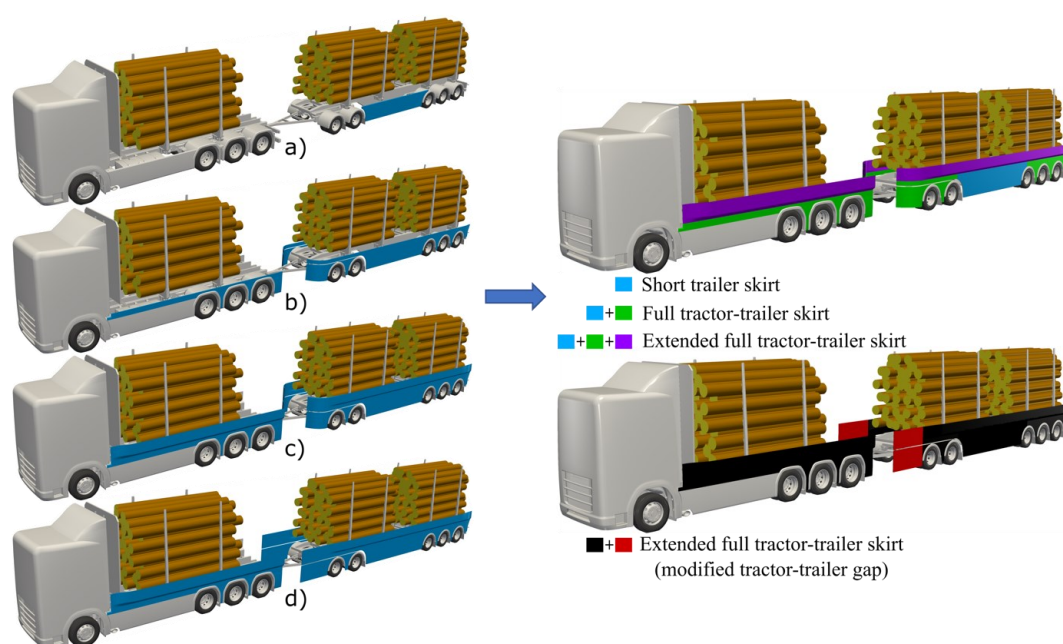


Figur 27. Den detaljerade referenskonfigurationen utrustad med flera aerodynamiska förbättringar. Denna konfiguration utgör den aerodynamiska referenskonfigurationen som ger ca 20 procent lägre luftmotståndskoefficient för såväl lastat som olastat fordon.

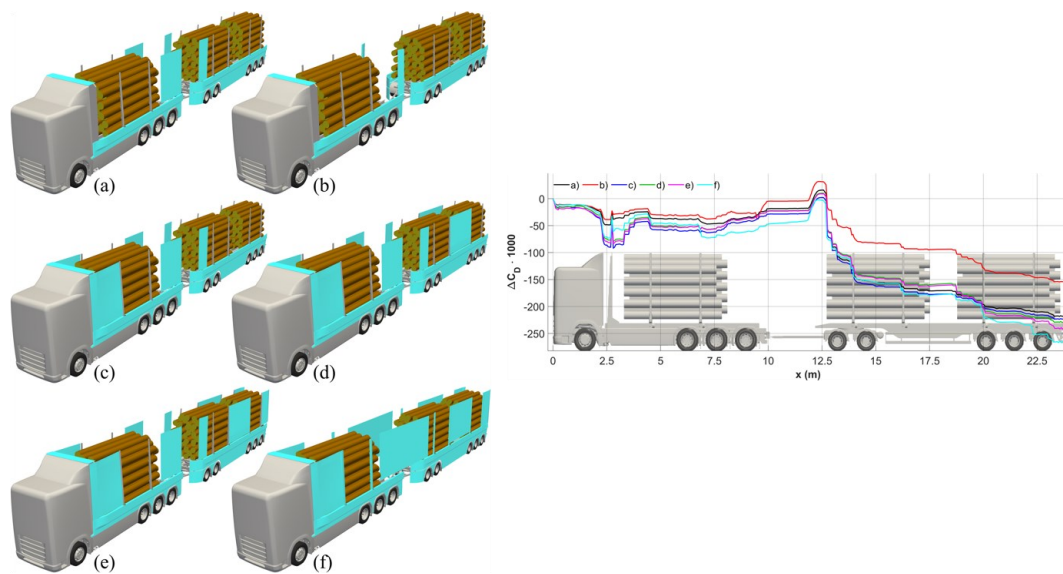
Genom att sammanställa de tidigare kunskaperna och detaljstudera strömningen över hela fordonet med det utvecklade verktyget kommer man fram till den aerodynamiska referenskonfigurationen (Figur 27) som har en 20 procent lägre luftmotståndskoefficient för såväl lastat som olastat fordon. Detta innebär en minskning i bränsleförbrukning på cirka fem procent i den lastade konfigurationen och en minskning med 7,5 procent för den olastade. Denna uppskattning bygger på erfarenheten att luftmotståndsminskningen till bränsleförbrukningen förhåller sig som 1:4 för en lastad timmerbil, och ungefär 1:3 för en olastad. I figuren redovisas C_d som *drag counts* ($C_d \cdot 1000$). I det nedre högra hörnet återfinns en graf som visar skillnaden mellan den grundläggande referenskonfigurationen och den aerodynamiska referenskonfigurationen för lastat och olastat ekipage. Man kan också notera att en sidblåsningsvinkel på fem grader, som tidigare påpekats, är en mycket

god approximation för att med minst antal simuleringar jämföra en referenskonfiguration med ett aero-koncept.

För att med enklast möjliga medel kunna göra en aerodynamisk förbättring och med utgångspunkt i Figur 28 kan man tänka sig ett sidokjolpaket. Det ger en avsevärd aerodynamisk förbättring men påverkar inte nämnvärt lastning och lossning. Detta kan utformas på en mängd olika sätt (Figur 28). Denna typ av lösning passar väl för att eftermonteras på ett befintligt fordon vilket gör att det snabbare kan få en mycket stor spridning. Sett till hela fordonsflottan är det kanske just en åtgärd av den här typen som kan ge mest effekt. Denna konfiguration erhålls i princip genom att man tar ovan nämnda aerodynamiska referenskonfiguration, bara behåller sidokjolpaketet och utgår därifrån i den fortsatta designen.



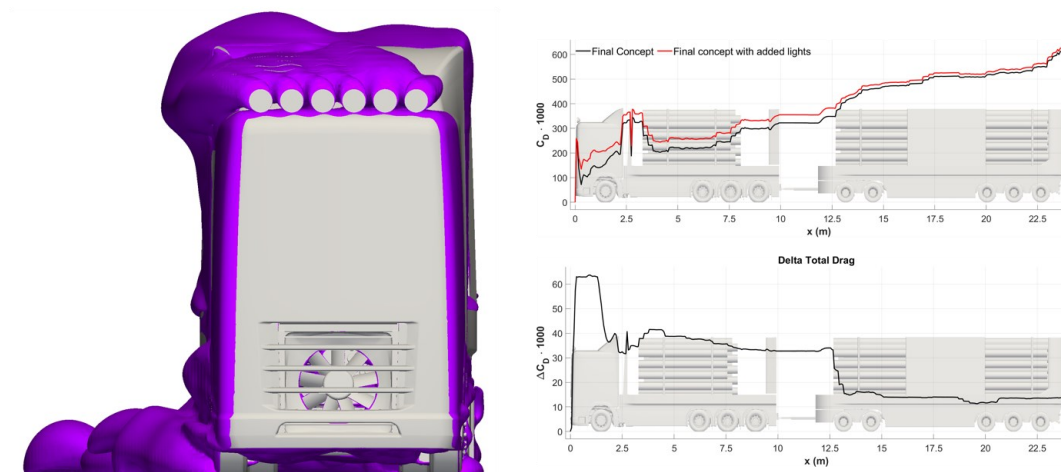
Figur 28. Den aerodynamiska referenskonfigurationens kjolpaket och tillhörande potentiella förbättringar. Dessa är framtagna i syfte att se vad som är möjligt med enkla medel och utan att påverka lastning och lossning.



Figur 29. Den aerodynamiska referenskonfigurationen med potentiella ytterligare förbättringar i syfte att studera relativ påverkan mellan olika delar och hur dessa påverkar varandra. Denna typ av extrema designändringar kräver dels detaljanpassning till respektive fordon, dels hänsyn till hur lastning och lossning sker.

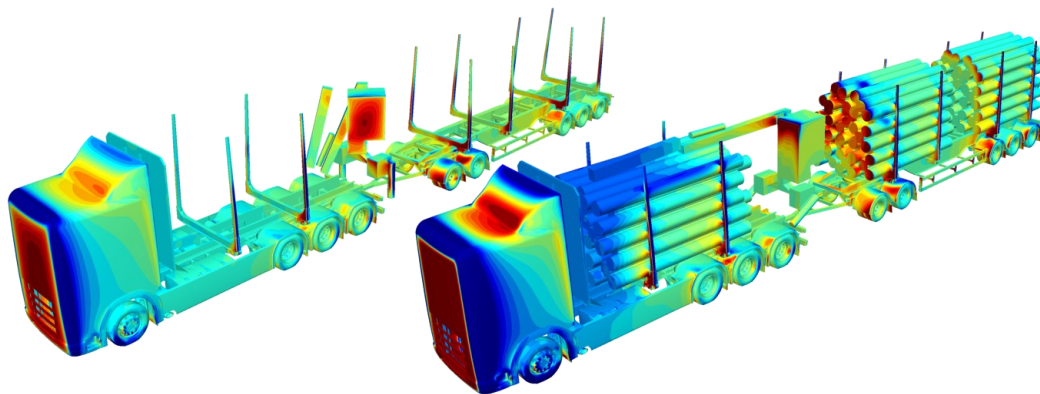
Om man i stället startar med den aerodynamiska referenskonfigurationen och avser att ta den ett steg längre kan man skapa konceptkonfigurationer av den typ som visas i Figur 29. Här är alla variationer på den tidigare beskrivna aerodynamiska referenskonfigurationen för att minska luftmotståndet ytterligare. Man kan notera att i vissa fall minskar inte de redovisade koncepten luftmotståndet såsom önskat. Ibland kommer de olika delarna att samverka på ett negativt sätt och därmed inte bidra till en minskning utan snarare ge en ökning. Man kan också se att det handlar om relativt små förbättringar. Det syns tydligt att man med ett omfattande sköldpaket (ljusblå linje) inte erhåller en så stor förbättring jämfört med de andra (Figur 29).

Kranar och extrautrustning



Figur 30. Genom att använda den virtuella vindtunneln kan man även simulera extrautrustningens påverkan på luftmotståndet. Till vänster tryckkoefficienten och till höger det ackumulerade luftmotståndet och skillnaden.

Det har länge debatterats om olika typer av utrustning, såsom taklyktor, har någon påverkan på luftmotståndet. Figur 30 visar ett exempel där den aerodynamiska referenskonfigurationen utrustas med sex lampor på hyttaket. Man kan se att det blir en klar effekt, upp till 60 drag-counts lokalt men att det på hela bilen blir en relativt liten effekt. Med allt högre bränslepriser kan man notera att varje detalj som bidrar till att minska bränsleförbrukningen bör beaktas.

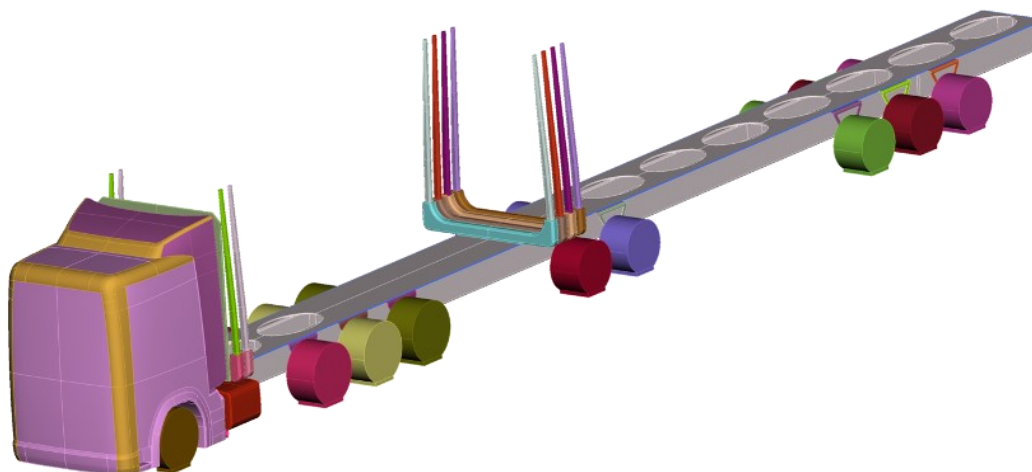


Figur 31 Simulering av rundvirkesbilar med kran. Här visas lastad och olastad konfiguration med kranen i olika position. Den virtuella vindtunneln ger nya möjligheter att utveckla kranar med god aerodynamisk utformning genom att man kan simulera ett mycket detaljerat fordon.

Ytterligare en detalj som kommer att påverka luftmotståndet och som inte fått så stor uppmärksamhet i projektet är det faktum att många timmerfordon också har en kran. I Figur 31 visas två exempel med lastad och olastad timmerbil utrustad med kran. Att

kranen kommer att påverka negativt och orsaka ett ökat luftmotstånd är alldeles klart, särskilt i fallet med ett olastat fordon, medan den göms ganska effektivt bakom timmertraven på bilen i det lastade fallet. Denna typ av studier utgör framtida möjligheter för att förbättra aerodynamiken ytterligare på verkliga fordon.

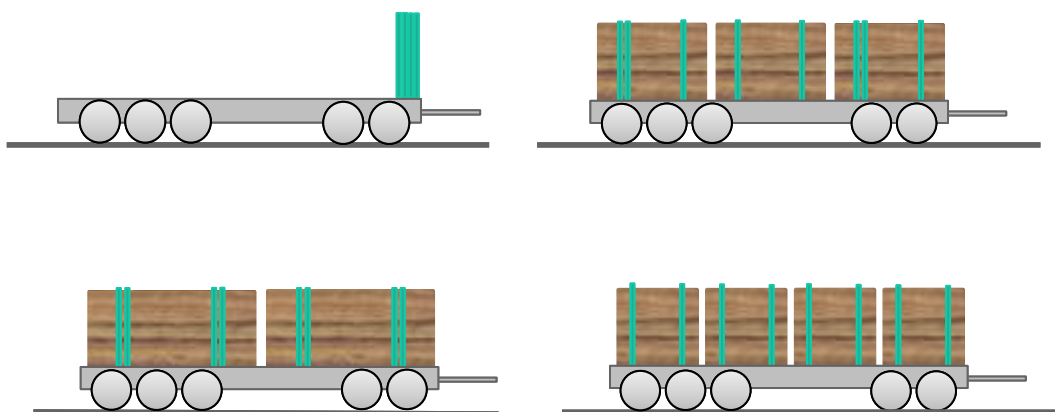
Flyttbara bankar och stakar



Figur 32. Sammandragna stakar visar sig ha en fördelaktig inverkan på luftmotståndet. Denna effekt upptäcktes redan vid vindtunneltester inom ETTaero och har också simulerats i omgångar i ETTaero2.

Redan i förstudien ETTaero gjordes vindtunnelprov med sammandragna bankar och stakar (Figur 32 men då fanns inte tekniken att faktiskt göra det på ett bra sätt. Under projektets gång lanserades dock en idé om hur ett timmerfordons bankar och stakar skulle kunna flyttas ihop på ett enkelt och smidigt sätt i syfte att minska luftmotståndet vid tomkörningen samtidigt som en del andra vinster skulle kunna göras. Systemet har gått under arbetsnamnet FLEXROW men kommer inom kort att kallas HILA (Hydraulic Infinite Linear Actuator) och har utvecklats av Landberg Solutions AB i Linköping.

Kraftigt förenklat bygger HILA-ställdonet på att två kopplade hydrauliska cylindrar, som är öppna i bägge ändar, om vartannat ”klättrar” på en fast inspänd kolvstång med hjälp av hydrauliska klämförband. På så sätt kan cylindern fås att vandra längs stängen på ett sätt som närmast kan liknas vid en mätarlav och samtidigt dra med sig en last, i detta fall en timmerbanke med tillhörande stakar och placera dem på förutbestämda positioner som kan varieras beroende av exempelvis vilka virkeslängder som ska lastas. Kännetecknande för HILA-ställdonet är att unikt långa slaglängder, höga systemtryck och kompakta och lätta ställdonslösningar kan implementeras i krävande miljöer, speciellt i mobila tillämpningar, där det inte finns alternativa lösningar. De tuffa kraven gör att det inte passar med eldrivna kulskrivar eller kuggstänger som ställdon. I jämförelse med konventionella långslagiga hydrauliska cylindrar kan HILA erbjuda kortare, kompaktare och mer lättplacerade ställdonslösningar med långa slag (Landberg m. fl. 2015). [Läs mer här.](#)



Figur 33. Fyra exempel på hur bankar och stakar kan placeras ut på en lastbilsvagn med hjälp av HILA-systemet. Längst upp till vänster står de hopställda för tomkörning, därefter kan de placeras ut för två, tre eller fyra travar beroende av behovet för stunden.

Utvecklingen av HILA-systemet har inte ingått i projekt ETTaero2 men vi har ändå valt att ta med det i nedanstående test, dels för att ge projektgruppen bakom HILA en uppfattning om effekterna, dels då den aerodynamiska effekten är intressant för ETTaero2.

Praktiska körprov

I samband med ett helt annat försök jämfördes ett timmerfordon avsett för tre normala 3,2 meter höga travar med ett fordon med fyra 2,8 meter höga travar. Jämförelsen gjordes med avseende på genomsnittlig lastmängd samt framkomlighet, men det noterades även att fyrtravarsbilen (Figur 34) gick betydligt snålare än tretravarsbilen. Skillnaden uppgick till drygt fem procent (Björheden, Gelin m.fl. 2018). Studien kunde inte belägga orsakssambanden till det, men tanken om bättre aerodynamik kring det större fordonet med tätt lagda travar, kunde inte avskrivas. Eftersom projektet ETTaero2 vid den tiden var moget för en första testbänk i praktisk drift föll valet på detta spännande fordon. Men innan försöket kunde påbörjas ville Curt Göranssons Åkeri bygga om ekipaget något för att få bort en del barnsjukdomar och samtidigt byta dragbil. Det nya ekipaget blev något längre, vilket var avsikten, men det krävdes också dispens för fordonslängden vilket bara kunde medges för vissa specificerade sträckor mellan Hede i Hälsingland och Skutskär i Gästrikland. Dessvärre förlorade åkeriet det transportuppdrag som försöket byggde på innan vi kommit igång ordentligt, varför projektet fick söka sig till andra lösningar.



Figur 34 Genom att tänka stort och tänka nytt kan man skapa helt nya fordon. Här ett försök med ett 25,25 meter långt ekipage avsett för fyra travar. Göranssons Åkeri, Färila.

Pär Fröjds åkeri, som tidigare varit aktuellt i projektet, kontaktades på nytt och accepterade snart att delta med ett försöksfordon. LiU fick göra en del nya beräkningar då Fröjds fordon var av en mer standardmässig typ med lastbil och vagn (se framsidesbilden) vilket gjorde att de aerodynamiska påbyggnaderna behövde få en något annan utformning. För att vinna tid beslutades slutligen att bara bygga på vagnen med kjolar av den typ som visats i exempelvis Figur 23 längst upp till vänster. Dock valde vi att bygga kjolpaketet även runt främre hjulparet samt bakom sista hjulparet, (Figur 35.



Figur 35. Den aero-kittade släpvagnen från Fröjds åkeri i Kisa. På bilden har stakar och bankar ställts ihop inför aerodynamiska studier för att efterlikna användande av Flexrow.

Materialet i kjolarna är en relativt styv plast, levererad av Plastomer i Västervik, av samma typ som används till bland annat stänkskydd. Nedre delen mellan axelgrupperna är av mjukare material av den typ som används i stänklapparna bakom hjulen. Materialvalet gjordes till stor del baserat på dess låga vikt, lätthet att bearbeta och forma, att det är billigt i inköp samt att det håller även om det tar i ibland.

Studieresultat

I oktober 2021 var ekipaget i gång på allvar varvid datainsamling påbörjades och en särskild fokusstudie genomfördes avseende de aerodynamiska fördelarna. Den senare genomfördes så att fordonet accelererades upp till en hastighet om 80–85 km/h varefter växellådan lades i friläge och retardationsförloppet registrerades noggrant med hjälp av

en särskild logger kopplad till lastbilens interna datasystem (Noreland & von Hofsten 2022). Totalt kördes tre försöksled med tio upprepningar vardera. Försökleden var: 1) Med aerokit samt bankar och stakar hopställda. 2) Med aerokit samt bankar och stakar i sina vanliga positioner. 3) utan aerokit, men med underkörningsskydd samt bankar och stakar i sina vanliga positioner.

Resultaten av fokusstudien pekar på att systemet med bankförskjutning och aerodynamiska kjolar kan minska bränsleförbrukningen för ett timmerfordon med 1–2 procent i genomsnitt utan att inverka menligt på användningen. Då ett genomsnittligt timmerfordon körs 180 000 km per år innebär en procents minskning av en förbrukning på 40 l/100 km att 720 liter drivmedel per år kan sparas, eller 15 000 kr räknat på ett drivmedelspris om 21 kr per liter. Driftuppföljningen som pågått några månader pekar i samma riktning med något högre värden, motsvarande en besparing på knappt två procent vid jämförelsen med och utan aerokit.

Fordonets förare berättade under en intervju att han blivit positivt överraskad av hur väl släpet fungerat framkomlighetsmässigt. Detta även under de bitvis ganska svåra förhållanden som råder i Götalands enskilda vägnät med smala vägar, tvära kurvor och begränsat utrymme bredvid vägen. Även lastning och lossning uppges ha fungerat klanderfritt utan att störa kranförarna.

Slutsatser av ETTaero2

Genom att bygga upp en automatiserad process som fungerar som en virtuell vindtunnel kan man förenkla utvecklingsarbetet från koncept till funktionell prototyp högst avsevärt och bland annat helt utesluta behovet av att bygga skalenliga modeller avsedda för vindtunneltester. Naturligtvis kan den virtuella vindtunneln även användas för fortsatt utveckling från funktionell prototyp till fullständig produkt, men det ligger bortom föreliggande projekts mål.

Resultaten från de genomförda simuleringarna och de prelimära vägprov som genomförts ger vid handen en funktionell helhet som visar att den nya arbetsgången som tagits fram inom det modifierade projektet ETTaero2 fungerar till fullo och kan därmed användas för andra projekt avseende aerodynamisk omkonfigurering av fordon för skogliga transporter.

De enkla kjolpaketen som framtagits i prototypform och som testats via vägprov visar dels att överensstämmelsen mellan resultaten från den virtuella vindtunneln och vägproven är mycket god, dels att acceptansbarriären är passerad.

När det gäller de mer omfattande koncepten är dessa framtagna med bivillkoret att de ska gå att producera och att de med råge ska passera acceptansbarriären. De preliminära resultaten indikerar att så är fallet och att framtiden kommer att utvisa hur nästa generation fordon för rundvirkestransporter kommer att se ut.

Man kan vidare notera att ett projekt med många intressenter och aktörer inte är enkelt att administrera bland annat på grund av att olika parter befinner sig på olika positioner i utvecklingskedjan. Det är helt naturligt men kan leda till otydlighet om var projektet befinner sig, vart det ska och hur man kommer vidare. I och med att den flerstegsmetod vi utvecklat och använt inom projektet har en naturligt inbyggd mekanism för dialog har missuppfattningar och överkomplicerade lösningar eliminerats.

Projektet är framme vid målet, men längs en mycket annorlunda väg än den som planerades när projektansökan formulerades.

Referenser och litteratur

- Björheden, R., Gelin, O., Henriksen, F. och von Hofsten, H. 2018. ETT-push – virkesbil med fyra travar och hjälppdrift på linken. Skogforsk, Arbetsrapport 980.
- Colombi, R. 2018. CFD Investigation of Aerodynamic Drag Reduction of an Unloaded Timber Truck, Thesis LiU-IEI-TEK-A 18/03231, 2018.
- Ekman, P. 2020. Important Factors for Accurate Scale-Resolving Simulations of Automotive Aerodynamics, *Dissertations* No 2068, Linköping University, 2020.
- Ekman, P., Alfredsson, E., Huge-Brodin, M., Karlsson, M. 2017. Aerodynamics of a Light Truck – Drag Reduction Investigations Using Computational Fluid Dynamics and Full-Scale Road Tests, 4th Sustainable Road Freight Conference, Cambridge, UK, 2017.
- Ekman, P., Gårdhagen, R., Virdung, T. and Karlsson, M. 2015. Aerodynamic Drag Reduction – from Conceptual Design on a Simplified Generic Model to Full-Scale Road Tests, SAE Technical Paper, 2015-01-1543.
- Ekman, P., Gårdhagen, R., Virdung, T. and Karlsson, M. 2016. Aerodynamics of an Unloaded Timber Truck – A CFD Investigation, *SAE Int J Commer Veh* 9(2):2016.
- Ekman, P., Gårdhagen, R., Virdung, T. and Karlsson, M. 2016. Aerodynamics of an Empty Timber Truck – a Numerical and Experimental Investigation, *Aerovehicles2*, Gothenburg 2016.
- Ekman, P., Gårdhagen, R., Virdung, T. and Karlsson, M. 2016. Aerodynamic Drag Reduction of a Light Truck – from Conceptual Design to Full Scale Road Tests, SAE 2016-01-1594.
- Ekman, P., Karlsson, M. 2018. Importance of Vehicle Distances in a Long Vehicle Platoon, 5th International Workshop on Sustainable Road Freight Transport, Cambridge, UK, 2018.
- Ekman, P., Larsson, T., Virdung, T., Karlsson, M. 2019. Accuracy and Speed for Scale-Resolving Simulations of the DrivAer Reference Model, SAE Technical Paper, 2019-01-0639.
- Ekman, P., Venning, J., Virdung, T., Karlsson, M. 2021. Importance of Sub-Grid Scale Modelling for Accurate External Aerodynamics Simulations, *ASME Journal of Fluids Engineering*, Jan 2021, 143(1), 2021.
- Ekman, P., Vieser, D., Virdung, T., Karlsson, M. 2020. Assessment of Hybrid RANS-LES Methods for Accurate Automotive Aerodynamic Simulations, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Volume 206, November 2020.
- Ekman, P., Virdung, T., Karlsson, M. 2016. Evaluation of the Stress Blended Eddy Simulation Model for External Aerodynamic Applications, ANSYS Automotive Simulation World Congress 2016.
- Fattahi, S., Ekman, P., Gårdhagen, R., Karlsson, M. 2022. Aerodynamics of timber trucks – concepts for the future, In manuscript.
- Fattahi, S., Ekman, P., Karlsson, M. 2021. Influence of the Timber Shape on the Aerodynamics of a Timber Truck, SAE Technical Paper 2021-01-5045, 2021.
- Fernandez del Rio, F. 2018. CFD Investigation of Aerodynamic Drag Reduction for a Fully Loaded Timber Truck, Thesis LiU-IEI-TEK-A 18/03232, 2018.

- Gårdhagen, R. von Hofsten, H. Fattahi, S. Ekman, P. Karlsson, M. 2022. Aerodynamically reconfigured timber trucks – aspects of driving economy and usability. Manuscript in preparation.
- Gustavsson, M. and Johansson, S. 2019 Investigation of Timber Vehicle Aerodynamics using CFD - A study of the aerodynamic influence of timber, drag reduction devices, and CFD method automation. LIU-IEI-TEK-A 19/03420, 2019.
- Huge-Brodin, M., Karlsson, M., Martinsen, U. 2016. Speeding up the greening of transport- and logistics services, 3rd Sustainable Road Freight Conference, Cambridge, UK, 2016.
- Johannes, E., Ekman, P., Huge-Brodin, M. and Karlsson, M. 2018. Sustainable Timber Transport Through Aerodynamic Configuration, *Sustainability* 10(6), 2018.
- Karlsson, M., Gårdhagen, R., Ekman, P., Söderblom, D and Löfroth, C. 2015. Aerodynamics of timber trucks – a wind tunnel investigation, SAE Technical Paper 2015-01-1562.
- Landberg, M., Hochwallner, M., and Krus, P., “Novel Linear Hydraulic Actuator”. ASME/BATH 2015 Symposium on Fluid Power and Motion Control (FPMC2015).
- Lopez Fuentes, X. 2018. CFD Investigation of Aerodynamic Drag Reduction for a Wood Chip Truck, Thesis LiU-IEI-TEK-A 18/03234, 2018.
- Noreland, D., von Hofsten, H. 2022. Aero-kittad timmerbil för minskad bränsleförbrukning. Skogforsk, Arbetsrapport 1107.