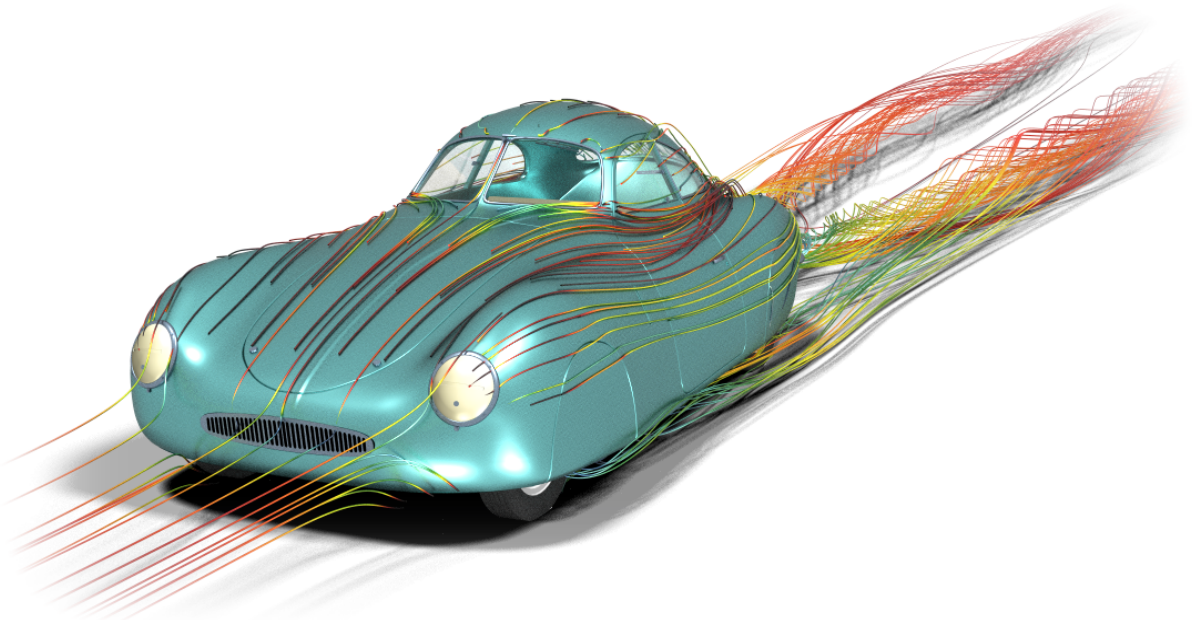




# CHALMERS

---



## **Aerodynamisk och historisk analys av bilen Type 64**

Kandidatarbete inom mekanik och maritima vetenskaper

VIKTOR DAHL SVENSSON  
DANIEL KÄLL  
DENNIS KÖHLBERG  
ALBERT LUNDGREN  
ADAM OLSON  
HELENA WEINGARTEN



KANDIDATARBETE 2020:03

# Aerodynamisk och historisk analys av bilen Type 64

Viktor Dahl Svensson  
Daniel Käll  
Dennis Köhlberg  
Albert Lundgren  
Adam Olson  
Helena Weingarten



**CHALMERS**

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2020

## Aerodynamisk och historisk analys av bilen Type 64

Viktor Dahl Svensson  
Daniel Käll  
Dennis Köhlberg  
Albert Lundgren  
Adam Olson  
Helena Weingarten

© Viktor Dahl Svensson, Daniel Käll, Dennis Köhlberg, Albert Lundgren, Adam Olson, Helena Weingarten, 2020.

Kandidatarbete 2020:03  
Handledare: Johannes Törnell  
Examinator: Lennart Löfdahl  
Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper  
Chalmers tekniska högskola  
SE-412 96 Göteborg  
Sverige  
Telefon: +46 (0)31-772 1000

Omslag:  
Bilen Type 64 med pålagda färgglada strömlinjer, sedd snett framifrån.

Tryckeri/Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper  
Göteborg, Sverige 2020:03

# Sammanfattning

Type 64 är en tävlingsbil som tillverkades av Ferdinand Porsche under 1930-talet, det är en bil med en gedigen och omtalad, men framförallt något oviss historia. Bilen blev åter aktuell i augusti 2019 då en av de återstående bilarna lades ut till försäljning på en auktionsfirma, under benämningen Porsche Type 64, där framför allt Porschemärket skapade debatt. Eftersom det är en gammal bil som endast tillverkades i tre exemplar finns det inte någon information kring bilens aerodynamiska prestanda. Rapportens syfte är därför att genomföra simuleringar för att bestämma denna, samt reda ut dess historia.

Med befintliga koordinater på bilen, analyserades dess aerodynamik med hjälp av Computational fluid dynamics. För att få en bättre förståelse över bilens beteende genomfördes simuleringarna i olika scenarier i form av varierande hastigheter, anströmningsvinklar (yaw-vinklar) samt fall med och utan hjulkåpor. Resultaten från simuleringarna gav värden på luftmotståndskoefficienten  $C_D$  och lyftkraftskoefficienten  $C_L$ , samt hur normalkraftsfördelningen på bilen förändrades.

Resultaten analyserades och tolkades tillsammans med figurer från simuleringarna, för att förstå resultatens innebörd. Från resultaten framgick det tydligt att bilens normalfördelning förskjuts framåt då hastigheten ökar, vilket gäller för samtliga fall vare sig det är med eller utan kåpor, eller med en förändrad anströmningsvinkel. Jämförelsen med och utan kåpor visade att då kåporna avlägsnats ökade både luftmotståndet och lyftkraften. Överlag är luftmotståndet relativt lågt och förändras inte nämnvärt mellan olika fall då hastigheten förändras, vilket är positivt ur ett designperspektiv. När det gäller lyftkraften sker störst förändring på bilens framaxel där beloppet ökade markant, vilket är den största anledningen till att normalfördelningen förskjuts framåt. Därmed är det denna faktor som har störst inverkan på bilens beteende och tenderar att göra den över- eller understyrd.

Arbetet är skrivet på svenska.

Nyckelord: bil, aerodynamik, CFD-simulering, STAR-CCM+, Porsche, Type 64, lyftkraft, luftmotstånd,  $C_L$  &  $C_D$ , strömningsteori.



# Abstract

Type 64 is a race car built by Ferdinand Porsche in the 1930s, it is a car with a solid and well-spoken, but somewhat uncertain history. In August 2019, the car once again became a topic of discussion, when one of the remaining cars was put up for sale at an auction company. The label was Porsche Type 64, and it was the designation name Porsche that created a great debate. Since it is an old car and only three were built, there is no specification regarding the car's aerodynamic performance. Therefore, the object of the report, is through simulations, analyses, and history, determine the aerodynamic performance and sort out the well debated label Porsche.

With Computational fluid dynamics and already existing coordinates, the aerodynamical performance was analysed. Different simulations were performed with the use of different velocities, varying yaw-angles, wheel housings attached and unattached, to gain a better understanding of the car's behaviour. The results from the simulations gave values of the air resistance coefficient  $C_D$  and the lift coefficient  $C_L$ , as well the change of the normal force distribution.

Interpretation of the result and analysis was made together with images from the simulations, to gain a better understanding of the car's behaviour. It clearly shows the normal distribution change towards the front end of the car, as the speed and yaw-angle increase. This concerns every case regardless the set-up type of the wheel-house. The results however showed overall increasing drag and lift forces when the wheel housing was unattached. The drag coefficient is relatively small and stayed unchanged through different velocities, which can be considered positive from a car design perspective. The biggest contribution to the change of normal force distribution, is to be found at the front axle. Where the lift force seemingly changes through different set-ups. Therefore, this is the number one reason to the change of the car's behaviour.

The work is written in Swedish.

Keywords: car, aerodynamics, CFD-simulations, STAR-CCM+, Porsche, Type 64, lift force, air resistance,  $C_L$  &  $C_D$ , flow theory.



## Förord

Denna rapport presenterar det slutgiltiga resultatet av ett kandidatarbete som pågick under perioden 2020-01-20 till 2020-05-26 vid institutionen för mekanik och maritima vetenskaper vid Chalmers tekniska högskola, Göteborg, Sverige. Syftet var att undersöka aerodynamiken på bilen Type 64, samt ta fram en historisk bakgrund om den. Bilens aerodynamiska egenskaper analyserades vid olika hastigheter och yaw-vinklar genom simuleringar med CFD-programmet STAR-CCM+. Det är rekommenderat att läsaren av detta kandidatarbete har grundläggande kunskap inom strömningsmekanik för att kunna få en full förståelse av innehållet i rapporten.

Gruppen skulle vilja ge ett extra tack till kandidatarbetets handledare Johannes Törnell som kontinuerligt har varit till stor hjälp under hela arbetsgången. Vi skulle också vilja ge ett stort tack till professorn Lennart Löfdahl som även han har bidragit med en fantastisk insats och varit till stöd under hela arbetet. Vi skulle även vilja ge ett tack till följande: Simone Sebben och Andreas Eriksson för deras expertis.



# Innehållsförteckning

<b>Nomenklatur</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Inledning</b>	<b>1</b>
1.1 Syfte . . . . .	1
1.2 Precisering av frågeställningen . . . . .	2
1.3 Bilens historia . . . . .	2
1.4 Avgränsningar . . . . .	5
<b>2 Teori</b>	<b>7</b>
2.1 Fordonsaerodynamik . . . . .	7
2.2 Strömningsteori . . . . .	8
2.2.1 Reynolds-tal . . . . .	8
2.2.2 Gränsskikt . . . . .	8
2.2.3 Luftmotstånd och lyftkraft . . . . .	9
2.3 Finita volymmetoden . . . . .	9
2.3.1 Celltyp och mesh . . . . .	9
2.4 $k - \omega$ SST modellen . . . . .	10
<b>3 Metod</b>	<b>11</b>
3.1 Historisk studie . . . . .	11
3.2 Teknisk metodik . . . . .	11
3.2.1 CAD-modell . . . . .	11
3.2.2 Simulering . . . . .	12
3.2.3 Konvergensstudie . . . . .	20
3.2.4 Mesh-studie . . . . .	21
<b>4 Resultat</b>	<b>23</b>
4.1 Yaw-vinkel noll och varierande hastigheter . . . . .	23
4.1.1 Med kåpor . . . . .	23
4.1.2 Utan kåpor . . . . .	24
4.1.3 Grafisk visualisering . . . . .	24
4.2 Varierande yaw-vinklar och hastigheter . . . . .	25
<b>5 Analys</b>	<b>27</b>
5.1 Basfall med yaw-vinkel noll grader . . . . .	27
5.1.1 Luftmotstånd . . . . .	28
5.1.2 Lyftkraft . . . . .	31

5.2	Varierande yaw-vinklar . . . . .	34
5.2.1	Luftmotstånd . . . . .	34
5.2.2	Lyftkraft . . . . .	36
5.3	Bilens beteende . . . . .	37
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>39</b>
6.1	Metod . . . . .	39
6.2	Analys . . . . .	41
<b>7</b>	<b>Slutsats</b>	<b>43</b>
7.1	Körbeteende . . . . .	43
7.2	Rekommendation till fortsatt arbete . . . . .	43
	<b>Referenser</b>	<b>45</b>
	<b>Appendix A Figurer till analys</b>	<b>I</b>

# Nomenklatur

## Förkortningar

CAD	Computer-aided design
CFD	Computational fluid dynamics
DNS	Direkt Numerisk Simulering
FV	Förfiningsvolym
FVM	Finita volymmetoden
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
SST	Shear stress transport

## Datorprogram

ANSA	Pre-processing program
STAR-CCM+	Simuleringsprogram

## Variabler

$\epsilon$	Turbulenta dissipationsgraden
$\kappa$	Konstant
$\mu$	Viskositet
$\nu$	Kinematisk viskositet
$\omega$	Specifika turbulenta dissipationsgraden
$\rho$	Densitet
$A$	Area
$B$	Konstant
$C_D$	Luftmotståndskoefficient
$C_L$	Lyftkraftskoefficient
$C_{LB}$	Lyftkraftskoefficient bak
$C_{LF}$	Lyftkraftskoefficient fram
$F_b$	Lyftkraft bak
$F_D$	Luftmotstånd
$F_f$	Lyftkraft fram
$F_L$	Lyftkraft

$F_{NB}$	Normalkraftsfördelning bak
$F_{NF}$	Normalkraftsfördelning fram
$k$	Turbulent kinetisk energi
$L$	Längd
$M_{b\_väg}$	Moment bak
$M_{f\_väg}$	Moment fram
$r$	Radie
$Re$	Reynolds-tal
$u^+$	Dimensionslös hastighet
$u^*$	Dimensionslös hastighet
$V$	Hastighet
$v$	Relativ hastighet
$y^+$	Dimensionslös längd

# 1

## Inledning

Type 64 är en tävlingsbil som tillverkades av Ferdinand Porsche på sent 1930-tal, under denna tid blev strömlinjeformade bilar allt mer populära. De olika tillverkarnas modeller kunde ha en markant skillnad i vikt, där Type 64 anses vara en lätt bil i jämförelse med dåtidens konkurrerande bilmodeller. I kombination med den strömlinjeformade designen, en hög markfrigång, smala däck samt motorn monterad bakom bakaxeln, gör att bilen spekuleras vara ett instabilt fordon, på grund av dessa faktorer.

Trots att bilen besitter en intressant historia och är välkänd bland bilentusiaster, har inga tidigare studier gjorts av aerodynamiken, vilket gör att det råder en osäkerhet kring hur bilen uppträder vid högre hastigheter. Med användning av befintliga koordinater för bilens utformning kan en modell skapas och analyseras med hjälp av Computational fluid dynamics (CFD).

Anledningen till att bilen har blivit allt mer aktuell under det senaste året är att en av bilarna auktionerades ut i augusti 2019 med benämningen "Porsche Type 64" vilket startade en stor debatt bland bilentusiaster [1]. Debatten var inte angående bilens aerodynamik utan istället dess historia och framför allt bilens märke "Porsche". Eftersom Ferdinand Porsche fick uppdraget av Volkswagen som både beställde och finansierade för bilarna, ställdes frågan om Type 64 verkligen är en Porsche [2].

### 1.1 Syfte

Genom att studera en bil i rörelse kan de krafter som påverkar bilen beräknas med hjälp av strömningsmekanikens lagar. Dessa krafter förekommer som både lyftkrafter och luftmotstånd, vilka kan påverka bilens aerodynamiska prestanda. Syftet med detta projekt är att undersöka aerodynamiken på bilen Type 64, samt ta fram en historisk bakgrund om den. Aerodynamiken undersöks för att det tidigare inte gjorts några studier på bilen och hur dessa krafter påverkar körbeteendet. Historien undersöks för att avgöra varför och hur många bilar som tillverkats, samt var de befinner sig idag, men även för att ta reda på bilens tekniska specifikationer som är nödvändiga för att kunna genomföra projektet.

### 1.2 Precisering av frågeställningen

Med CFD-simuleringar ska lyftkraftskoefficienten,  $C_L$ , och luftmotståndskoefficienten,  $C_D$ , tas fram för att beräkning av lyftkraft och luftmotstånd som verkar på bilen ska vara möjligt. Simuleringar där vinden anbringas rakt framifrån genomförs både med och utan kåpor för att undersöka vilken inverkan kåporna har på bilen. Simuleringarna innefattar även fall då sidvind i olika vinklar anbringas för att se hur detta påverkar bilen. Resultatet från simuleringarna kommer ge ett underlag för resonemang huruvida bilens körbeteende ändras vid sidvind och olika hastigheter.

Bilens historia kartläggs för att ta reda på om bilen är en Porsche eller ej, men också för att försöka hitta ett verkligt underrede, då projektet endast tilldelats en platt geometri till cad-modellen. Vid användning av ett korrekt underrede skulle simuleringarna bidra med ett mer exakt resultat. Även vikt och viktfördelning är av relevans då beräkningar ska utföras, därav kartläggs även tekniska specifikationer om bilen.

### 1.3 Bilens historia

Under 1930-talet så ökade intresset för strömlinjeformade bilar och anledningen var att genom de stora förbättringarna av vägarna så gavs möjligheten att köra fortare. Den strömlinjeformade designen var för att kompensera för dåtidens tunga motorer med låg prestanda och växellådor som begränsade möjligheten att köra i högre hastigheter.

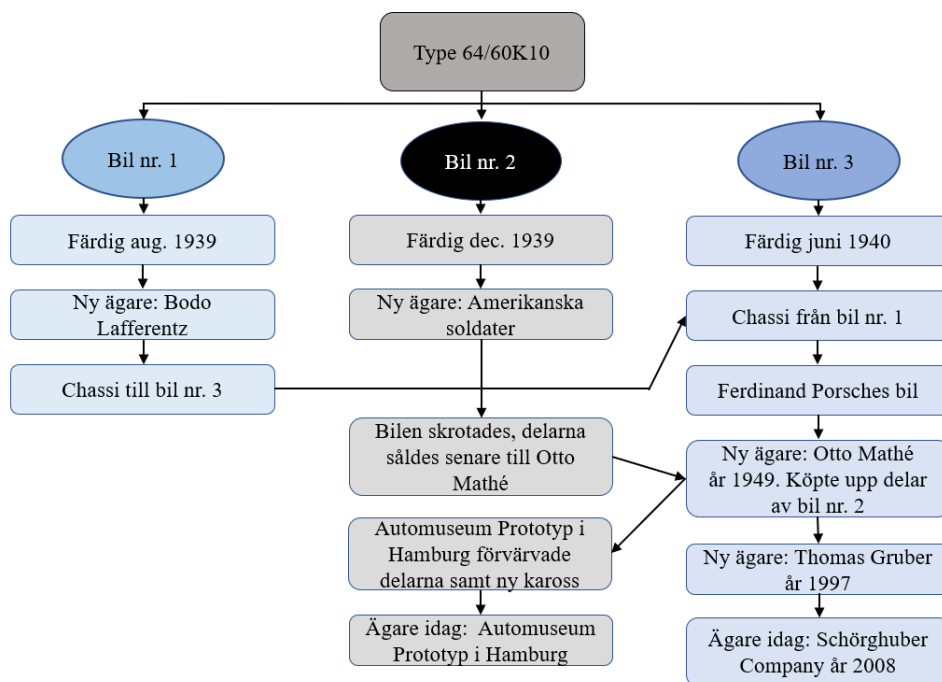
Många länder i Europa genomförde stora satsningar på vägar, det byggdes större vägbanor som kallades motorvägar. Motorvägarna skulle skapa frihet och ena folket genom att samhället fick möjlighet att använda sin egen bil för att förflytta sig längre sträckor. De nya vägarna skulle såklart visas upp och detta gjordes genom ett så kallat "road-race" som sträckte sig från Berlin till Rom, en total sträcka på 1500 kilometer. Från Berlin skulle det köras på den nybyggda motorvägen A9 ner till München och sedan vidare ner till Brenner Pass genom Österrike. Till slut skulle avstängda italienska motorvägar leda till Rom. Tävlingen var tänkt att genomföras i september 1939 [3].

Loppet gav inte bara en chans att visa upp vägarna, utan var även ett perfekt tillfälle att demonstrera den tyska ingenjörskonsten. Detta skulle göras genom att bygga en sportbil som idag är väldigt omtalad, nämligen Type 64 eller 60K10 som den egentligen heter. Personen som fick i uppdrag att tillverka denna bil var Ferdinand Porsche, som sedan tidigare hade utfört arbeten åt den tyska regeringen. För att bättre förstå hur bilen har uppkommit behöver en djupdykning av historien göras [4].

Porsche fick bland annat i uppdrag att designa en Volkswagen "folkets bil" i mitten av 1930-talet som skulle kallas KdF-Wagen. Tanken var att massproducera bilar

till vanligt folk vilket började med 150 000 exemplar som senare var tänkt att växa till 500 000. Bilen skulle tillverkas i olika utföranden för att passa olika personers behov, en modell blev senare känd som "The Beetle". Denna bil kallades för Type 60 i Porsches arbetsgrupp. Porsches företag gick mycket bra och han ville tillverka en sportvariant som var byggd på KdF-delar vilken han själv hade designat. Problemet var att under denna tid var det inte tillåtet för KdF att sälja delar till ett privat företag, samt att KdF-ledningen ansåg att det inte fanns något behov för den vanliga tysken att köra en sportbil, så dessa planer skrotades [4].

År 1938 väcktes åter idén att tillverka en sportbil till liv. Porsche och hans arbetsgrupp hade nu möjligheten att designa, finansiera och tillverka en sportbil på egen hand. Bilen designades och fick namnet Type 114 och smeknamnet F-Wagen, "F" för Ferdinand och Ferry, där den sistnämnde var Porsches son. Bilen hann inte komma mer än till ritningarna innan Ferdinand Porsche fick i uppdrag av tyska regeringen att bygga en sportbil för Berlin-Rom tävlingen. Fordonet grundades på en Volkswagen-plattform men blev modifierad på många sätt. Karossen inspirerades till stor del av Erwin Komeda's design för Type 114 F-Wagen fast med vissa modifikationer, som mobila hjulkåpor och en större bränsletank. Enligt historiken Hans-Karl Lange hoppades Porsche på att regeringen senare både skulle tillverka bilen och betala för den [4]. Vissa tveksamheter när bilarna färdigställdes finns, men karossen till den första bilen blev klar den 19 augusti 1939. Bil nummer två tros ha färdigställts i december samma år och den sista bilen i juni 1940 [2]. Berlin-Rom loppet blev dock aldrig av på grund av andra världskrigets utbrott [3]. Figur 1.1 nedan visar ett flödesschema över de tre bilarnas historia fram tills idag.



**Figur 1.1:** Flödesschema över de tre bilarna från dess färdigställande till idag [2], [4], [5].

Totalt byggdes tre bilar under namnet Type 64/60K10. Bodo Lafferentz var mannen som blev ägare till den första av de tre bilarna, bil nummer ett, som han år 1941 krockade med så illa att den inte gick att reparera. Den andra bilen fick amerikanska soldater tag i efter kriget och användes då för nöjes skull. De kapade av taket och körde bilen tills motorn gav upp. Ferdinand Porsche ägde den tredje och sista bilen och det var denna som Ferry satte emblemet "Porsche" på. Det var även denna bil som var den första någonsin att få detta emblem. Otto Mathé köpte, år 1949, den tredje bilen och han ägde den ända till sin bortgång år 1994. Eftersom Mathé bara kunde använda en arm flyttade han ratten till höger sida på bilen samt gjorde en del andra modifieringar under tiden, såsom att registrera den med registreringsnumret T2.222 [4].

De tre bilarna fick olika chassinummer tilldelade, första bilen fick 38/41, andra bilen fick 38/42 och den tredje och sista bilen fick 38/43. Bilarna fick också olika färg på lacken där den första och sista bilen som tillverkades var silvriga medan bil nummer två hade en mörk färg. Två av bilarna finns idag kvar. Delarna av den andra tillverkade bilen, efter att den körts sönder och skrotats, köptes upp av racerföraren Otto Mathé som skulle använda bilen till reservdelar för hans dåvarande bil, om den skulle gå sönder under de olika tävlingarna. Otto Mathé lämnade efter sig delarna vilket senare förvärvades av Automuseum Prototyp i Hamburg. Med användning av de befintliga delarna togs i princip ett helt chassi fram, detta tillsammans med en replika av den mörka karossen kunde en fullständig bil tas fram, där bilen nu kan ses på museet. Den andra bilen som finns kvar är bil nummer tre, som av okänd anledning fick chassit från bil nummer ett mellan år 1940–1945 [2]. Sedan 2008 ägs bilen av Schörghuber Company, men det var ägaren Thomas Gruber som köpte bilen år 1997, som också fick ratten monterad tillbaka till ordinarie sida [5]. Tabell 1.1 nedan visar mer specifika detaljer om de tre bilarna.

**Tabell 1.1:** Teknisk specifikation om de tre bilarna [2].

Modul/bilnummer	Bil nr. 1	Bil nr. 2	Bil nr. 3
Chassinummer	38/41	38/42	38/43 eller 38/41
Cylinderdiameter × slaglängd	70 × 64 [mm]	75 × 64 [mm]	73,5 × 64 [mm]
Vikt	615 [kg]	585 [kg]	545 [kg]
Motor	4 cylinder boxermotor		
Motorvolym	Original 985, senare möjligtvis 1131 och 1085 [cc]		
Motorventil	31 [mm]		
Viktfördelning	40% front och 60% bak		
Maxhastighet	Teoretiskt 173,5; verklig 140 [km/h]		
Växellåda	4-växlar		
Däck	4,5 × 16, senare under Mathés tid 5 × 15 [in]		
Bränsletank	50 [liter]		
Längd × Bredd × Höjd	4000 × 1700 × 1250 [mm]		

## 1.4 Avgränsningar

För att analysera aerodynamiken på Type 64 kommer endast CFD-simuleringar användas och inga verkliga tester kommer genomföras (vindtunneexperiment), då detta hade krävt för mycket resurser. Underredet av bilen kommer att efterforskas men om inget resultat erhålls kommer som ersättning ett slätt underrede att användas vid CFD-simuleringarna. Resurserna till efterforskning av historien och bilens underrede kommer att läggas i början av projektet, eftersom det är en vital del för resten av arbetet. När godtagbar fakta erhållits kommer det inte genomföras någon fortsatt studie på bilens ursprung, utformning och antalet.

Samtliga CFD-simuleringar kommer köras med förenklade modeller, av den anledning att Direkt Numerisk Simulering (DNS) inte är möjliga att utföra under arbetets gång. Vid DNS beräknas Navier-Stokes ekvationer numeriskt genom att ta fram hela utsträckningen av spatiala och temporära skalor av turbulens. Efter val av beräkningsmodell kommer samtliga simuleringar utföras med denna. Antalet volymceller som ska genereras vid CFD-simuleringarna begränsas av den datorkraft som tilldelats. Samtliga tester kommer att utföras med stationära simuleringar då de instationära simuleringarna kräver betydligt mer datorkraft. Stationära simuleringar undersöker bara fluidens tillstånd och dess egenskaper i en punkt vid ett tillfälle och är då tidsberoende, medan instationära följer punktens förflyttelse över tid.



# 2

## Teori

I detta kapitel behandlas den bakomliggande teorin till fordonsaerodynamik, strömningsteori, finita volymmetoden och lösningsmodellen  $k - \omega$  SST. Delen om fordonsaerodynamik beskriver relevant fakta som behandlar luftmotstånd och lyftkrafter, men även varför ett fordons aerodynamik studeras. Strömningsteorin inkluderar de ekvationer som används för att ta fram krafter på bilen samt Reynolds-tal och gränsskikt. Slutligen behandlas finita volymmetoden och  $k - \omega$  SST modellen som beräknar och diskretiserar de ekvationer som beskriver en fluid.

### 2.1 Fordonsaerodynamik

En undersökning kring aerodynamiken görs för att bestämma hur stora och vilka krafter den kringliggande luften frambringar på bilen. Med hjälp av de strömningmekaniska lagarna kan exempelvis lyftkraften och luftmotståndet tas fram, för att på så sätt beräkna lyftkraftkoefficienten och luftmotståndskoefficienten. Detta görs för att kunna analysera fordonets luftmotstånd och lyftkraft och på så sätt möjliggöra förbättringar på ett fordons aerodynamik [6]. Det är av intresse då en optimering av aerodynamiken leder till att mindre kinetisk energi krävs för att få bilen att färdas framåt, vilket minskar bränsleförbrukningen.

Vid tillverkning av tävlingsbilar läggs ett stort fokus på den aerodynamiska utformningen, dels för att kunna minska luftmotståndet och dels för att optimera den negativa lyftkraften (neråtriktad kraft). Genom att minska luftmotståndet möjliggörs en högre maxhastighet och en större negativ lyftkraft ger möjlighet till en ökad hastighet genom kurvor.

Det har utförts ett flertal olika kandidatarbeten där aerodynamiken på äldre fordon har studerats, vilket görs för att ingen tidigare analys har genomförts med moderna aerodynamiska simuleringsprogram som metod. Detta lägger en grund över hur aerodynamiskt optimerade dessa fordon är inom exempelvis stabilitet. Ett kandidatarbete som utfördes på Chalmers tekniska högskola 2015 studerade aerodynamiken på en Mercedes-Benz 300SLR, vilket gjordes genom att testa bilen i moderna simuleringsprogram, något som inte var möjligt när bilen tillverkades [7]. Det här är ett exempel av flera liknande kandidatarbeten.

## 2.2 Strömningsteori

För att beräkna krafterna som verkar på bilen vid olika hastigheter och vindriktningar behöver luftmotstånd och lyftkrafter tas fram. Utan dessa blir resultatet lätt irrelevant eftersom de har en stor påverkan på bilen. Krafterna tas fram genom CFD-simuleringar, vilket innebär att datorn använder sig av Reynolds-Average Navier-Stokes (RANS) i ett turbulent tillstånd för att beräkna numeriska värden på flödet med hjälp av lämpliga randvillkor [8].

$$\rho \frac{d\bar{u}}{dt} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \rho g_x + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \overline{\rho u'^2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \overline{\rho u'v'} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \overline{\rho u'w'} \right) \quad (2.1)$$

### 2.2.1 Reynolds-tal

Reynolds-talet beskriver en fluids beteende och används för att förutse dess flödesmönster. Generellt sett innebär låga Reynolds-tal ett laminärt gränsskikt medan höga tal ofta medför turbulenta gränsskikt. Reynolds-talet beräknas enligt

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (2.2)$$

där  $V$  och  $L$  är hastigheten och längden på flödet,  $\rho$  är densiteten och  $\mu$  är viskositeten hos fluiden [8].

### 2.2.2 Gränsskikt

Gränsskiktet är det område som ligger precis intill en yta där anströmning av en fluid sker och har stor påverkan på dess beteende. Avståndet från ytan betecknas med  $y^+$  och är en dimensionslös enhet. Gränsskiktet är intressant att observera eftersom det kan ge en bild av vart turbulenta flöden skapas. Avståndet beräknas enligt ekvation (2.3)

$$y^+ = \frac{y u^*}{\nu} \quad (2.3)$$

där  $y$  är avståndet från ytan,  $u^*$  är en dimensionslös hastighet och  $\nu$  är den kinematiska viskositeten.

Utifrån  $y^+$  kan den dimensionslösa hastigheten  $u^+$  tas fram. Beroende på vilket avstånd från ytan som  $u^+$  beräknas används olika ekvationer. Då  $y^+ < 5$  används ekvationen (2.4). Detta område kallas för det linjära lagret och här ökar  $u^+$  linjärt med  $y^+$ .

$$u^+ = \frac{u}{u^*} = \frac{y u^*}{\nu} = y^+ \quad (2.4)$$

När  $y^+ > 30$  används ekvation (2.5) då detta är det logaritmiska lagret.

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y u^*}{\nu} + B = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B \quad (2.5)$$

För att beräkna  $u^+$ , används  $\kappa = 0,41$  och  $B = 5,0$ . Området  $5 < y^+ < 30$  kallas för buffertlagret [8].

### 2.2.3 Luftmotstånd och lyftkraft

Luftmotstånd är en viktig del att ta hänsyn till när aerodynamisk prestanda ska undersökas hos en bil. Ju snabbare ett fordon rör sig desto högre luftmotstånd råder och därav är det viktigt att designa strömlinjeformade bilar för att minimera motståndet.

Stor positiv lyftkoefficient på bilar är ofta oönskad eftersom lyftkraften ökar kvadratisk med hastigheten. Stora kraftförändringar kan leda till att bilen blir instabil och svårkörd. Då lyftkraften blir stor minskar normalkraften mot marken och bilens grepp försämras.

Både lyftkraften,  $F_L$ , och luftmotståndet,  $F_D$ , kan uttryckas med ekvation (2.6)

$$F_i = \frac{1}{2} C_i \rho A v^2 \quad (2.6)$$

där  $\rho$  är fluidens densitet,  $A$  är tvärsnittsarean,  $v$  är relativa hastigheten och  $C_i$  kan vara lyftkrafts- eller luftmotståndskoefficienten [8].

## 2.3 Finita volymmetoden

För att kunna lösa partiella differentialekvationer som används för att beräkna flödet måste en diskret metod användas. En av dessa metoder är finita volymmetoden (FVM). Metoden fungerar så att den först diskretiserar området som ska beräknas i mindre områden kallade volymceller och tillsammans bildar dessa en så kallad volym-mesh. Mitt i cellen finns en centroid med variabelvärden som fastställs och för att beräkna förändringen och värdena mellan centroiderna används interpolation. För att få fram dessa variabelvärden i cellens mitt integreras differentialekvationerna över varje cell och omvandlas till ett system av algebraiska ekvationer som sedan kan beräknas [9].

Finita volymmetoden är fullständigt konservativ eftersom den använder samma värden av en cells sidoyta till sidoytan på den angränsande cellen, vilket då gör att den bevarar flödet [9]. Metoden är också anpassad för många olika sorters geometrier och kan även användas på olika sorters mesh. Det är också en metod med en stadig grund vilket gör att den klarar mer komplexa ekvationer och även olinjära system [10].

### 2.3.1 Celltyp och mesh

Det finns olika typer av celler som kan användas, för celler i 3D används oftast prismor, tetraedrar, hexaedrar och polyedrar. Meshen brukar delas in i två typer, strukturerad och ostrukturerad, där den förstnämnde har en fördel när det gäller kodning och prestanda men ofta brister i flexibilitet gällande geometrin. Ostrukturerad mesh ökar komplexiteten, men är bättre när det gäller flexibiliteten på grund av anpassningsbarhet gällande placering av cellerna samt att valet av celltyper ökar. Ostrukturerad mesh ger även bättre möjligheter till lokala förfiningar [9].

## 2.4 k - $\omega$ SST modellen

k -  $\omega$  Shear stress transport (SST) är en modell som använder två turbulenta viskösa ekvationer. Turbulens viskositet innebär att det är en koefficient som relaterar medelskjuvspänningen av en fluid i ett turbulent flöde till den vertikala hastighetsgradienten. Turbulens viskositet beror på fluidens densitet och avståndet till ytan [11].

Modellen använder både k -  $\omega$  och k -  $\epsilon$  metoden. Variabeln k står i de två modellerna för den turbulenta kinetiska energin. Medan variablerna  $\omega$  och  $\epsilon$  är skalan på turbulensen. Skillnaden på  $\omega$  och  $\epsilon$  är att  $\omega$  är den specifika turbulenta dissipationssgraden, alltså i vilken grad som turbulent kinetisk energi övergår till termisk inre energi per volym och tidsenhet, medan  $\epsilon$  endast är den turbulenta dissipationen [12].

Modellen använder den vanliga k -  $\omega$  i det inre gränsskiktet, vilket gör att den går att använda vid lätt turbulenta fall av Reynolds-tal, hela vägen till ytan genom det viskösa gränsskiktet utan några extra dämpningsfunktioner. Den byter sedan till k -  $\epsilon$  i den fria strömmen, vilket gör att den undviker problemen som uppstår med den vanliga k -  $\omega$  modellen som är väldigt känslig i detta område. Många användare trycker ofta på att den behandlar ogynnsamma tryckgradienter samt separationsflöden väldigt noggrant [13], [14].

# 3

## Metod

Metodkapitlet beskriver hur arbetet har genomförts och varför metoderna som presenteras har valts till detta projekt. En vägledande beskrivning av den historiska studien samt den tekniska metodiken ska ge en utomstående förståelse kring de metoder och val som har gjorts vid projektets utförande. Resultatet från CFD-simuleringarna ska kunna återskapas av läsaren med hjälp av metoden.

### 3.1 Historisk studie

Studien av den historiska bakgrunden innefattade en informationssökning, där relevant material togs fram. Litteraturen hämtades till stor del från internet i form av populärvetenskapliga artiklar samt böcker. Med anledning av att det endast skrivits ett fåtal böcker som beskriver bilen Type 64 var internetlitteraturen angående ämnet överrepresenterat. Det lades därför ett stort fokus på att jämföra de olika källornas fakta för att på så sätt utvärdera källornas trovärdighet.

Lennart Löfdahl var till stöd under framtagningen av den historiska bakgrunden i form av vägledning gällande efterforskningen. Studien till den historiska bakgrunden berörde även en efterforskning kring underredet på bilen, där syftet var att integrera det med CAD-modellen, vilket skulle göra simuleringarna mer exakta. Denna studie gav däremot inga resultat.

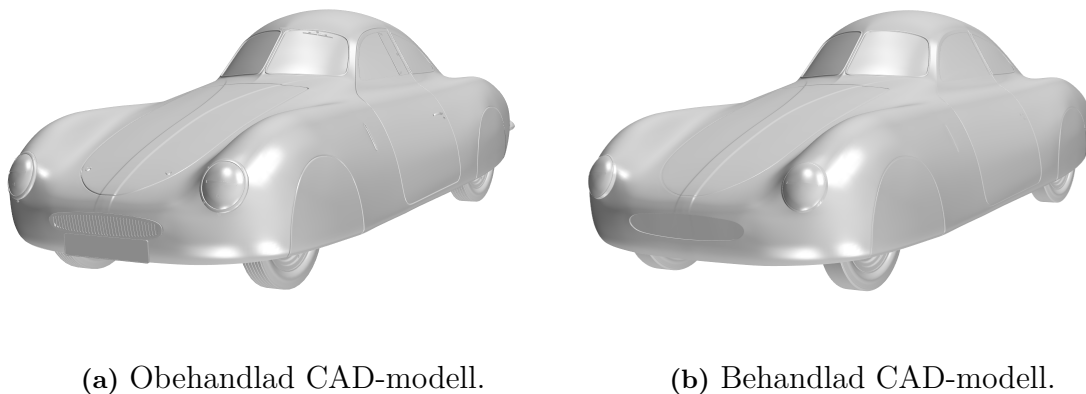
### 3.2 Teknisk metodik

Följande metoder användes för att sätta upp simuleringarna, ta fram resultatet samt studera dess korrekthet. I teknisk metodik ingår CAD-modell, simulering, studier om simuleringens konvergens och mesh. I sektion 3.2.1 ingår endast förberedande arbete av CAD-modell. Sektion 3.2.2 behandlar förberedande arbete, beräkning och framtagning av resultat.

#### 3.2.1 CAD-modell

Eftersom CFD-simuleringarna krävde en CAD-modell av bilen hämtades den från hemsidan hum3d.com [15], se figur 3.1a. Denna CAD-modell innefattade däremot ett platt underrede och byttes ej ut då det riktiga inte kunde hittas. För att CAD-modellen även skulle kunna simuleras på ett tidseffektivt sätt modifierades den i programmet ANSA. Där togs dörrhandtag, grill, registreringsskylt, däckmönster,

interiör (stolar, ratt), samt lister kring baklampor och sidorutor bort. Sidorutorna ersattes med en hel ruta som lades över de gamla rutorna, för att ta bort kanten som fanns mellan dem. Dessutom täcktes diverse springor och mellanrum i karossen igen, se figur 3.1b. Alla dessa modifikationer av CAD-modellen gjorde att beräkningstiden reducerades markant på grund av att antalet komplexa geometrier minskades, med minimal påverkan av resultatets säkerhet som följd.



**Figur 3.1:** CAD-modeller före och efter behandling i ANSA.

### 3.2.2 Simulering

Med en modifierad CAD-modell kunde geometrin importeras till programmet som simuleringarna sedan utfördes i. I projektet användes programvaran STAR-CCM+ (Siemens PLM Software, Simcenter STAR-CCM+) som frekvent brukas kommersiellt. För att bekanta sig med mjukvaran utfördes introduktionsövningar som Siemens själva tillhandahåller och därefter påbörjades arbetet med simuleringarna av bilen. Delar av projektet som behandlades direkt i programvaran STAR-CCM+ återfinns i tabell 3.1.

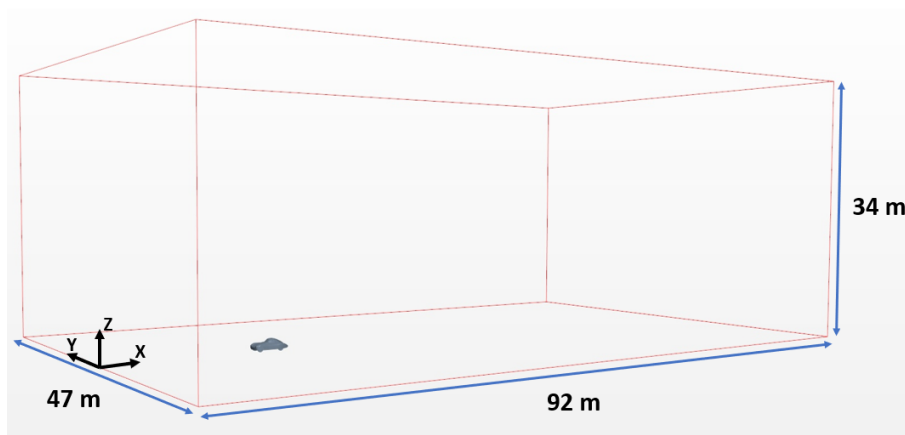
**Tabell 3.1:** Överblick av de ingående delarna i STAR-CCM+.

Surfacewrap
Meshing och förfiningsvolym
Randvillkor och lösning
Yaw-vinklar
Efterbehandling

#### Surfacewrap och lösningsvolym

En stor volym utformades för att fungera som vindtunnel med dimensionerna 92x47x34 m. Volymens dimensioner gjordes mycket större än bilens för att säkerställa att flödet runt bilens kropp inte påverkar flödet vid volymens väggar, se figur 3.2. Den del av volymen där flödet inte påverkas av bilen kallas för friström. Bilen placerades mitt i volymen i y-led, i x-led 14 m från volymens front och i z-led så att 0,02 m

av däckerna hamnade under volymens golv, för att efterlikna hur däckerna hade tryckts ihop i verkligheten.



**Figur 3.2:** Dimensioner för volymen av vindtunnel.

Modellen omslöts med STAR-CCM+ egna inbyggda Surfacewrap-funktion. En Surfacewrap fungerar som en tunn hinna som läggs över hela modellens geometri vilket skapar en helt tät modell. Surfacewrappen utfördes enligt inställningarna som redovisas i tabell 3.2. Alla storheter med inställningen Relative to base beror av Base Size vilket sattes till 0,01 m. Ett antal Surface Control-inställningar sattes upp för att öka kvalitén på omslutningen av några ytor av bilen. Surface Control ändrar inställningarna på Surfacewrappen i ett visst område. Vilka delar av bilen som fick en Surface Control och respektive inställningar för dessa kan ses i tabell 3.3.

**Tabell 3.2:** Inställningar för Surfacewrap i STAR-CCM+. Inställning och värde anges för respektive storhet.

Storhet	Inställning	Värde
Base Size	-	0,01 [m]
Target Surface Size	Relative to base	100 [%]
Minimum Surface Size	Relative to base	10 [%]
Curvature	# Pts/circle	50 [-]

En subtract skapades mellan bilens geometri och volymens ränder. Resultatet av subtracten blev en solid volym mellan bilen och volymens ytterväggar, där ett flöde kunde simuleras. Alla delar av geometrin som inte var inom lösningsvolymen togs bort av subtracten och kom inte med i simuleringen. Tidigare nämndes det att bilen placerades i rymden så att 0,02 m av däckerna hamnade under vägen, vilket gjorde att den delen av däckerna togs bort från simuleringen.

## Mesh

En yt-mesh skapades över geometrin vilket innebar att ytan delades upp i en ostrukturerad mesh av triangulära celler. Yt-meshen är en representation av modellens

**Tabell 3.3:** Inställningar för Surface Control i STAR-CCM+ för att förbättra Surfacewrappen. För respektive storhet anges inställning och värde.

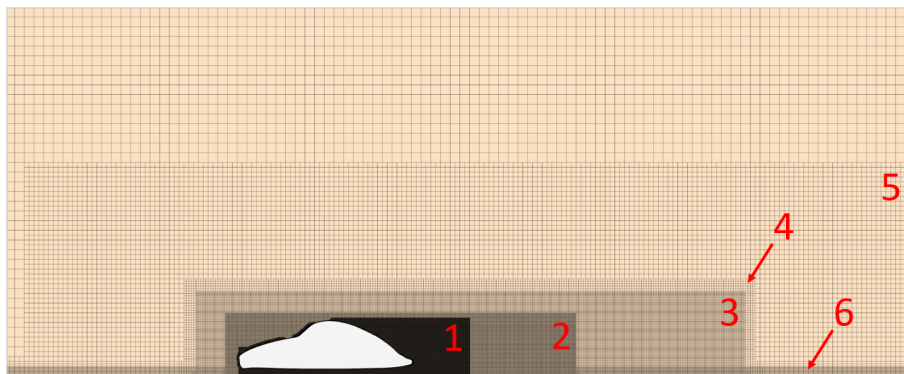
Bil del	Storhet	Inställning	Värde
Hjul	Target Surface Size	Relative to base	50 [%]
	Minimum Surface Size	Relative to base	3 [%]
Hjulsidor	Target Surface Size	Relative to base	20 [%]
	Minimum Surface Size	Relative to base	5 [%]
	Surface Curvature	# Pts/circle	200 [-]
Framlyktor	Target Surface Size	Relative to base	50 [%]
	Minimum Surface Size	Relative to base	20 [%]
Baklyktor	Target Surface Size	Relative to base	50 [%]
	Minimum Surface Size	Relative to base	5 [%]
Rutramar	Target Surface Size	Relative to base	50 [%]
	Minimum Surface Size	Relative to base	1 [%]

olika ytor och det är viktigt att den är av bra kvalitet då den används som grund för volym-meshen. En volym-mesh genererades bestående av hexaedrar, vilka kallas för Trimmed cells i STAR-CCM+. Trimmed cells bildar en så kallad ostrukturerad mesh, vilket har den viktiga egenskapen, att den snabbt kan öka i storlek där det behövs i meshen. Det är en stor fördel när avancerade flöden och geometrier kräver att cellerna varierar mycket i storlek mellan olika delar av meshen. För att säkerställa att gränsskiktet beräknades med stor noggrannhet, och därmed förbättra simuleringens exakthet, alstrades tio lager med celler i form av prismor i volym-meshen närmast yt-meshen. Prismlager har förmågan att kunna följa ytor med radier och är små nära ytan för att sedan växa gradvis. Meshen utfördes enligt inställningarna som redovisas i tabell 3.4.

**Tabell 3.4:** Inställningar för mesh i STAR-CCM+. Inställning och värde anges för respektive storhet.

Storhet	Inställning	Värde
Base Size	-	0,0144 [m]
Target Surface Size	Relative to base	100 [%]
Minimum Surface Size	Relative to base	15 [%]
Surface Curvature	# Pts/circle	200 [-]
Surface Growth Rate	-	1,3 [-]
Number of Prism Layers	-	10 [-]
Prism Layer Near Wall Thickness	-	0,01 · 10 <sup>-3</sup> [m]
Prism Layer Total Thickness	Absolute	0,01 [m]

För att mer exakt beräkna vaken runt bilen skapades sex olika förfiningsvolym (FV) vilket kan ses i figur 3.3. Varje förfiningsvolym fick olika storlekar på sina volymer och celler för att övergången mellan de olika cellstorlekarna skulle bli jämn, med de minsta cellerna placerade i vaken nära bilen. Med hjälp av förfiningsvolymerna reducerades även antalet celler i simuleringen. Eftersom de minsta cellerna koncentreras till de mest intressanta områdena, samt att små celler i friströmmen inte hade lett till ett säkrare resultat. Utan bara till att mer datorkraft behövts för uträkning av simuleringarna.



**Figur 3.3:** Volym-mesh med gradvis minskande förfiningsvolym numrerade från 1 till 6.

Inställningar för förfiningsvolymernas dimensioner och cellstorlek i förhållande till volym-meshens Base Size redovisas i tabell 3.5. Förfiningsvolym 1 består av två olika volymer med samma inställning och värde, vilket också redovisas i tabellen. Förfiningsvolym 6 förfinar cellerna nära vägen, där gränsskiktet bildas i z-riktning och friströmmen är opåverkad i x-riktning. Detta gör att förfiningen av cellerna enbart behöver ske i z-riktning.

**Tabell 3.5:** Inställningar och värden för förfiningsvolym samt deras dimensioner anges för respektive förfiningsvolym.

FV	Längd [m]	Bredd [m]	Höjd [m]	Inställning	Värde
1	3,3	1,8	1,4	Relative to base	70 [%]
	4,1	1,8	0,7		
2	7,7	2,0	1,5	Relative to base	100 [%]
3	13,0	3,0	2,0	Relative to base	300 [%]
4	35,0	10,0	5,0	Relative to base	1000 [%]
5	55,0	24,0	10,0	Relative to base	2000 [%]
6	80,0	50,0	0,2	Trimmer Anisotropic Size - Absolute Z Size	0,02 [m]

En Surface Control lades också in på lösingsvolymens väggar med inställningarna Target Surface Size, Relative to base 3500 % för att garantera att friströmmen bestod av stora celler. Tre andra Surface Control skapades för att förbättra yt-meshen över delar av bilen. Inställningarna för Surface Control samt vilka delar av bilen de gäller

för redogörs i tabell 3.6. Surface Control modifierar inställningarna för yt-meshen över en angiven yta. Det totala antalet celler i simuleringen blev cirka 65 miljoner.

**Tabell 3.6:** Inställningar för Surface Control i STAR-CCM+ för att förbättra yt-mesh. Inställning och värde anges för respektive storhet.

Bil del	Storhet	Inställning	Värde [%]
Framlyktor	Target Surface Size	Relative to base	50
	Minimum Surface Size	Relative to base	20
Baklyktor	Target Surface Size	Relative to base	50
	Minimum Surface Size	Relative to base	5
Rutramar	Target Surface Size	Relative to base	20
	Minimum Surface Size	Relative to base	5

### Randvillkor och lösning

När en fullständig volym-mesh är genererad, behöver flödet beräknas för hela volymen. Programmet STAR-CCM+ som används för att simulera flödet, använder finita volymmetoden för att beräkna Navier-Stokes ekvationer. För att beräkna flödet som representeras av Navier-Stokes ekvationer används olika fysikaliska egenskaper och randvillkor. Det är för att kunna ge simuleringen de förutsättningar som krävs för att ge en trovärdig bild av verkligheten. I tabell 3.7 framgår de fysikaliska egenskaper och lösningsmodeller som använts för samtliga simuleringar.

**Tabell 3.7:** Fysikalisk modell som valdes i STAR-CCM+.

k - $\omega$ SST
All $y^+$ wall treatment
Reynolds-Averaged Navier-Stokes
Steady
Turbulent
Gas
Three dimensional
Coupled flow
Constant density
Solution interpolation

För att ge FVM-lösaren startvärden måste initialtillstånd på samtliga ytor anges. Ytorna som representerade ytterkanten av volymen delades in i olika regioner: inlopp, utlopp, väg samt övriga väggar. Detta gjordes för att samtliga regioner gavs olika randvillkor som hade olika fysikaliska betydelser. Bilens ytor delades upp i två regioner, bil samt hjul, där hjul innehöll de ytor som bestod av samtliga hjul på bilen. Hjulens ytor gavs en vinkelhastighet och separerades därmed ifrån övriga ytor på bilen. Vinkelhastigheten,  $\omega$ , beräknades utifrån bilens hastighet med formeln  $\omega = V/r$  där  $r$  är radien på hjulet och  $V$  är bilens hastighet. I tabell 3.8 anges de randvillkor som valdes för samtliga regioner i STAR-CCM+.

**Tabell 3.8:** Randvillkor för samtliga regioner i simuleringen.

Region	Randvillkor
Inlopp	Velocity-wall Turbulent intency = 0.1 Turbulent viscosity ratio = 10
Utlopp	Pressure-outlet Reference pressure = 0
Väg	Wall with velocity Hastighet i x-riktning
Hjul	Wall with angular velocity Rotationshastighet runt hjulcentrum
Bil	Wall
Övriga väggar	Symmetry wall

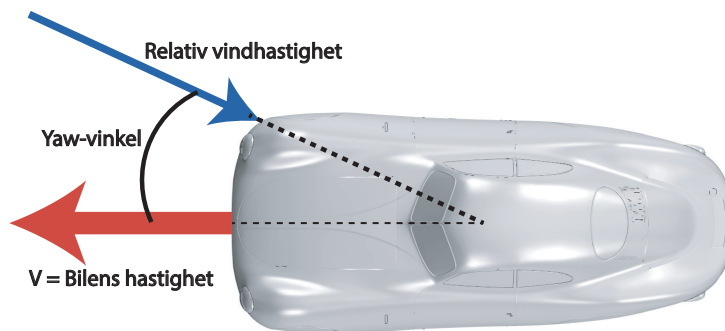
För att kunna genomföra simuleringarna gavs även vägen och luftflödet vid inloppet en hastighet, eftersom bilens geometri är fixerad i rymden. Genom att enbart ändra hastigheten i randvillkoren på ytorna, förändrades bilens hastighet i simuleringen. Undersökningar av olika hastigheter med och utan hjulkåpor utfördes med värden enligt tabell 3.9, vilket gav totalt sex olika körda simuleringar.

**Tabell 3.9:** Hastigheter i km/h och m/s för alla simuleringar.

Hastigheter	
80 km/h	22,22 m/s
120 km/h	33,33 m/s
170 km/h	47,22 m/s

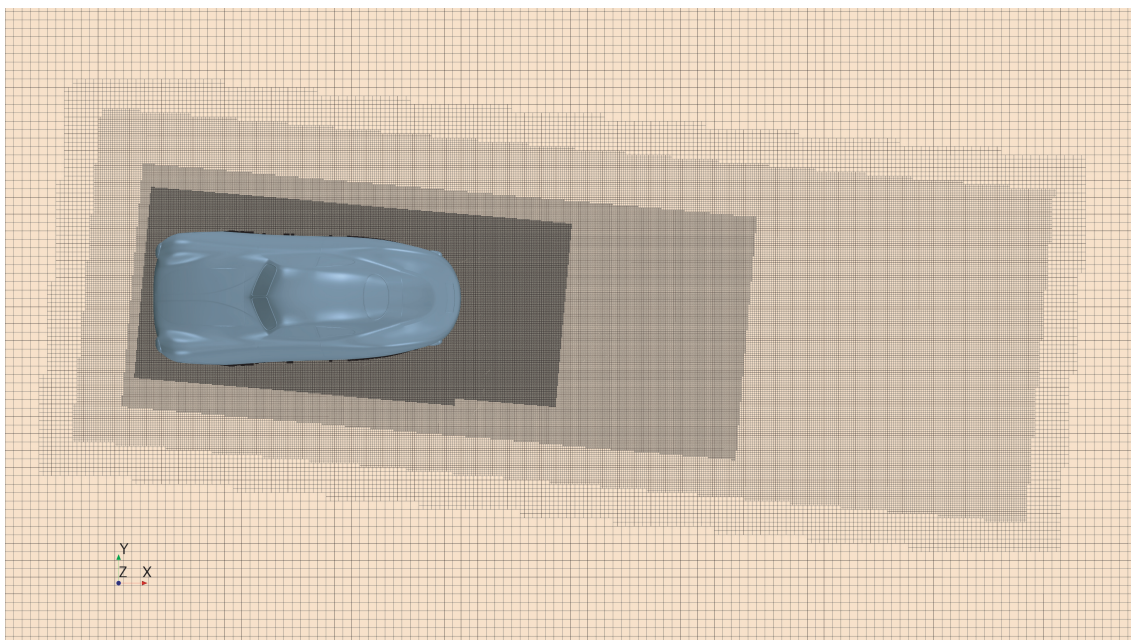
### Yaw-vinklar

I ett realistiskt fall kommer sällan vindhastigheten rakt framifrån. Vid blåst utomhus kan den relativa vindhastigheten träffa bilen snett framifrån. Detta kan bidra till att flödet kring bilen förändras och då även bilens aerodynamiska egenskaper. Därför är det viktigt att ur ett aerodynamiskt perspektiv även undersöka de fall där vindhastigheten träffar bilen med en vinkel snett framifrån. Vinkeln som bildas mellan den relativa vindhastigheten och bilens hastighet benämns yaw-vinkel, se figur 3.4.



**Figur 3.4:** Illustration av yaw-vinkel.

För att simulera bilens aerodynamiska prestanda vid en varierande yaw-vinkel, behövde vissa förändringar i meshen och randvillkoren göras. Förfiningsvolymerna i meshen förstörades upp och roterades fem grader, för att mer detaljerat kunna beräkna flödet i den snedvridna vaken som bildas på sidan av och bakom bilen, se figur 3.5. Regionen för inloppet sammansattes med en symmetrivägg, detta för att ansätta en snedvriden inloppshastighet på vinden. Utloppet sattes samman med den motstående symmetriväggen och bildade tillsammans ett nytt utlopp med samma randvillkor som tidigare.



**Figur 3.5:** Vinklad mesh runt bilen vid simulering av yaw-vinklar.

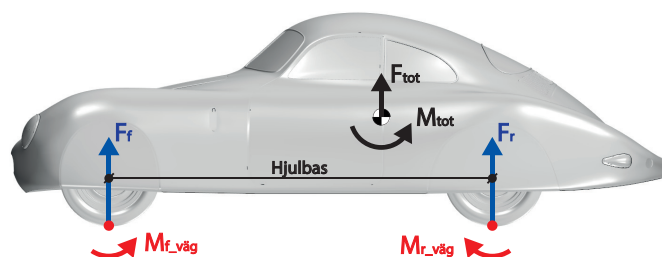
Samma mesh användes för samtliga yaw-vinklar, för att minimera risken av variation i cellkvalitet och upplösning av volymen. Simuleringarna genomfördes med varierande hastigheter och yaw-vinklar, se tabell 3.10, vilket gav totalt nio olika simuleringar. I samtliga simuleringar hade bilen kåpor på.

**Tabell 3.10:** Hastigheter vid olika yaw-vinklar som simulerades.

Yaw-vinkel	Hastigheter		
3°	80 km/h (22,22 m/s)	120 km/h (33,33 m/s)	170 km/h (47,22 m/s)
5°			
8°			

### Efterbehandling

När simuleringarna var beräknade var information om aerodynamiken tvungen att tas fram. Viktiga och vanligt förekommande delar är att beräkna bilens luftmotståndskoefficient,  $C_D$  och lyftkraftskoefficient,  $C_L$ . Koefficienterna beräknades direkt av STAR-CCM+ och visualiserades med grafiska plottar som visade förändringen av koefficienterna över iterationerna i lösningen, vilket gav ett slutvärde då lösningen hade konvergerat. Lyftkrafterna på fram och bakaxel var av stort intresse men gavs inte direkt i STAR-CCM+. Momentet runt lokala koordinatsystem kunde däremot beräknas och två lokala koordinatsystem placerades ut i mitten av axlarna, men inte i centrum av hjulen utan vid marknivå, där momentet är som störst, se figur 3.6. Momenten gavs sedan direkt av programmet.

**Figur 3.6:** Illustration av momentpunkter och krafter vid hjulaxlarna.

Från momenten kunde lyftkraften på motstående axel beräknas,  $F_f$  och  $F_b$ , då längden på hjulbasen är känd. Lyftkrafterna på vardera hjulaxel, beräknades såldes med  $Hjulbasen = 2,4$  [m] och ekvationerna (3.1) och (3.2).

$$F_f = \frac{M_{b\_våg}}{Hjulbas} \quad (3.1) \quad F_b = \frac{M_{f\_våg}}{Hjulbas} \quad (3.2)$$

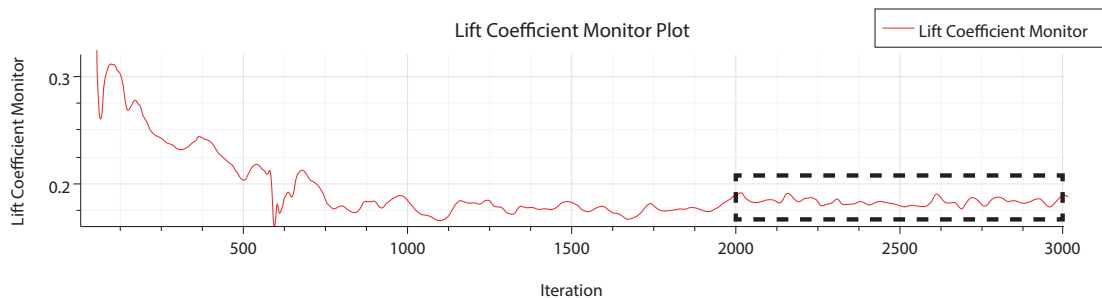
Lyftkraftskoefficienterna fram och bak,  $C_{LF}$  och  $C_{LB}$ , beräknades sedan med hjälp av lyftkrafterna enligt ekvationerna (3.3) och (3.4), där  $V$  är vindhastigheten,  $\rho$  är luftens densitet och  $A$  är bilens frontalarea. Frontalarean fås direkt i STAR-CCM+ där  $A = 1.5713$  [m<sup>2</sup>].

$$C_{LF} = \frac{2F_f}{V^2 A \rho} \quad (3.3) \quad C_{LB} = \frac{2F_b}{V^2 A \rho} \quad (3.4)$$

Lösningarna genererade stora mängder data där det var viktigt att plocka fram och tydliggöra den information som var relevant. Genom att använda en stor variation av scener som visualiserade flödet kring bilen, kunde intressanta datapunkter tas fram och analyseras mer noggrant. Scentyper som bland annat användes var: vektoriserade hastighetsscener i olika snitt i lösningsvolymen, scener som visar tryckfördelningen på och runt om bilen samt iso-tytor som vid dynamiskt tryck (Total Pressure) noll, ger en tydlig bild av separationen.

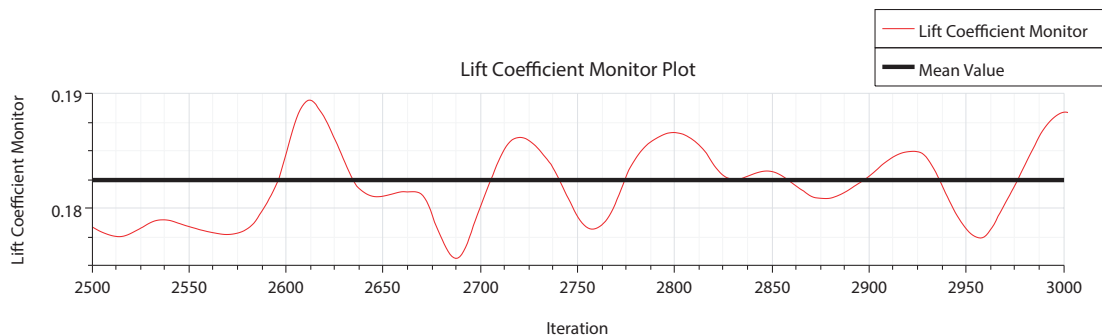
### 3.2.3 Konvergenstudie

Genom att studera utvecklingen i en simulering kan slutsatsen dras om den konvergerar eller ej. I figur 3.7 syns utvecklingen av  $C_L$  under simuleringen vid hastigheten 170 km/h och yaw-vinkel noll. Att simuleringen som valdes för studien innefattar den högsta hastigheten och  $C_L$ , berodde på att vid högre hastigheter påvisas ofta större avvikelser, samma gäller för  $C_L$ . Förändringen i början var stor och den föll kraftigt, medan mot slutet tenderade värdena att oscillera kring en viss nivå, se markeringen i figur 3.7.



**Figur 3.7:**  $C_L$  för simuleringen vid hastighet 170 km/h och yaw-vinkel 0 grader.

Genom att förstora upp och titta närmare på iterationerna i slutet av simuleringen blev oscillationen ännu tydligare, se figur 3.8. För att minimera risken för avvikelser i  $C_L$ , togs medelvärdet av de 500 sista iterationerna, se figur 3.8. Att medelvärdera bidrar till mindre osäkerhet och förmodligen till ett mer korrekt resultat.



**Figur 3.8:**  $C_L$  för de 500 sista iterationerna i simuleringen.

Beteendet som  $C_L$  uppvisar återfanns i samtliga variabler i alla simuleringar som genomfördes. Oscillationen kan bero på många faktorer som berör inställningar och typ av lösningsmodell för simuleringen och geometrisk instabilitet. Samtliga värden som togs från simuleringarna medelvärderades över de 500 senaste iterationerna, för att få så pålitliga och korrekta värden som möjligt.

### 3.2.4 Mesh-studie

En mesh-studie genomfördes för att säkerställa att resultatet inte var mesh-beroende. Det betyder att de värden som plockas ut ur simuleringarna endast får variera inom ett visst intervall när meshen görs finare. För originalsimuleringen var cellernas Base Size inställd på 0,0144 m och fyra simuleringar skapades med en förändrad Base Size enligt tabell 3.11. I tabellen syns även antalet celler för varje simulering. Simulering 1 och 2 hade grövre mesh än originalsimuleringen medan simulering 3 och 4 hade en finare mesh.

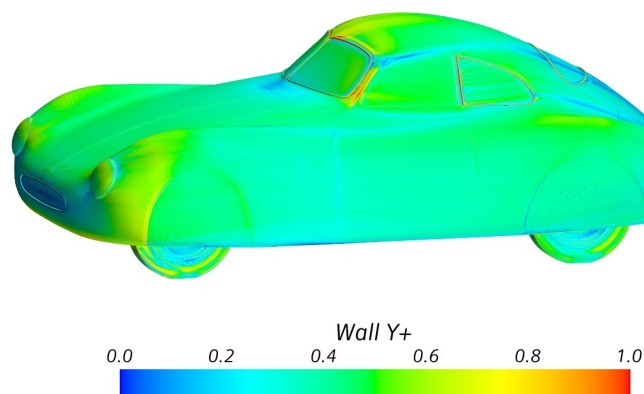
**Tabell 3.11:** Storlek, cellantal och resultat för samtliga simuleringar i mesh-studien.

Simulering	Base Size [m]	Antal celler [M]	$C_D$	$C_L$	$C_{LF}$	$C_{LB}$
Original	0,0144	64,8	0,212	0,177	-0,090	0,267
1	$0,0144 \cdot 2$	19,4	0,217	0,225	-0,058	0,283
2	$0,0144 \cdot \sqrt{2}$	34,1	0,233	0,240	-0,012	0,252
3	$0,0144 \div \sqrt{2}$	137,5	0,220	0,223	-0,045	0,268
4	$0,0144 \div 2$	325,4	0,225	0,210	-0,048	0,257

Resultatet av mesh-studien redovisas också i tabell 3.11, där syns det att de fyra värdena som plockades ut ur simuleringarna 3 och 4 inte skiljer sig nämnvärt från värdena vid originalsimuleringen. Däremot har simuleringarna 1 och 2 några värden som sticker ut, dessa var  $C_{LB}$  från simulering 1 och  $C_{LF}$  från simulering 2, vilket tyder på att meshen för de simuleringarna var för grov. Då kan slutsatsen dras att meshen i originalsimuleringen var tillräckligt fin för att få ett resultat med hög noggrannhet och att datorkraften använts effektivt.

#### Kontroll av $y^+$

För att säkerställa noggrannheten i beräkningen av gränsskiktet, undersöks det första prismlagrets placering. Det första prismlagret ska ligga långt ner i den linjära delen av gränsskiktet, under  $y^+ = 1$  för att kunna beräkna ett så trovärdigt gränsskikt som möjligt. Det första prismlagret kontrollerades genom att titta på  $y^+$  på bilens yta efter körd simulering, se figur 3.9.



**Figur 3.9:** Visualisering av  $y^+$  över bilens yta.

# 4

## Resultat

Här presenteras resultaten från genomförda simuleringarna i STAR-CCM+ i form av grafer och tabeller som sedan kommer att analyseras och diskuteras i nästkommande kapitel. Simuleringarna är körda i olika hastigheter, med och utan hjulkåpor samt med olika yaw-vinklar för att skapa ett så verklighetstroget scenario som möjligt.

### 4.1 Yaw-vinkel noll och varierande hastigheter

Vid simuleringarna där bilen anströmmas rakt framifrån, det vill säga med yaw-vinkel noll, användes hastigheterna 80, 120 och 170 km/h, både med och utan hjulkåpor för att se om det skulle uppstå skillnader i form av luftmotstånd och lyftkraft.

#### 4.1.1 Med kåpor

I tabell 4.1 är data samlad från simuleringarna av bilen med hjulkåpor, i varierande hastighet.  $C_D$  och  $C_L$  är de totala koefficienterna som verkar på bilen, medan  $C_{LF}$  och  $C_{LB}$  endast avser koefficienten på fram- och bakaxeln. Dessa är samma värden som visas i figur 4.1 och 4.2.  $F_{NF}$  och  $F_{NB}$  är normalkraftsfördelningen på bilens axlar. Viktfördelningen av bilen är 40% fram och 60% bak vilket går att se i tabell 1.1 från den historiska efterforskningen.

**Tabell 4.1:** Värden för luftmotståndskoefficient, lyftkraftskoefficient och normalkraftsfördelning för yaw-vinkel 0 med olika hastigheter. Värden avser bil med kåpor.

Hast. [ $\frac{km}{h}$ ]	$C_D$	$C_L$	$C_{LF}$	$C_{LB}$	$F_{NF}$ [%]	$F_{NB}$ [%]
80	0,220	0,191	-0,075	0,266	41,3	58,7
120	0,215	0,180	-0,087	0,267	43,2	56,8
170	0,212	0,177	-0,090	0,267	46,7	53,3

Resultatet visar på att högre hastighet förskjuter kraftfördelningen till den främre delen av bilen. Detta kan ses då  $F_{NF}$  ökar och  $F_{NB}$  minskar.  $C_L$  är negativ vid alla hastigheter på framaxeln, som också blir större ju snabbare bilen kör. På bakaxeln är lyftkraften positiv men håller en konstant kraft vid alla hastigheter.  $C_D$  håller sig relativt jämn genom alla simuleringar.

### 4.1.2 Utan kåpor

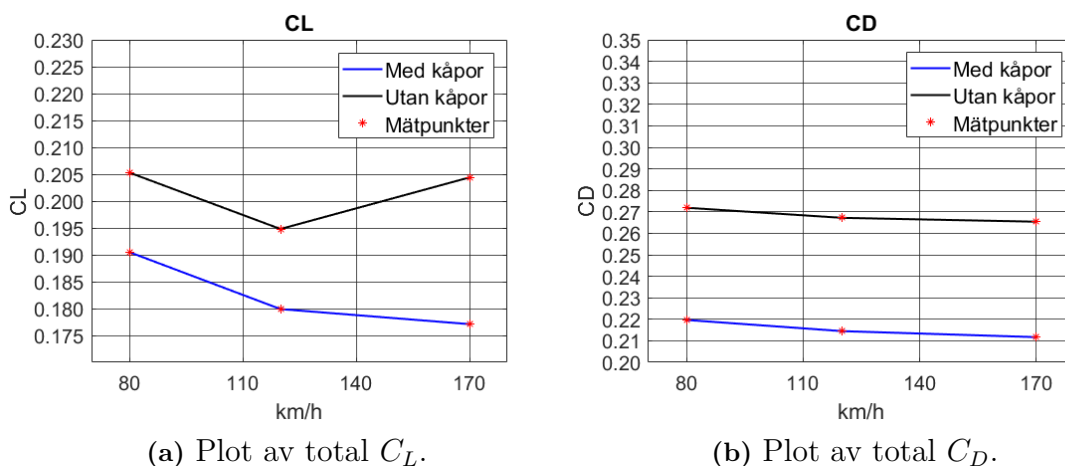
Resultatet från simuleringarna utan hjulkåpor kan ses i tabell 4.2 där beteckningarna är samma som i tabell 4.1. Kraftfördelningen över bilen och koefficienterna varierar på liknande sätt som vid simulering med kåpor, men det ska noteras att  $C_{LF}$  och  $C_{LB}$  visar lägre värden.

**Tabell 4.2:** Värden för luftmotståndskoefficient, lyftkraftskoefficient och normalkraftsfördelning för yaw-vinkel 0 med olika hastigheter. Värden avser bil utan kåpor.

Hast. [ $\frac{km}{h}$ ]	$C_D$	$C_L$	$C_{LF}$	$C_{LB}$	$F_{NF}$ [%]	$F_{NB}$ [%]
80	0,272	0,205	-0,029	0,235	41,0	59,0
120	0,267	0,195	-0,033	0,227	42,2	57,8
170	0,265	0,204	-0,041	0,246	45,2	54,8

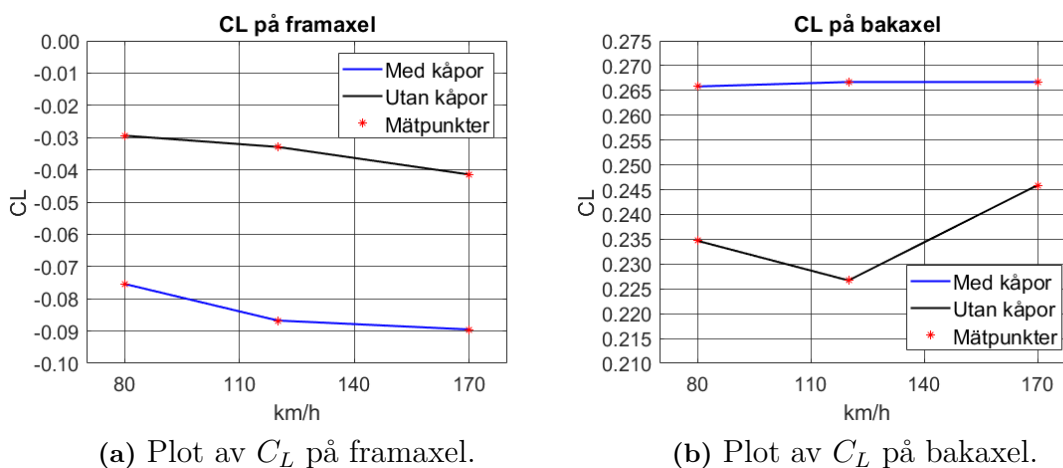
### 4.1.3 Grafisk visualisering

I figur 4.1 visas totala lyftkraftskoefficienten samt luftmotståndskoefficienten över hela bilen med och utan kåpor i olika hastigheter. Från figur 4.1a kan det avläsas att lyftkraftskoefficienten blir större utan än med kåpor på bilen. Notera att det lägsta värdet registreras vid hastigheten 120 km/h utan kåpor medan med kåpor är värdet lägst vid 170 km/h. Den totala luftmotståndskoefficienten går att avläsa i figur 4.1b där även  $C_D$  är högre utan jämfört med kåpor.  $C_D$  håller sig relativt konstant igenom samtliga hastigheter med och utan kåpor.



**Figur 4.1:** Plottar av totala  $C_L$  och  $C_D$  yaw-vinkeln 0 grader och varierande hastigheter.

I figur 4.2 ses fördelningen av lyftkraftskoefficienterna på fram- och bakaxel, med och utan kåpor, vid samtliga hastigheter. Notera olika skalor på y-axeln, vilket visar att kraften på bakaxeln är större än på framaxeln. Simuleringarna med kåpor effektuerar ett högre värde på bakaxeln och ett lägre värde på framaxeln, jämfört med simuleringarna utan kåpor.



**Figur 4.2:** Plottar av  $C_L$  fram och bak med yaw-vinkel 0 grader och varierande hastigheter.

## 4.2 Varierande yaw-vinklar och hastigheter

Vid simuleringarna som kördes med olika yaw-vinklar och olika hastigheter användes vinklarna tre, fem och åtta grader med hastigheter på 80, 120 och 170 km/h, för att kunna analysera differenser i lyftkraft och luftmotstånd i de olika fallen. Simuleringarna utfördes med kåpor monterade på bilen. Ur simuleringarna togs värden fram för den totala lyftkraftskoefficienten,  $C_L$  och även dess fördelning mellan fram- och bakaxel på bilen,  $C_{LF}$  och  $C_{LB}$ . Från simuleringarna togs även luftmotståndskoefficienten,  $C_D$  fram för de olika fallen.

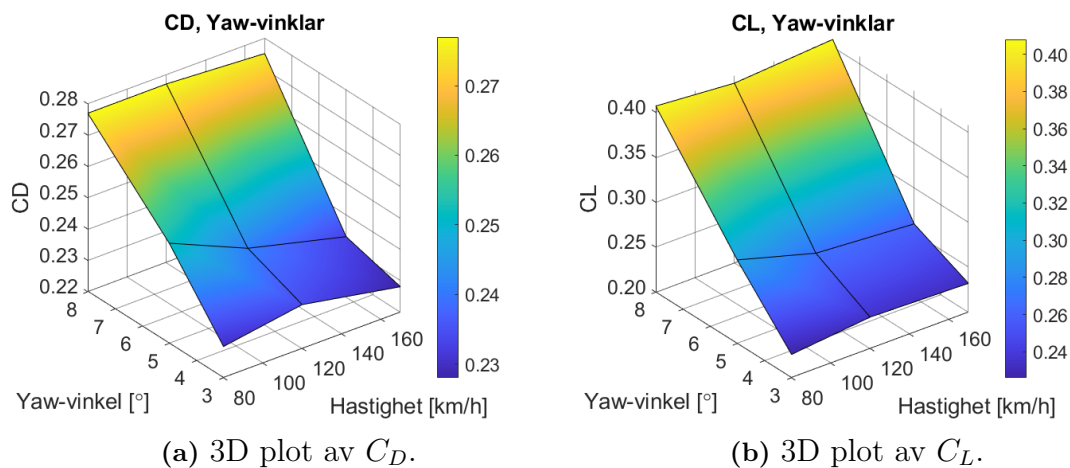
Resultaten från simuleringarna, se tabell 4.3, visar att  $C_D$  för tre och åtta grader är relativt konstanta, men vid fem grader skiljer de sig något. Detsamma gäller för  $C_L$ .  $C_{LF}$  går från att vara negativ vid tre grader, till positiv vid åtta grader. Detta leder till att lyftkraften ändras från negativ till positiv, vilket gör att kraften verkar som en lyftkraft. Resultaten för  $C_{LB}$  är positiva för alla vinklar och för åtta grader verkar de konstanta, dock skiljer sig resultaten något för tre och fem grader. Normalkraftsfördelningen visar ett upprepat beteende vid alla de tre vinklarna, från en fördelning på 40/60 % vid stillastående, till att vid 170 km/h landa på en fördelning runt 45/55 %. I tabellen visas även värdena för noll grader vid 170 km/h, detta för att se vad referensvärdena var utan påverkan av sned vind.

#### 4. Resultat

**Tabell 4.3:** Värderna för luftmotståndskoefficient, lyftkraftskoefficient och normalkraftsfördelning för olika yaw-vinklarna med olika hastigheter. Värderna avser bil med kåpor.

Yaw-v.	Hast. [ $\frac{km}{h}$ ]	$C_D$	$C_L$	$C_{LF}$	$C_{LB}$	$F_{NF}$ [%]	$F_{NB}$ [%]
0° (ref)	170	0,212	0,177	-0,090	0,267	46,7	53,3
3°	80	0,230	0,226	-0,061	0,287	41,3	58,7
3°	120	0,234	0,235	-0,026	0,261	42,4	57,6
3°	170	0,228	0,232	-0,027	0,259	45,1	54,9
5°	80	0,252	0,293	0,005	0,288	41,0	59,0
5°	120	0,241	0,268	-0,025	0,293	42,7	57,3
5°	170	0,233	0,260	-0,047	0,307	46,5	53,5
8°	80	0,277	0,407	0,073	0,334	40,8	59,2
8°	120	0,277	0,400	0,065	0,334	42,0	58,0
8°	170	0,275	0,408	0,075	0,333	44,1	55,9

Figurerna 4.3a och 4.3b förtydligar de resultat som gavs för luftmotståndskoefficienten och lyftkraftskoefficienten. I figurerna är  $C_D$  och  $C_L$  plottat mot yaw-vinklar och hastigheter. Vid en yaw-vinkel på fem grader syns det tydligare att både  $C_D$  och  $C_L$  skiljer sig något vid olika hastigheter och inte är lika konstanta som vid tre och åtta grader.



**Figur 4.3:** 3D plottar av  $C_D$  och  $C_L$  med varierande yaw-vinklar och hastigheter.

# 5

## Analys

I det här avsnittet behandlas luftmotstånd och lyftkrafter på bilen. Olika scenarier som varierande hastighet och anströmningsvinklar med och utan kåpor, jämförs. För att kunna göra en relevant jämförelse analyseras först ett basfall, det vill säga så som bilen var tänkt att köras, vilket är med kåpor på, där hastigheten är den varierande variabeln. Därför måste luftmotståndet och lyftkraften som uppstår först förklaras analytiskt.

### 5.1 Basfall med yaw-vinkel noll grader

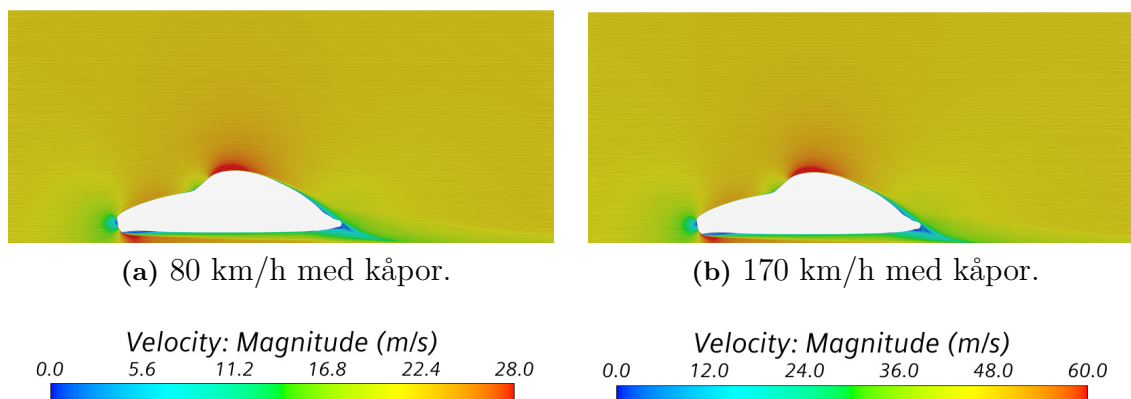
Storlek på luftmotstånd kan bero på ett flertal faktorer såsom formen på karossen, friktion som uppstår mellan ytan på bilen och luften, samt inducerad lyftkraft på grund av vingar [16]. Eftersom bilen inte har några vingar har inte den typen av luftmotstånd någon inverkan. Friktionen finns med i  $C_L$  och  $C_D$  för alla resultat, men kommer inte att undersökas då den är svår att mäta och har en liten inverkan på resultatet. Fokus kommer istället ligga på luftmotstånd som skapas av separation mellan luft och yta, vilket till stor del beror på bilens utformning. Luftmotstånd som uppstår på grund av separation skapas ofta på grund av tryckskillnader, där luften flödar från ett lågt tryck till ett högt [17].

När luften separerar från ytan minskar flödets tryck och hastighet, där konsekvensen blir en förlust av energi. Det bildas då en vak där luften rör sig långsammare, vilket skapar en tryckskillnad där det ofta blir ett lägre tryck baktill jämfört med fronten av bilen. Detta resulterar ofta i en dragkraft bakåt eller rättare sagt ett luftmotstånd [17].

Lyftkraftskoefficienten är ett mått på tryckskillnaden mellan ovan- och undersidan av bilen som skapas när den färdas genom luft. Lyftkraftens storlek beror på ett flertal faktorer som till exempel bilens markfrigång, form och hastighet [18].

Resultaten från tabell 4.1 visar att  $C_D$  minskar väldigt lite då hastigheten ökar. Detta kan bero på att strömningen blivit fullständigt utvecklade och inte längre beror på något Reynolds-tal, eftersom  $C_D$  varierar med den relativa hastigheten och med luftmotståndet som båda är variabler vars värden ändras, detta gäller även för  $C_L$ . Att den relativa hastigheten längs bilens kropp ökar beror på att det uppstår ett mer anlagt flöde kring bilen. Bilens strömlinjeformade kaross bidrar till detta genom att separationen sker längre bak gentemot en ”vanlig” personbil, det

vill säga, en bil som inte är lika strömlinjeformad [18]. En sen separation gör att det turbulenta området inte blir lika stort. Det är även detta område som är bilens vak. Den senare separationen bidrar till att  $C_D$  blir förhållandevis litet, eftersom  $C_D$  generellt växer med en större vak. Därmed eftersträvas en sen separation då det alltså bidrar till ett litet  $C_D$ . Det turbulenta området som uppstår kommer då inte påverka bilen lika mycket i form av luftens förlust av hastighet och energi.



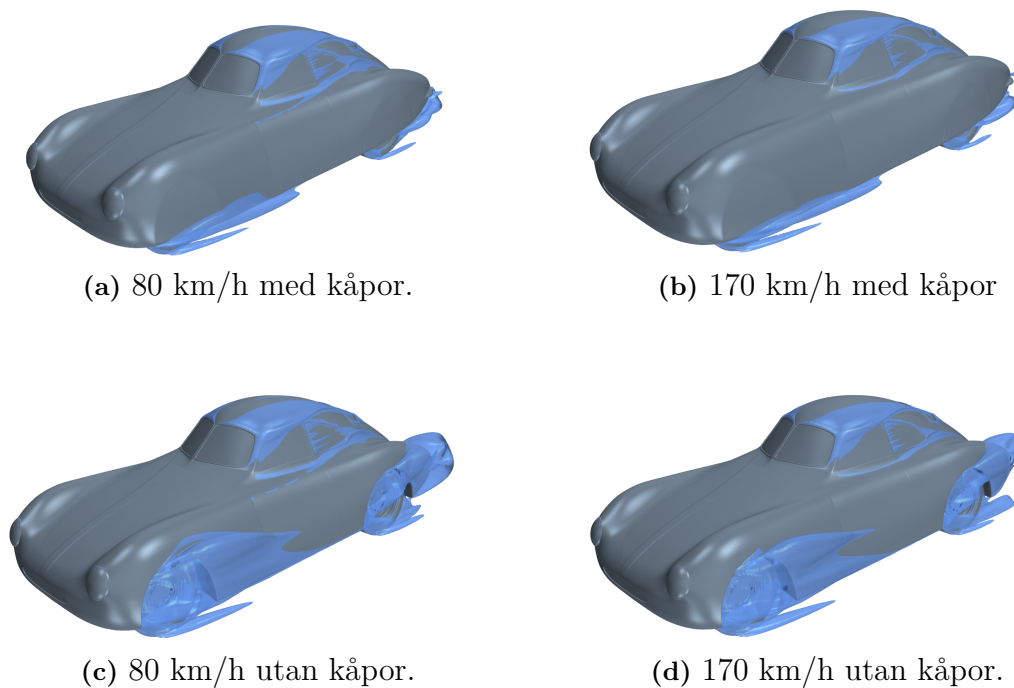
**Figur 5.1:** Hastighetsfördelning mitt i bilen vid 80 och 170 km/h med kåpor.

Området längst bak på bilen visar tydligt var separationen sker i figur 5.1. Den lägre hastigheten som uppstår på grund av turbulensen bidrar till ett ökat tryck, appendix A.1. Separationen kan även ses i mitten av bilen. De två figurerna visar tydligt att separationspunkten på bilen inte förändras nämnvärt, därför är det inte någon större förändring av  $C_D$  i tabell 4.1 mellan 80 och 170 km/h. Eftersom förhållandet mellan trycket på över- och undersidan inte varierar mellan olika hastigheter på bilens bakvagn så uppstår det inte någon tryckskillnad, därmed blir  $C_{LB}$  oförändrad. Tabellen visar även att beloppet  $C_{LF}$  ökar något, därmed blir det ett större tryck nedåt på framaxeln. Analysen av bilderna visar att det uppstår en lägre hastighet under bilen i 170 jämfört med 80 km/h, vilket förmodligen bidrar till att det bildas ett undertryck under framvagnen. De variabler som förändras mest är  $F_{NF}$  och  $F_{NB}$ , vilka kan ha en stor inverkan på bilens köregenskaper. En mer djupgående analys av bilens beteende på grund av dessa variabler tas upp i kapitel 5.3.

### 5.1.1 Luftmotstånd

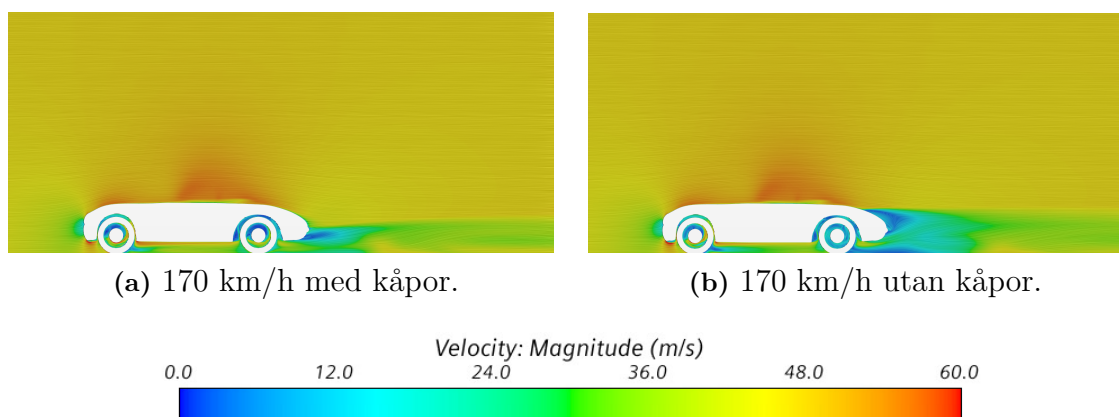
Figurserien som syns i figur 5.2 visar iso-ytor över bilen där den dynamiska tryckkoefficienten (Total Pressure Coefficient) är satt till noll och därmed normaliserad mot det dynamiska trycket i friströmmen. Skillnaden mellan dynamiskt- och statiskt tryck (Pressure Coefficient) är att det dynamiska trycket är det som erhålls om all energi i hastigheten konverterats till tryck medan det statiska endast inkluderar lufttrycket. De blå konturerna symboliserar vaken.

Jämförs flödet på bilen med och utan kåpor kan en tydlig skillnad observeras, speciellt runt hjulhusen och i slutet av bakvagnen. Då kåporna avlägsnats får flödet en större möjlighet att strömma ut längs med sidorna på bilen istället för under bilen, appendix A.2. Början av analysen visade att hastigheten inte bidrar till någon större förändring av luftmotståndet, utan den största faktorn är kåporna. Dock så visar jämförelsen mellan 80 och 170 km/h utan kåpor att flödet får en något mer strömlinjeformad utformning i den högre hastigheten. I tabell 4.1 och 4.2 ökar  $C_D$  då kåporna avlägsnats, vilket beror på den större vak som uppstår. Samtidigt minskar  $C_D$  i båda fallen för med och utan kåpor då hastigheten ökar, anledningen till det är som tidigare påpekats att vaken blir mindre och mer strömlinjeformad vilket bidrar till en mindre förlust i energi.



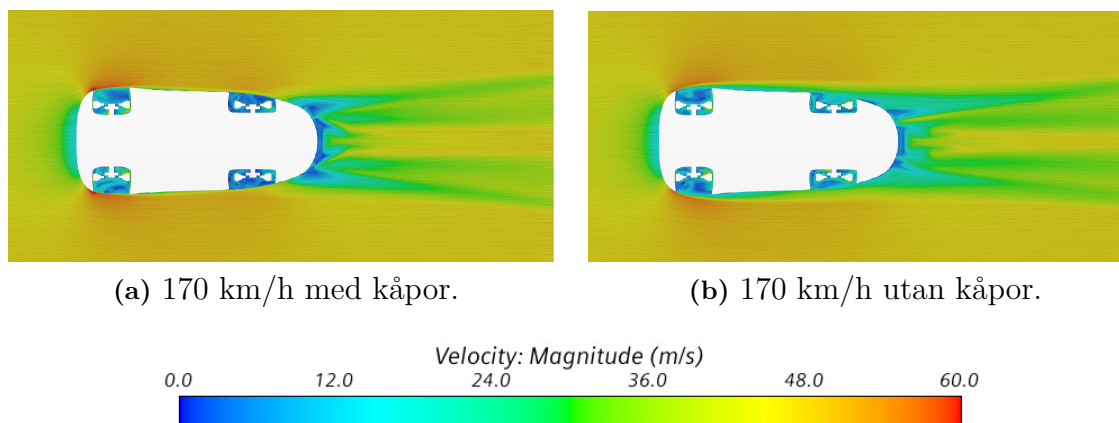
**Figur 5.2:** Iso-yta, där dynamiska trycket är satt till 0, vid 170 km/h och yaw-vinkel 0 med och utan kåpor.

Figur 5.3 illustrerar ett tvärsnitt på bilen 0,57 m i y-led från mitten, det vill säga ett tvärsnitt mitt i däck. I figuren syns det att utan kåpor blir vaken större på grund av att luften flödar ut från både hjulhusen och underifrån som ansamlas till ett flöde. Med kåpor blir vaken betydligt mindre då luften nästintill bara strömmar ut från undersidan, vilket också tydligt kan observeras i figur 5.2. Vid hastigheten 170 km/h blir vaken något mindre jämfört med 80 km/h, detta för att flödet är mer anlagt vid 170 km/h, appendix A.3.



**Figur 5.3:** Hastighetsfördelning 0,57 m från bilens mitt vid 170 km/h med och utan kåpor.

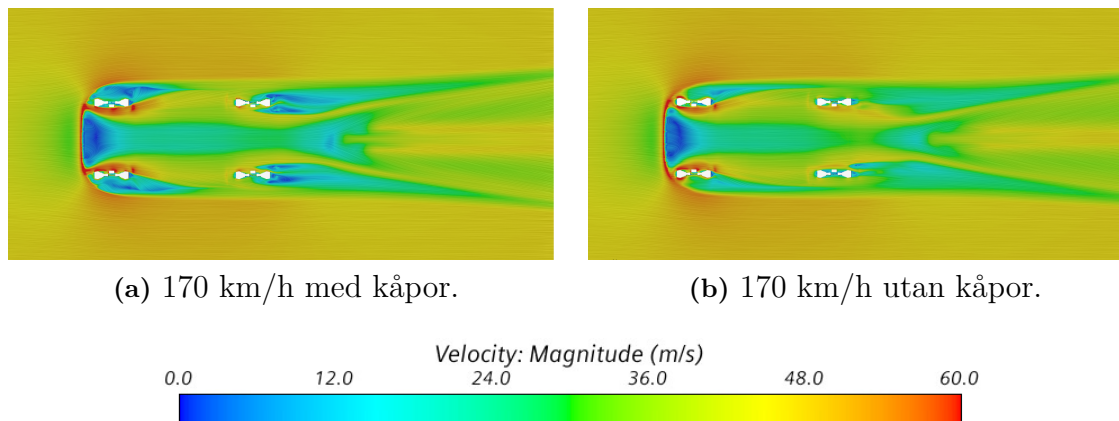
Figur 5.4 visar hastigheten på luften i höjd med hjulaxlarna, 0,25 m över marken, sett ovanifrån. Med kåpor ligger flödet tätt intill bilen tills det passerat de bakre hjulhusen, där det sedan separerar. När kåporna avlägsnats betar sig flödet annorlunda och separerar vid de främre hjulen och lyckas aldrig komma tillbaka intill bilens kropp. Det går att se att det ansamlas mindre luft i de bakre hjulhusen, appendix A.4. Anledningen är förmodligen att luften lättare släpps ut vid hjulhusen, vilket verkar bidra till att det utan kåpor blir en bredare vak bakom bilen men inte lika intensiv som med kåpor.



**Figur 5.4:** Hastighetsfördelning 0,25 m över marken, höjd med hjulaxlarna, vid 170 km/h med och utan kåpor.

Med kåpor passerar luft med hög hastighet på insidan av de främre hjulen, se figur 5.5, där snittet är taget 0,19 m över marken. Luften som passerar under bilen tappar snabbt fart och därmed energi. Utan kåpor uppträder flödet tvärt om och verkar därmed ha en högre hastighet på utsidan av framhjulen, vilket det röda området visar. Vid framhjul och bakåt, utan kåpor, har luftflödet en mer kontinuerlig vak,

medan med kåpor blir vaken mer intensiv. Däremot verkar luften accelerera till högre hastighet och därmed blir vaken mindre med kåpor.



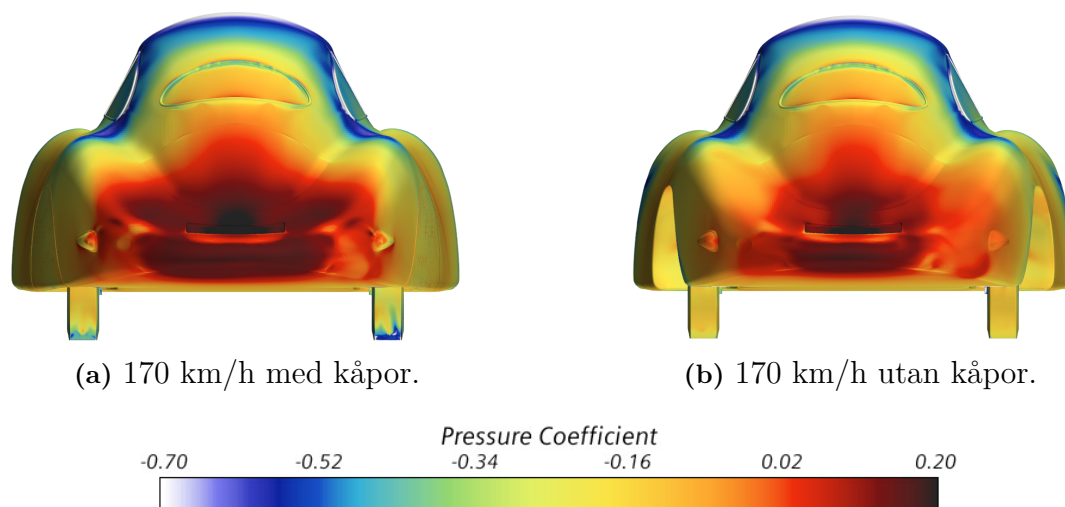
**Figur 5.5:** Hastighetsfördelning 0,19 m över marken vid 170 km/h med och utan kåpor.

På grund av att luften inte flödar lika tätt längs bilen utan kåpor skapas inte samma övertryck direkt efter bilen vid baklyktorna, se figur 5.4. Vid bakhjulen syns ett flöde med högre hastighet på insidan av hjulet, appendix A.5. Förmodligen beror detta på att luften som kommer in i hjulhuset inte blockeras på samma sätt som med kåpor, vilket bidrar till ett lättare flöde runt hjulen. Som tidigare nämnts blir vaken bakom bilen mindre men mer intensiv med kåpor, vilket beror på den turbulens som skapas i hjulhuset. Tillsammans bidrar detta till ett lägre  $C_D$ .

### 5.1.2 Lyftkraft

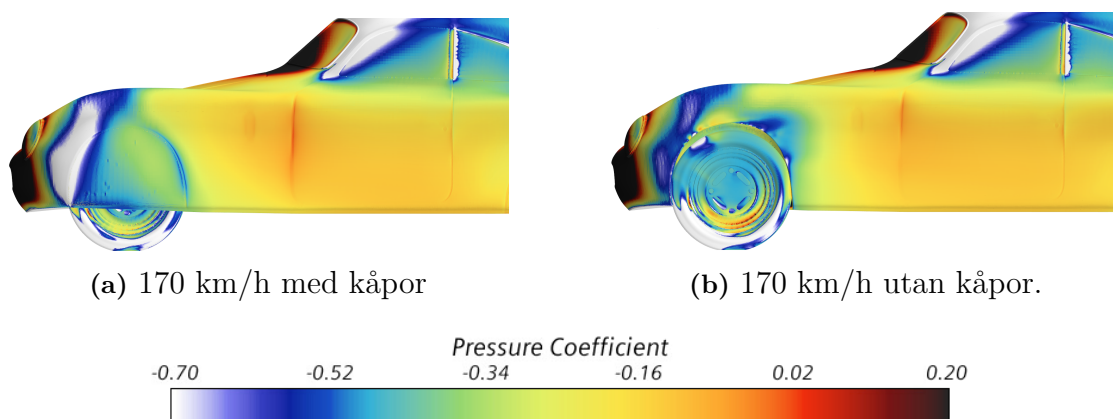
En jämförelse med och utan kåpor i 170 km/h bak på bilen, se figur 5.6, visar att det uppstår ett större tryck med kåpor. Enligt det fenomen som tidigare påpekats antas tryckfördelningen spridas på samma sätt. Det ojämna trycket som uppstår på de bakre däckerna med kåpor beror på en mer utbredd hastighetsfördelning, appendix A.6. Utan kåpor är det en mer jämn hastighet längs hela däckets, vilket bidrar till det jämnt fördelade trycket bak på bilen i figur 5.6.

$C_{LB}$  med kåpor varierar enligt tabell 4.1 och utan kåpor enligt tabell 4.2. Med kåpor ändras sig värdet på kraften ytterst lite då bilen framförs i olika hastigheter, vilket stämmer överens med tryckbilder för olika hastigheter eftersom de inte ändras nämnvärt. Det intressanta sker dock utan kåpor då kraften ändras i de olika hastigheterna, vid analys av figurer för trycket är det dock svårt att identifiera varför. Troligtvis beror det på den turbulens som skapas då kåpor är borta, vilket bidrar till ett mer slumpartat flöde. Det högre bastrycket som kan ses i figur 5.6 bidrar till det lägre luftmotståndet då kåpor är på vilket påpekades i föregående avsnitt.



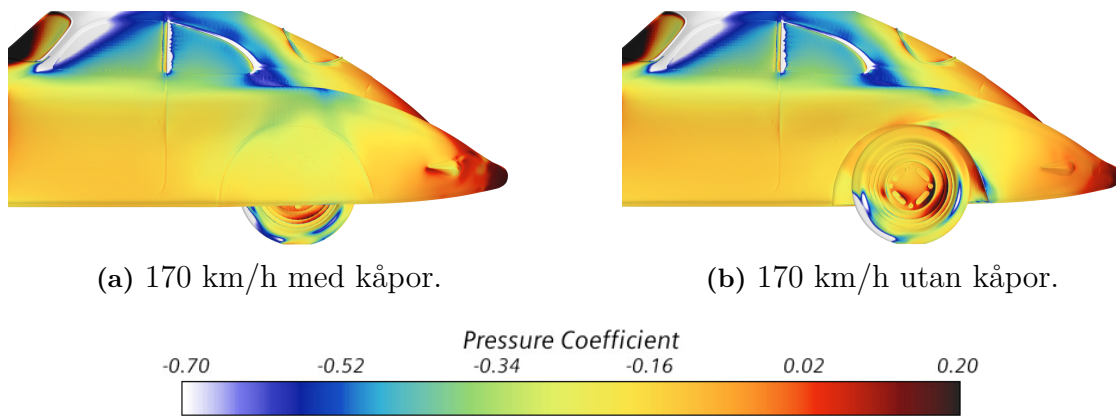
**Figur 5.6:** Tryckfördelning bak på bilen vid 170 km/h med och utan kåpor.

I figur 5.7 fram på bilen uppstår det ett stort undertryck framför hjulet då kåpor är på. Anledningen till detta är att flödet som ligger an bilen har en högre hastighet, vilket medför att det blir ett större undertryck, appendix A.7. I fallet utan kåpor uppstår det ett större undertryck bakom främre hjulhuset på grund av att luften som flödar ut från hjulhusen skapar en vak. Dock uppstår det ett högre tryck på fälgen utan kåpor, vilket kan bero på turbulenta förhållanden.



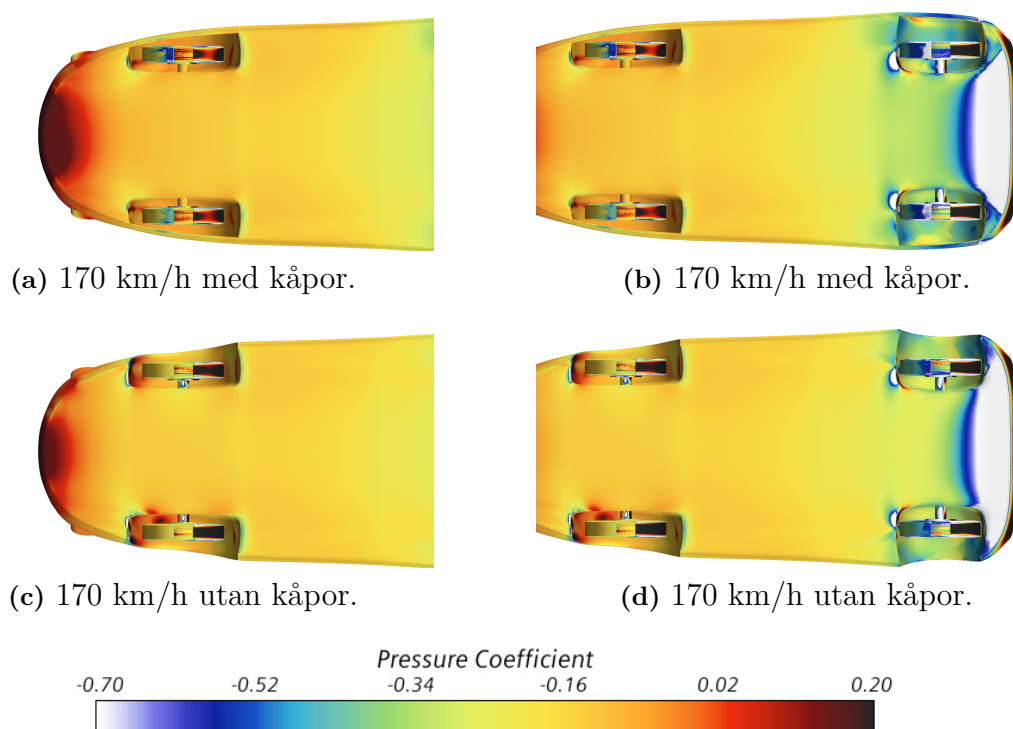
**Figur 5.7:** Tryckfördelning på sidan av framvagnen vid 170 km/h med och utan kåpor.

I figur 5.8 blir det ett sporadiskt högre tryck, speciellt runt lyktorna och den bakre delen på bilen med kåpor på. Anledningen till det högre trycket på lyktan och bakvagnen är på grund av det mer anlagda flödet som uppträder då kåpor används. Den större turbulensen runt baklyktorna som syns antas ge upphov till det högre trycket, appendix A.4. Ovanför hjulhusen så är det ingen större skillnad och verkar inte påverkas om kåpor är på eller ej.



**Figur 5.8:** Tryckfördelning på sidan av bakvagnen vid 170 km/h med och utan kåpor.

Det stora lågtrycksområdet fram på undersidan i figur 5.9 är mer utbrett längs kortsidan utan kåpor, men med kåpor är det mer utbrett längs långsidan. Detta övergår i att det gröna området är något mer tydligt på framvagnen med kåpor. Tabell 4.1 visar ett högre belopp av  $C_{FL}$  än tabell 4.2, vilket betyder att ett större lågtrycksområde under bilen bidrar till en starkare negativ lyftkraft. Trycket på bakhjulen är något lägre med kåpor på, däremot uppstår det ett högre tryck på hjulaxeln, medan högtrycksområdet på bakvagnen minskar då kåpor tagits bort. Det större högtrycksområdet under bilen med kåpor bidrar till att det blir en större lyftkraft bak i positiv riktning.



**Figur 5.9:** Tryckfördelning på underredet vid 170 km/h med och utan kåpor.

## 5.2 Varierande yaw-vinklar

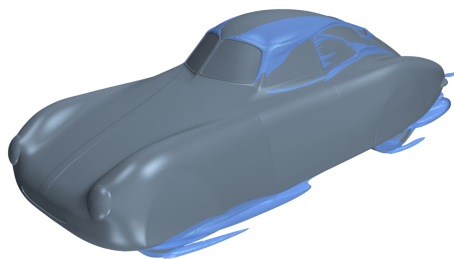
I detta avsnitt kommer luftmotstånd samt lyftkraft på bilen analyseras vid olika yaw-vinklar med hjälp av resultatet som tagits fram. Det som kommer jämföras är yaw-vinklarna tre, fem och åtta grader för att på så sätt kunna se hur en förändring av dem kommer påverka bilen. Samtliga analyser sker i 170 km/h då det inte visades någon större skillnad vid de olika hastigheterna.

### 5.2.1 Luftmotstånd

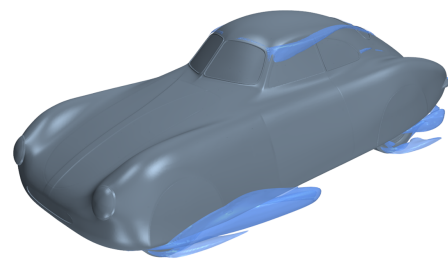
Figur 5.10 nedan visar en bildserie av iso-ytor med yaw-vinklarna noll, tre, fem och åtta grader vid en hastighet av 170 km/h, med den dynamiska tryckkoefficienten satt till noll. Iso-ytorna analyseras endast vid olika vinklar då det inte blev någon markant förändring när hastigheten ändrades. Från tabell 4.3 så avläses att  $C_D$  ändras drastiskt när yaw-vinkeln ökar, där  $C_D$  är 0,212 vid en yaw-vinkel på noll grader och upp till 0,275 vid en yaw-vinkel på åtta grader. De blåa volymerna som tidigare nämnts är en vak där en separation sker mellan luften och bilen.

Från figurserien kan det ses en tydlig ökning av separationen vid en högre yaw-vinkel, speciellt mellan vinklarna noll och tre, samt fem och åtta grader. Från tabell 4.3 kan det avläsas att en större yaw-vinkel ger upphov till en större luftmotståndskoefficient, vilket tydligt korrelerar med mängden separation på bilen vid de olika vinklarna. Tryckkoefficienten minskar i bakre delen av bilen när yaw-vinkeln ökar,

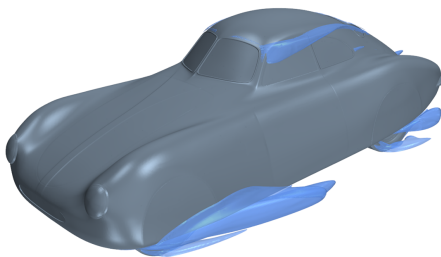
enligt figur 5.12. Det skulle alternativt kunna förklaras genom att ett anlagt flöde korsar över bakrutan, vilket bildar en virvelström precis bakom bilen, som skapar separation och på så sätt leder till ett lågtryck över området längst bak på bilen. Detta kan öka luftmotståndet, vilket stämmer överens med resultatet i tabell 4.3.



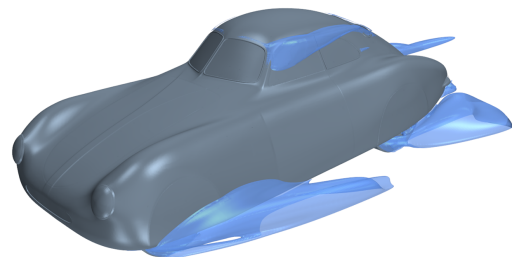
(a) 170 km/h yaw-vinkel 0.



(b) 170 km/h med yaw-vinkel 3.



(c) 170 km/h med yaw-vinkel 5.

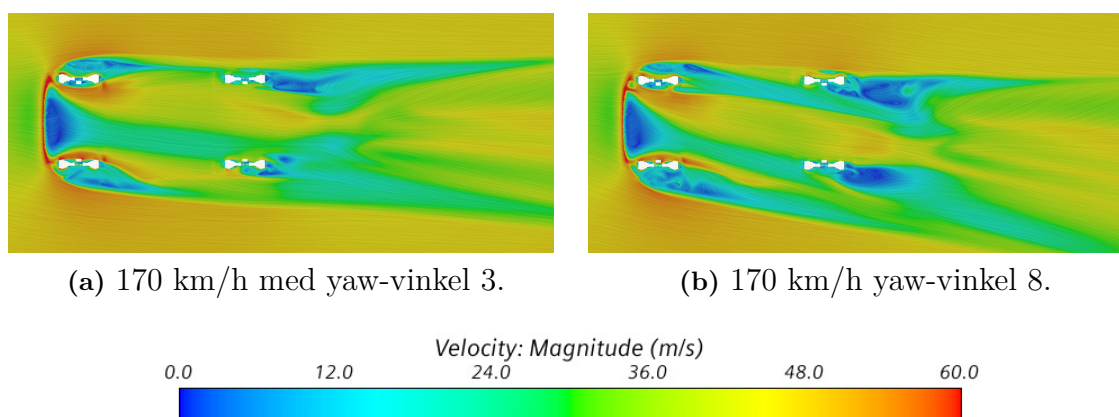


(d) 170 km/h med yaw-vinkel 8.

**Figur 5.10:** Iso-yta, där dynamiska trycket är satt till 0, vid 170 km/h med yaw-vinkel 0, 3, 5 och 8 grader.

Genom att titta på lufthastigheten blir det lättare att se hur separation sker vid de olika delarna av bilen, men även hur stor flödes hastigheten är över vissa områden. Figur 5.11 visar lufthastigheten precis under bilen vid hastigheten 170 km/h med en yaw-vinkel på tre grader i figur 5.11a och en på åtta grader i figur 5.11b på en höjd av 0,19 meter över marken.

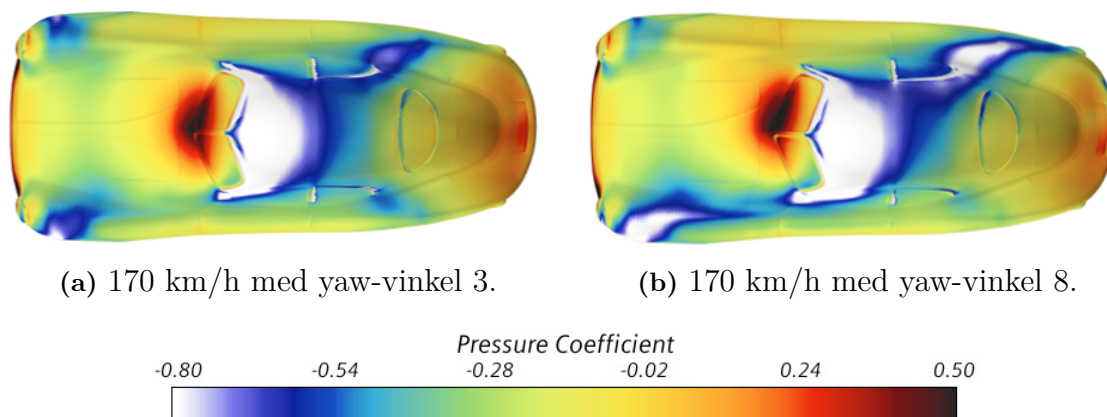
Vid yaw-vinkel åtta grader kan det tydligt avläsas att det blir ett större område med en lägre hastighet bakom hjulen jämfört med tre grader. Båda fallen visar en virvelström längst upp till höger bakom bilen, vilket förklarar lågtrycket som uppstod i bakre delen av bilen i figur 5.12. Separationen vid vinklarna åtta och tre grader korrelerar med den separation som syns i figur 5.10, det går även att se att nästintill all separation mellan bil och flöde sker på motsatt sida gentemot där luften strömmar ifrån. Vid åtta grader strömmar det blåa hastighetsfältet ända från främre däckerna till de bakre, vilket möjligtvis kan bidra till en förstärkning av virvlarna och på så sätt öka luftmotståndet.



**Figur 5.11:** Hastighetsfördelning 0,19 m över marken vid 170 km/h med yaw-vinkel 3 och 8 grader.

### 5.2.2 Lyftkraft

Figur 5.12 och 5.13 visar en 3D-vy av tryckfördelning på över- och undersidan av bilen, vid yaw-vinklarna tre och åtta grader med hastigheten 170 km/h. I figur 5.12a och 5.12b syns det att trycket blir mer osymmetriskt när yaw-vinklarna ökar, detta går speciellt att se vid det nedre vänstra hörnet och uppe till höger på bilen vid åtta grader. Det går även att se en tydlig tryckskillnad på bilen, där en ökning av yaw-vinkel ger upphov till ett större område med lågtryck, vilket kan vara en av faktorerna till varför lyftkraften ökar mellan tre och åtta grader. Den starkt röda delen visar ett högtryck vid framrutan som syns i både figur 5.12a och 5.12b, antyder att flödet minskar i hastighet när den börjar strömma upp mot framrutan.

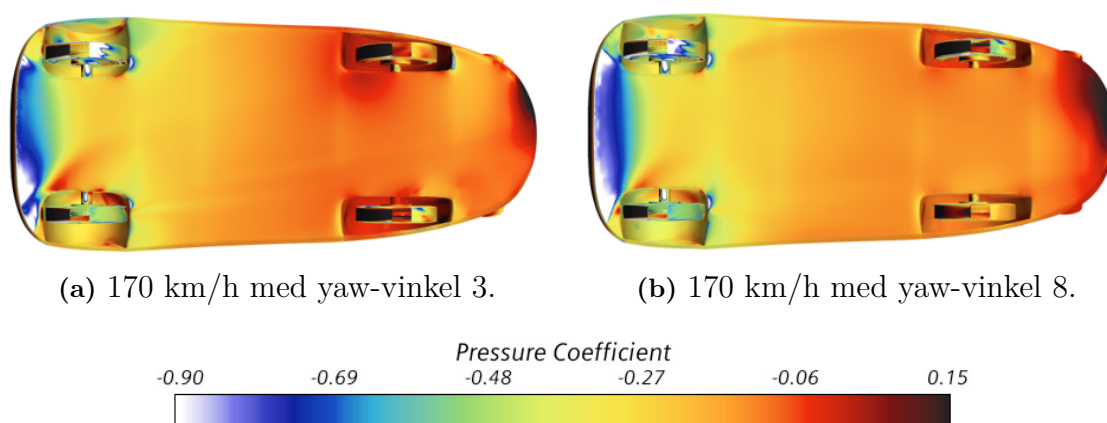


**Figur 5.12:** Tryckfördelning på karossen vid 170 km/h med yaw-vinkel 3 och 8 grader.

Figur 5.13 visar tydligt att det generellt uppstår ett högre tryck under än ovanpå bilen. Tryckkoefficienten under bilens mitt har värdet -0.15 medan koefficienten på taket på bilen, se figur 5.12, har värdet -0.80. Detta kan på så sätt bidra till

lyftkrafter på bilen. Den stora tryckskillnaden mellan vinklarna kan bero på att det blir en större acceleration över de rundade topparna på hjulhusen, både fram och bak vilket tydligt går att se i 5.12b.

Det sker även en ökning av trycket i den bakre delen av underredet, se figur 5.13b. En ökad yaw-vinkel från tre till åtta grader leder till en ännu större tryckskillnad mellan ovan- och undersidan av bilen, och därmed blir det ökande lyftkrafter bak på bilen. I tabell 4.3 kan detta också avläsas, då  $C_{LB}$  stiger från värdet 0,259 vid tre grader och 170 km/h till 0,333 vid åtta grader och samma hastighet. Vid högre hastigheter blir det alltså mer tydliga tryckskillnader under bilen där trycket är som högst bak, och ovanpå bilen, se figur 5.12. Skillnaderna mellan trycken på bilen blir även mer karaktäristiska. Detta styrker att även hastigheten påverkar lyftkrafterna.



**Figur 5.13:** Tryckfördelning på underredet vid 170 km/h med yaw-vinkel 3 och 8 grader.

### 5.3 Bilens beteende

Precis som att det finns en tyngdpunkt eller masscentrum på bilen finns det också ett centrum för trycket. Centrum av trycket är summan av alla tryckvariationer [19], vilket gör att detta är en balans mellan lyftkrafter fram och bak på bilen. När trycket förändras ändras också positionen för tryckets centrum, vilket gör att bilen antingen kommer bli under- eller överstyrd. Det är på grund av att tryckets centrum inte ligger på samma position som masscentrumet. Ligger masscentrum bakom centrum av trycket blir den överstyrd och ligger det framför blir bilen understyrd [20].

$C_L$  fram på bilen påvisar ett negativt värde vid yaw-vinkel noll grader och olika hastigheter. Vid större yaw-vinkel kommer  $C_{LF}$  öka från värdet -0,061 vid tre grader och då ha en negativ lyftkraft vid framaxeln, till att visa ett positivt beteende vid 0,073 med åtta grader, se tabell 4.3. Det gör att kraften fram istället kommer att bidra med en positiv lyftkraft. Även kraften bak kommer att växa vid en ökad hastighet och yaw-vinkel vilket bidrar med en ökande lyftkraft bak på bilen. Detta beteende gör att normalkraftsfördelningen inte kommer vara 40/60% utan röra sig

mer mot ett 45/55% förhållande vid en hastighet på 170 km/h. När detta sker flyttas positionen för centrum av trycket framåt och bilen riskerar att bli överstyrd. Det som sker är att friktionen minskar mellan däck och vägbana, både fram och bak, vilket gör att bilen kan få sämre grepp. Det är främst greppet bak som är kritisk när bilen ska svänga i kurvor, resultatet kan bli att bilen förlorar såpass mycket fäste att den får sladd.

Även vid yaw-vinkel noll grader förflyttas centrum av trycket framåt, men lyftkraftskoefficienten i fronten blir ändå inte positiv. Lyftkraften trycker bilens framvagnen ned mot underlaget ju högre hastigheten blir, medan den vid bakvagnen blir oförändrad. Sammanlagt blir lyftkraften på bilen därför mindre. Minskningen av lyftkraften och luftmotståndet som uppstår antas därför inte tendera till samma överstyrning som sker vid en större yaw-vinkel.

# 6

## Diskussion

I diskussionen kommer metod och analys att diskuteras samt att felkällor kommer evalueras. Mer specifikt beskrivs historia, teori, CAD-modell och simuleringar angående dess trovärdighet.

### 6.1 Metod

För att kunna genomföra projektet på ett tillfredställande sätt krävs grundläggande teoretiska kunskaper inom ämnet. Genom att studera bilen ur en historisk synvinkel och fördjupa sig i teori kring strömningsmekanik skapades en grund till projektet. Grunden gav goda förutsättningar att förstå CFD-program och de aerodynamiska fenomen som uppstår.

Den generella metoden som användes för att skapa CFD-simuleringarna utgörs av en standardiserad arbetsgång. Denna innefattar tillämpning av ett CFD-program, där en CAD-modell importeras och en mesh skapas innan simuleringen slutligen kan genomföras. Metoden som används är flexibel och behöver optimeras i enskilda fall för att tillgodogöra ett tillfredsställande resultat.

#### Historia och teori

Inför projektets början besatt samtliga gruppmedlemmar begränsade kunskaper i ämnet, huvudsakligen i aerodynamisk analys, men även gällande simuleringar och handhavandet av programmet STAR-CCM+. Därför har en stor del av projektet varit en inkörningsport i ämnet då gruppen har fått knyta sig an ny kunskap under arbetets gång.

Historien är en viktig aspekt i projektet då det lägger en del av grunden till simuleringarna baserat på den data som tagits fram. Det finns en del osäkerhet kring den framtagna fakta och data, eftersom det inte finns några originaldokument som behandlar bilens specifikationer. Det är inte säkert att författarna till de böcker och artiklar som använts varit helt objektiva, vilket kan leda till att informationen blir vinklad på grund av personliga åsikter. Detta kan i sin tur påverka de slutsatser som dras angående bilens historia. Den teori som har sökts upp och använts är med stor sannolikhet korrekt, då den baseras på säkra källor som behandlar strömningsteori, till exempel läroböcker.

### CAD-modell

CAD-modellen utgör en stor potentiell felkälla i projektet, då koordinaterna ej är validerade mot den verkliga bilen. En konsekvens av detta är att det uppstår en osäkerhet kring hur noggrant CAD-modellens geometri avspeglar bilens kaross. Avsaknaden av det faktiska underredet bidrar till en skillnad gentemot verkligheten, då CAD-modellen istället innehåller ett platt underrede. En bils underrede kan ha stor inverkan på hur flödet beter sig under bilen och påverkar tryckskillnaderna, vilket kan leda till förändrat luftmotstånd och lyftkraft. Andra geometriska detaljer på bilen har också stor inverkan på flödet och dess separation. Ett exempel på detta är separationen som sker under främre stötfångaren. Denna beror till stor del på utformningen av stötfångarens nedre del. En rundare utformning skulle leda till en senare separation, som i sin tur hade förändrat bilens aerodynamiska beteende.

Detaljerna i CAD-modellen som avlägsnats i programmet ANSA anses ha en liten inverkan på flödet kring bilen. Detta är dock inte kvantifierat och skillnaden mot en nominell CAD-modell är således oviss.

### Simuleringar

Samtliga simuleringar är en approximation av de ekvationer som används. Därför kommer alltid en variation i resultat fås. Det är svårt att fastställa magnituden av variationen då det inte direkt går att kvantifiera den. Simuleringarna genomförs i ett stationärt scenario med lösningsmodellen  $k - \omega$  SST för att kunna bibehålla en rimlig datorkraftsnivå. Upplösningen av flödet är alltid en avvägning mellan resurser och noggrannhet, hur noggrant behöver flödet approximeras för en rimlig verklighetsuppfattning, och hur mycket det kommer krävas i resurser. Instationära simuleringar hade troligtvis gett ett mer exakt resultat men däremot varit betydligt mer resurskrävande. Vid totalt obegränsade resurser finns en lösningsmodell DNS som fullkomligt beräknar flödet och hade bidragit till ett mer exakt resultat.

Vid tveksamheter kring resultaten återupprepades simuleringarna för att säkerställa ett tillräckligt noggrant och tillförlitligt resultat. Osäkerhet som oscillation i resultatvärdena minimerades genom medelvärdering och anses vara tillräckligt exakt. Oscillation kan uppstå på grund av en något instabil geometri i en stationär simulering.

Studier kring aerodynamiska egenskaper hos bilar kan utföras med många olika metoder, där en av dem är genom simuleringar. Andra metoder kan vara vind-tunneltester som ger en annan typ av resultat än simuleringar som är mer verklighetstrognare men svårare att kvantifiera. Därför använder biltillverkare ofta flera metoder för att analysera och säkerställa aerodynamiken hos nya koncept.

## 6.2 Analys

Mycket av analysen är baserat på ny kunskap som tidigare påpekats är begränsad. Metoden i analysen har varit att med hjälp av teorin försöka tolka siffrorna från resultatet tillsammans med figurerna som tagits fram i simuleringarna. Eftersom alla fenomen som uppstår inte alltid är konsekventa, som till exempel att en låg hastighet inte alltid leder till ett högt tryck, medför det att en viss osäkerhet rådde vid antaganden som gjorts kring bilens generella aerodynamik och dess förändring vid olika situationer.



# 7

## Slutsats

I detta kapitel tas en slutsats fram från resultaten och analysen för att kunna besvara frågeställningen på ett tillfredställande sätt. Även rekommendationer på hur framtida arbeten kan fortskrida beskrivs här för att underlätta ett utvecklingsarbete.

### 7.1 Körbeteende

Det huvudsakliga syftet med kandidatarbetet har varit att bestämma den aerodynamiska prestandan hos bilen Type 64 utifrån de framtagna resultaten från simuleringarna, för att på så sätt kunna göra rimliga slutsatser kring dess beteende. Från resultatet framgår det att normalkraftsfördelningen förskjuts framåt när hastighet och yaw-vinkel ökar.  $C_{LB}$  varierar väldigt lite vid olika hastigheter och yaw-vinklar, medan beloppet på  $C_{LF}$  blir större. På grund av att bilen har en låg totalvikt, en strömlinjeformad utformning, hög markfrigång, motor placerad i bakvagnen samt lyftkrafter som verkar, kan detta resultera i ett försämrat grepp mellan hjul och vägbana.

En bil behöver inte vara svårkörd på grund av att den är över- eller understyrd, utan det är förändringen av beteendet hos bilen som kan skapa en risk vid körning. Eftersom bilen har en normalkraftsfördelning som varierar relativt kraftigt kan bilen upplevas som svår att köra. Sammanfattningsvis kan bilens aerodynamiska prestanda anses både låg och hög. Med avseende på den låga  $C_D$  som erhållits kan bilen anses väl designad inom detta avseende, medan den relativt stora förändringen av beteendet kan vara en faktor till att bilen är svårkörd och har därmed låg prestanda.

### 7.2 Rekommendation till fortsatt arbete

Efter arbetets slut finns det några delar som kan utforskas och avsättas mer tid till, för att få ännu mer exakta resultat men även för att hitta nya beteenden som kan uppkomma vid framförandet av bilen. Det finns som tidigare nämnt fler sätt att undersöka aerodynamiken hos ett fordon än genom simuleringar. Att genomföra analysen med olika typer av metoder, som till exempel vindtunnelexperiment skulle därför ge ytterligare underlag. De simuleringar som genomförts har varit stationära, men vid instationära simuleringar kan de olika turbulensvirvlar som uppkommer studeras. Det kan ge mer exakta analyser om vad som sker vid vissa

områden av bilen. Instationära simuleringar kommer också verka som en verifikation till de stationära simuleringarna för att se att resultaten är korrekta.

Resultaten som fås är beroende av CAD-modellens geometri. För att säkerställa att de är korrekta hade modellen behövts verifieras mot geometrin från den verkliga bilen. En fortsatt studie på underredet hade också behövts då det platta underredet som idag används ger något avvikande resultat. I dagsläget finns det till synes inga CAD-modeller av underredet, så vidare arbete hade varit att hitta en ritning på det, för att sedan skapa en modell. Även bilens vikt och viktfördelning hade behövt verifieras av experter på bilen, då analysen baseras på dessa antaganden. Bilen har en viktfördelning på 40/60% enligt källa som studerats. Eftersom motorn är placerad bakom bakaxeln finns det starka belegg för att bilen har en fördelning som ligger i närheten av denna.

Fortsatta studier kring bilen kan vara att se vad som händer då bilen har en roll- eller pitch-vinkel. Eftersom denna studie bara innefattar hastigheter och yaw-vinklar kan det vara relevant att se hur bilen beter sig då den svänger, accelererar och vid retardation. Detta skulle medföra en ännu bättre förståelse kring bilens beteende.

# Referenser

- [1] RM Sotheby's, "1939 Porsche Type 64," 2019. [Online]. Tillgänglig: <https://rmsothebys.com/en/auctions/mo19/monterey/lots/r0031-1939-porsche-type-64/776606>, hämtad: 2020-02-04.
- [2] G. Smale, "Porsche Type 64: A Star is Born," *Porsche Road & Race*, dec. 2016. [Online]. Tillgänglig: <https://www.porscheroadandrace.com/porsche-type-64-a-star-is-born/>, hämtad: 2020-02-04.
- [3] D. Adler, *Porsche: The Classic Era*, Minneapolis, MN, USA: Motorbooks, 2016. [Online]. Tillgänglig: [https://books.google.se/books?id=27bMDAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=sv&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.se/books?id=27bMDAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=sv&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false), hämtad: 2020-02-06.
- [4] R. Leffingwell, *Porsche: A History of Excellence*, Minneapolis, MN, USA: Motorbooks, 2008. [Online]. Tillgänglig: [https://books.google.se/books?id=WQru-IIYfNOC&pg=PA12&lpg=PA12&dq=hans-karl+lange+porsche&source=bl&ots=1ACgXlAtL0&sig=ACfU3U2ECpIB2lU8mXJ5FvVjVhDkhARnNw&hl=sv&sa=X&ved=2ahUKEwjvh8zt3rfnAhUJalAKHfs\\_AccQ6AEwCnoECAsQAQ#v=onepage&q&f=false](https://books.google.se/books?id=WQru-IIYfNOC&pg=PA12&lpg=PA12&dq=hans-karl+lange+porsche&source=bl&ots=1ACgXlAtL0&sig=ACfU3U2ECpIB2lU8mXJ5FvVjVhDkhARnNw&hl=sv&sa=X&ved=2ahUKEwjvh8zt3rfnAhUJalAKHfs_AccQ6AEwCnoECAsQAQ#v=onepage&q&f=false), hämtad: 2020-02-06.
- [5] J. Herne, "KdF Berlin-Rome race car, Porsche type 64 (1939-1940)," *STUTTCARS The Porsche Portal*, 2014. [Online]. Tillgänglig: <https://www.stuttcars.com/porsche-models/64/>, hämtad: 2020-02-04.
- [6] N. Hall, "Welcome to the Beginner's Guide to Aerodynamics," *National Aeronautics and Space Administration*. [Online]. 2015. Tillgänglig: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/bga.html>, hämtad: 2020-03-02.

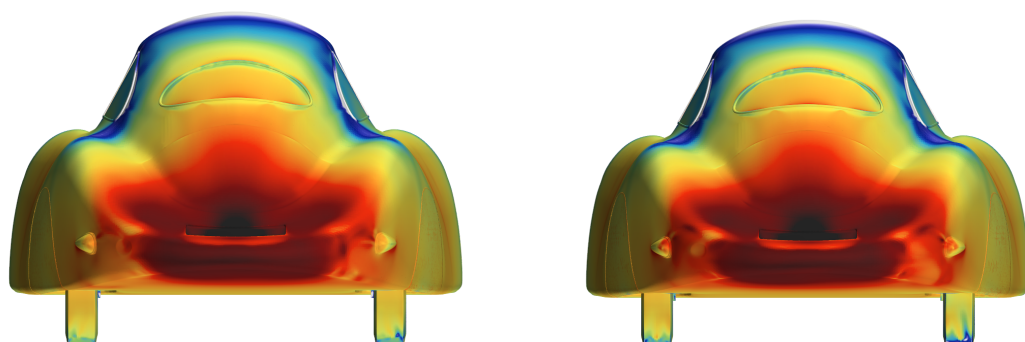
- [7] A. Falkovén et al., “CFD-analysis of the aerodynamic properties of a Mercedes-Benz 300SLR,” examensarbete för kandidatexamen, Institution för tillämpad mekanik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg, Sverige, 2015. [Online]. Tillgänglig: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/219318/219318.pdf>, hämtad: 2020-03-25.
- [8] F. White. *Fluid Mechanics*. vol. 8, New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2016.
- [9] F. Moukalled, L. Mangani, M. Darwish, *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab®*. Basel, Switzerland: Springer International Publishing, 2016. [Online]. Tillgänglig: <https://link-springer-com.proxy.lib.chalmers.se/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-16874-6.pdf>, hämtad: 2020-03-11.
- [10] R. Eymard, T. Gallouët, R. Herbin, “Finite Volume Methods,” i *Handbook of Numerical Analysis: Solution of Equation in  $\mathbb{R}^n$  (Part 3), Techniques of Scientific Computing (Part 3)*, vol. 7, Norra Holland; Elsevier, 2000, ss. 713-1020. [Online]. Tillgänglig: <https://www.i2m.univ-amu.fr/perso/raphaele.herbin/PUBLI/bookevol.pdf>, hämtad: 2020-03-08.
- [11] A. Allaby, M. Allaby, “Eddy Viscosity,” i Encyclopedia. [Online]. Tillgänglig: <https://www.encyclopedia.com/earth-and-environment/ecology-and-environmentalism/environmental-studies/eddy-viscosity>, hämtad: 2020-03-05.
- [12] CFD Online, “Specific turbulence dissipation rate,” 2011. [Online]. Tillgänglig: [https://www.cfd-online.com/Wiki/Specific\\_turbulence\\_dissipation\\_rate](https://www.cfd-online.com/Wiki/Specific_turbulence_dissipation_rate), hämtad: 2020-04-13.
- [13] CFD Online, “SST k-omega mode,” 2011. [Online]. Tillgänglig: [https://www.cfd-online.com/Wiki/SST\\_k-omega\\_model](https://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model), hämtad: 2020-03-05.
- [14] F. R. Menter, “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications,” *AIIA JOURNAL*, vol. 32, nr. 8, ss. 1598, aug. 1994, doi:10.2514/3.12149.
- [15] Hum3D, “Porsche Type 64 1939 3D model,” 2020. [Online]. Tillgänglig: <https://hum3d.com/3d-models/porsche-typ-64-1939/#reviews>, hämtad: 2020-01-29.

- 
- [16] J. Katz, *Race Cars Aerodynamics: Designing for Speed*, Cambridge, MA, USA: Bentley Publishers, 1995. [Online]. Tillgänglig:  
[https://kupdf.net/download/race-car-aerodynamics-joseph-katz-1st-editionpdf\\_5a167c88e2b6f5d57272cdc6\\_pdf](https://kupdf.net/download/race-car-aerodynamics-joseph-katz-1st-editionpdf_5a167c88e2b6f5d57272cdc6_pdf), hämtad: 2020-04-21
- [17] R. H. Barnard, *Road Vehicle Aerodynamic Design*, vol. 3, Harlow, United Kingdom: MechAero, 2009.
- [18] H. Heisler, "Vehicle body aerodynamics," i *Advanced Vehicle Technology*, uppl. 2, Oxford, England: Butterworth-Heinemann, 2002. [Online]. Tillgänglig:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750651318500154>, hämtad: 2020-04-20.
- [19] N. Hall, "Center of pressure -  $C_p$ ," *National Aeronautics and Space Administration*. [Online]. 2015. Tillgänglig:  
<https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/cp.html>, hämtad: 2020-04-17.
- [20] Formula 1 dictionary, "Aerodynamic balance or Centre of Pressure (CofP)," 2020. [Online]. Tillgänglig:  
[http://www.formula1-dictionary.net/aerodynamic\\_balance.html](http://www.formula1-dictionary.net/aerodynamic_balance.html), hämtad: 2020-04-17.



# A

## Figurer till analys

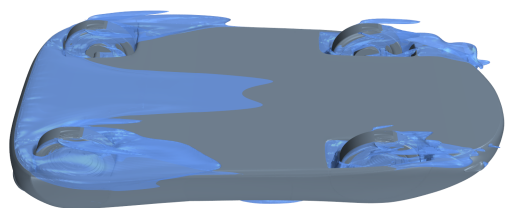


(a) 80 km/h med kåpor.

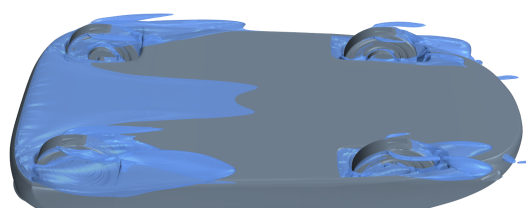
(b) 170 km/h med kåpor.



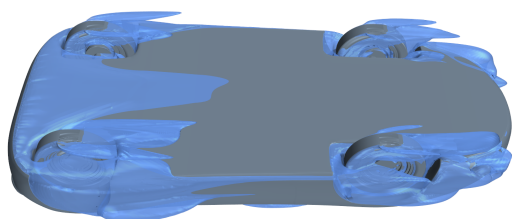
**Figur A.1:** Tryckfördelning bakifrån vid 80 och 170 km/h med kåpor.



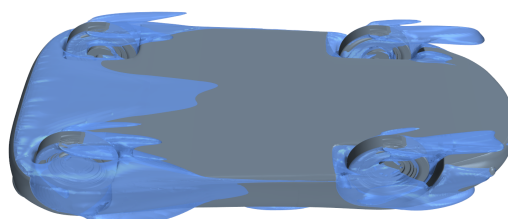
(a) 80 km/h med kåpor.



(b) 170 km/h med kåpor.

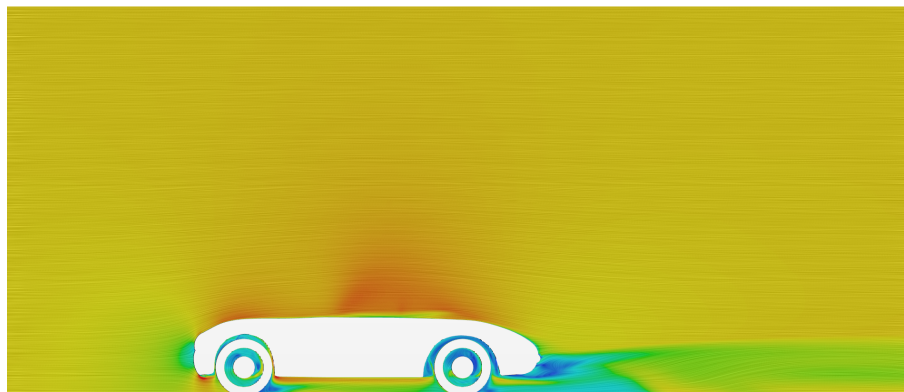


(c) 80 km/h utan kåpor.

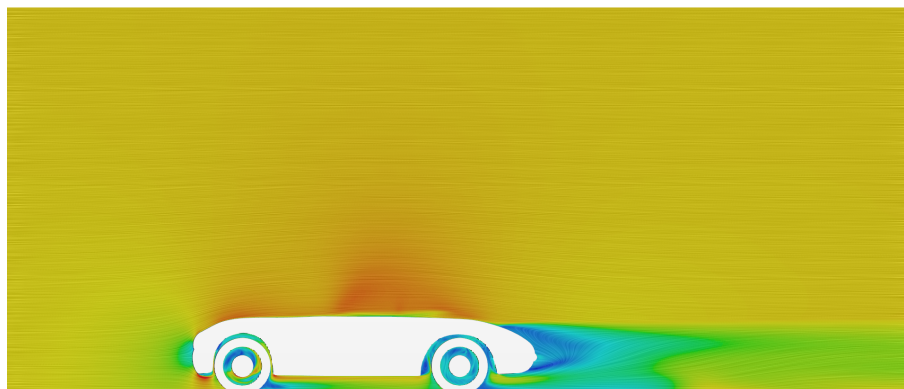


(d) 170 km/h utan kåpor.

**Figur A.2:** Iso-yta, där det dynamiska trycket är satt till noll, vid 80 och 170 km/h, med och utan kåpor.



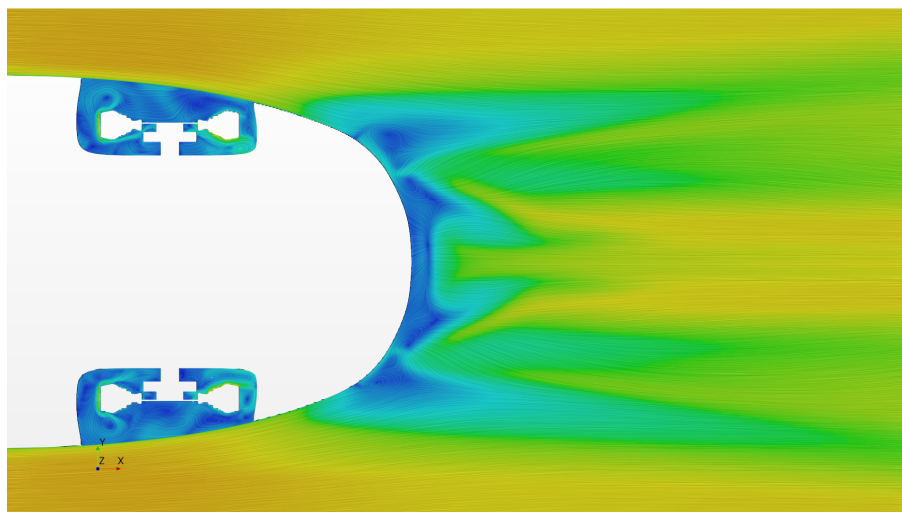
(a) 80 km/h med kåpor.



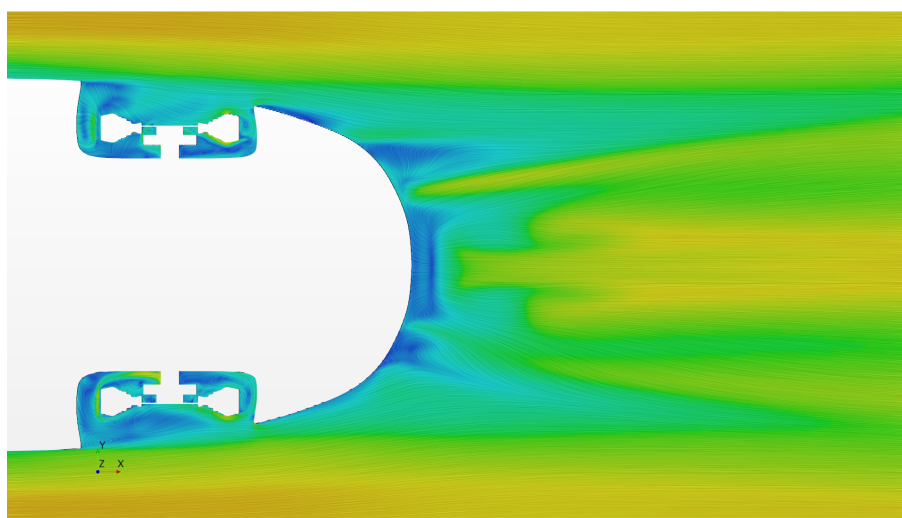
(b) 80 km/h utan kåpor.



**Figur A.3:** Hastighetsfördelning från sidan, 0,57 m från bilens mitt vid 80 km/h med och utan kåpor



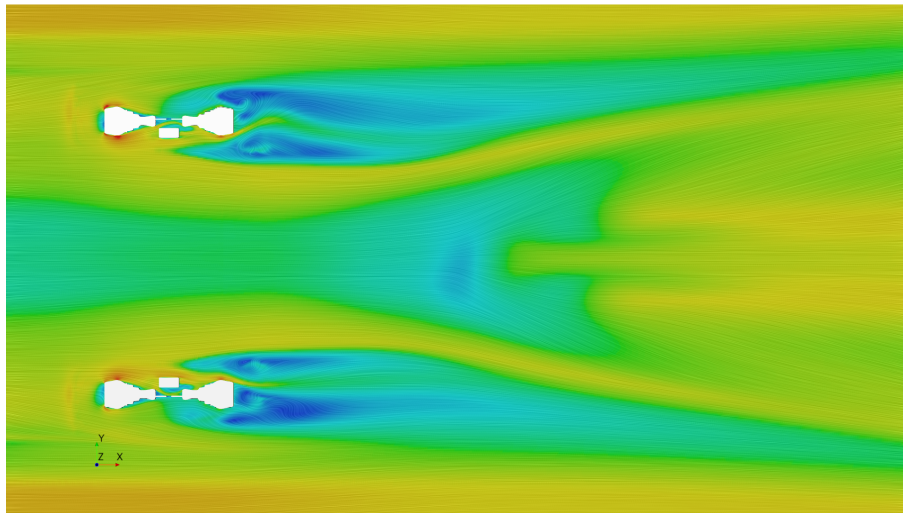
(a) 170 km/h med kåpor.



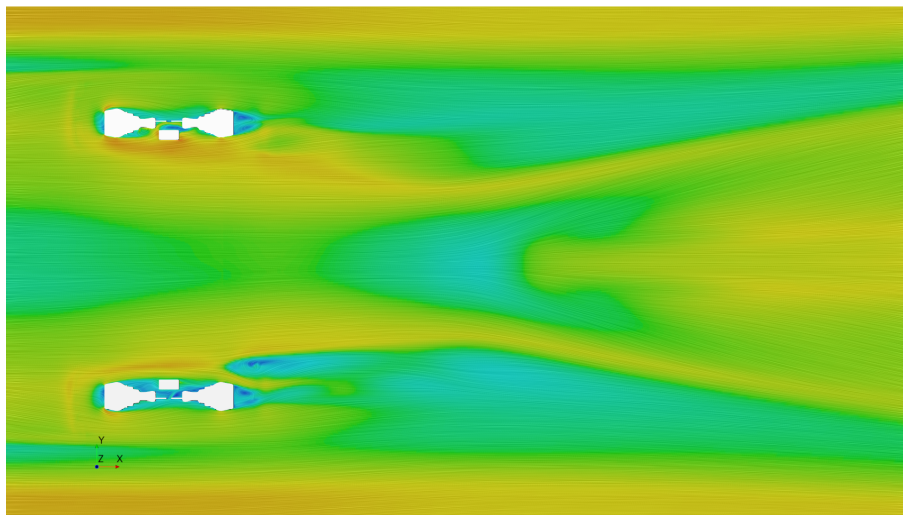
(b) 170 km/h utan kåpor.



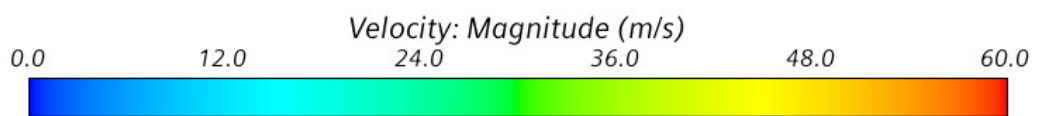
**Figur A.4:** Hastighetsfördelning underifrån, 0,25 m över marken, i höjd med hjulaxlarna vid 170 km/h med och utan kåpor.



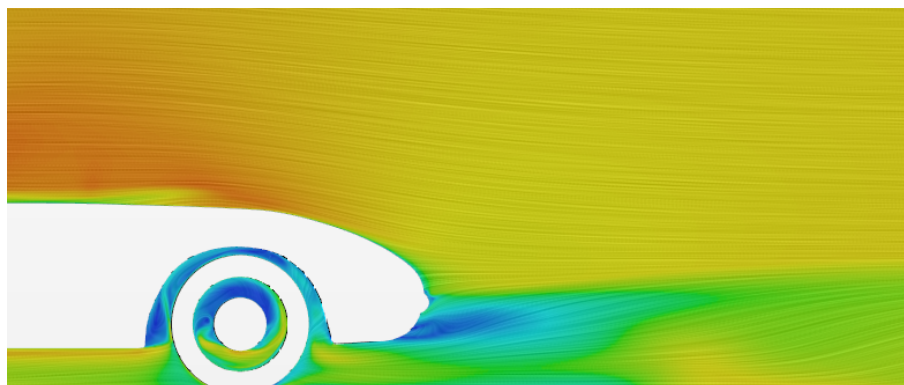
(a) 170 km/h med kåpor.



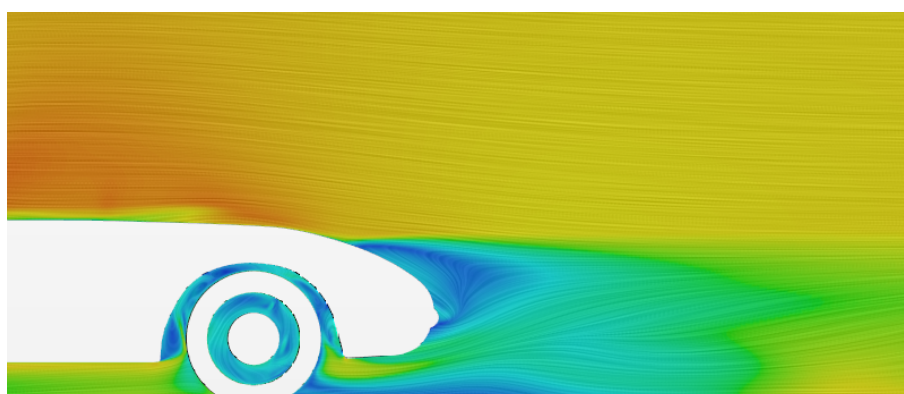
(b) 170 km/h utan kåpor.



**Figur A.5:** Hastighetsfördelning underifrån, 0,19 m över marken, precis under underredet vid 170 km/h med och utan kåpor.



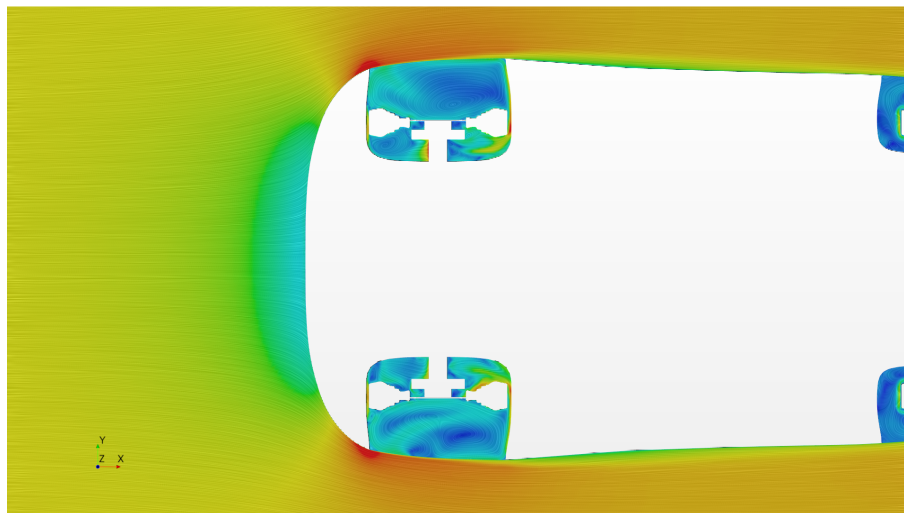
(a) 170 km/h med kåpor.



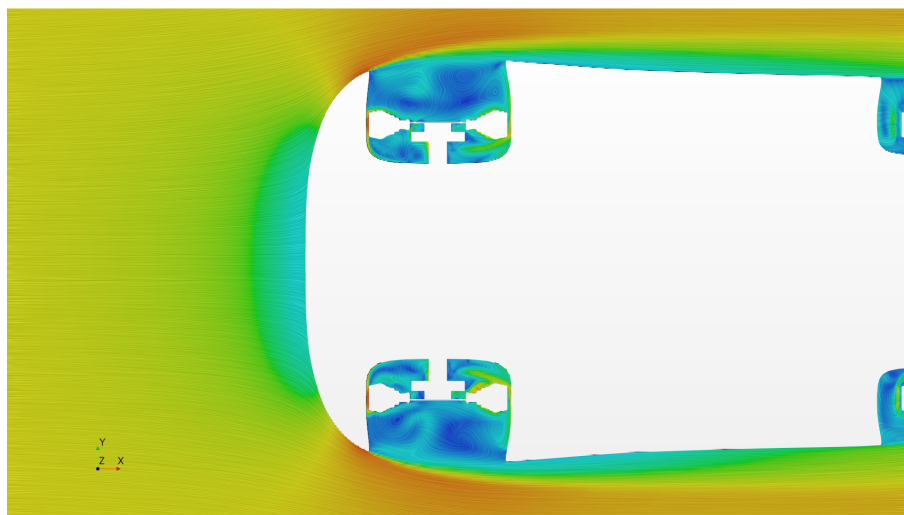
(b) 170 km/h utan kåpor.



**Figur A.6:** Hastighetsfördelning från sidan, 0,57 från bilens mitt vid 170 km/h med och utan kåpor.



(a) 170 km/h med kåpor.



(b) 170 km/h utan kåpor.



**Figur A.7:** Hastighetsfördelning 0,25 m över marken, i höjd med hjulaxlarna, vid 170 km/h med och utan kåpor.