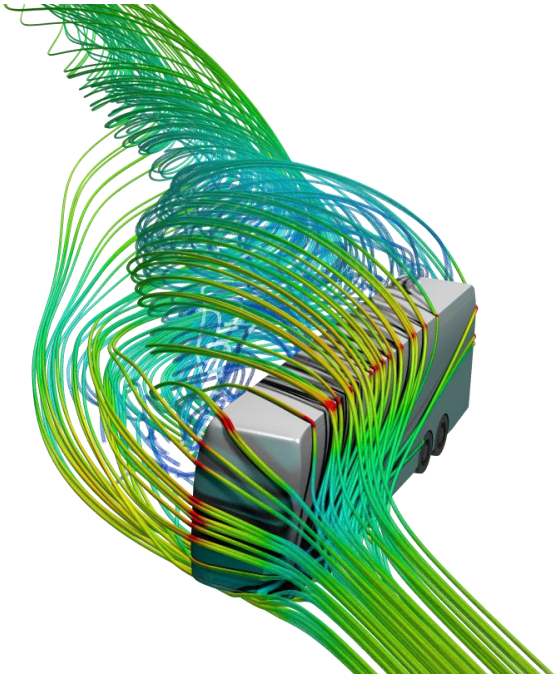
CHALMERS



Aerodynamik hos fordon under starka sidvindar

En jämförande studie mellan vindtunnel och CFD-beräkningar

Kandidatarbete inom Mekanik och Maritima Vetenskaper, M2

David Andersson
Jacob Brillante
Aron Dalemo
Emma Djerf
Adam Johansson
Jacob Larsson

INSTITUTIONEN FÖR
MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2021
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2021:11

Aerodynamik hos fordon under starka sidvindar

En jämförande studie mellan vindtunnel och CFD-beräkningar
Kandidatarbete i mekanik och maritima vetenskaper

DAVID ANDERSSON
JACOB BRILLANTE
ARON DALEMO
EMMA DJERF
ADAM JOHANSSON
JACOB LARSSON

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Avdelningen för fordonsteknik och autonoma system
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2021

Aerodynamik hos fordon under starka sidvindar
En jämförande studie mellan vindtunnel och CFD-beräkningar
David Andersson, Jacob Brillante, Aron Dalemo, Emma Djerf, Adam Johansson, Jacob Larsson

© DAVID ANDERSSON, JACOB BRILLANTE, ARON DALEMO, EMMA DJERF, ADAM JOHANSSON, JACOB LARSSON, 2021

Kandidatarbete 2021:11
Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Omslag:
Renderad scen ur Star-CCM+ som visar flödet runt en buss vid hög girvinkel.

Tryckeri /Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Göteborg, Sverige 2021

Sammandrag

Statens vegvesen i Norge önskar konstruera en flytbro som en del i ett större projekt i utbyggnaden av Europaväg 39. På flytbron kommer fordonen vara särskilt exponerade för sidvindar, vilket riskerar att kunna orsaka allvarliga olyckor för fordon med stor sidarea. Projektet kommer därför att undersöka hur stora krafter och moment som uppkommer på en buss till följd av starka sidvindar. Undersökningarna, som genomförs på en generisk dubbeldäckare, innefattar tester i vindtunnel samt datorbaserade flödessimuleringar. Ett av de primära syftena, utöver framtagning av verkande krafter och moment, är att dessutom jämföra hur resultaten mellan simuleringar och vindtunneltester står sig mot varandra. Slutligen utförs även vindtunneltester på en generisk landsvägsbuss för att jämföra med resultaten från dubbeldäckaren.

Resultatet som framkom visade att vindtunneln och CFD-beräkningar i huvudsak är jämförbara. De skillnader som förekommer är ofta skillnader i magnitud snarare än generella trender. För att eliminera felkällan av stillastående mark, vilket är en begränsning i vindtunneln, gjordes även en CFD-beräkning med så lika förutsättningar som möjligt som i vindtunneln. Till skillnad från den normala simuleringen där roterande hjul och rörlig mark användes, var dessa simuleringar statiska. Det visade sig att de båda simuleringarna var mycket lika varandra, men där skillnaderna till vindtunnelresultatet bestod.

Vid jämförelsen av dubbeldäckaren och den vanliga bussen framkom för det mesta förväntade resultat. Det kunde därför konstateras att inga större variationer i trender uppkom av att ändra geometrin i höjdled.

Abstract

In a public project to improve the Norwegian highway system, one of the main issues are the construction of bridges over deep fjords. One of the alternatives to solve this is a floating bridge. However, floating bridges offer vehicles less protection from side winds. This increases the risk of accidents, especially rollover of vehicles with a greater side profile. The following project shall therefore investigate the sizes of the resulting forces and moments on a bus as a result of strong side winds. The model will be a generic double decker bus, and the methods of investigations will include wind tunnel and computational fluid dynamics simulations. One of the primary aims of the project, besides the forces and moments, is to compare the validity between the wind tunnel experiments and the simulations. Finally, wind tunnel tests will be done on a regular single floor bus for comparison against the double decker.

The result showed that the wind tunnel and CFD computations are relatively comparable. The differences that occur are mainly differences in the magnitude rather than overall trends. To eliminate the source of error of the stationary ground in the wind tunnel an additional CFD computation was carried out to adequately match the settings in the wind tunnel. It turned out that the two simulations were very similar to one another, while the differences compared to the wind tunnel remained.

After comparing the double decker and the single floor bus, the result was as expected. No larger differences were found in the trends regarding the forces and moments after altering the height of the bus.

Nyckelord: CFD, buss, dubbeldäckare, sidvind, vindtunnel
Keywords: CFD, bus, double decker, side wind, wind tunnel

Förord

Vi vill ge ett extra stort tack till vår handledare Dr. Alexey Vdovin som varit ett stort stöd och källa för expertis under hela resan för vårt projekt. Utan din hjälp och starka engagemang hade detta projektet inte varit möjligt.

Vi vill även tacka Prof. Simone Sebben för givande föreläsningar, och betydelsefulla råd under projektets gång.

Slutligen vill vi nämna *Swedish National Infrastructure for Computing* vid *Chalmers Centre for Computational Science and Engineering* som givit oss tillgång till deras kluster för ökad beräkningskraft, något som i detta projekt varit ovärderligt.

David Andersson
Jacob Brillante
Aron Dalemo
Emma Djerf
Adam Johansson
Jacob Larsson

Göteborg, maj 2021

Innehåll

1 Introduktion **2**
- 1.1 Tidigare kopplade projekt på Chalmers . . . 2
- 1.2 Syfte . . . 3
- 1.3 Frågeställningar . . . 3
- 1.4 Avgränsningar . . . 4
- 1.5 Praktiska begränsningar . . . 5

2 Teori **6**
- 2.1 Fordonsaerodynamik . . . 6
- 2.2 Sidvindars påverkan på fordon . . . 8
- 2.3 Dimensionslösa koefficienter . . . 9
- 2.4 CFD . . . 12
  - 2.4.1 Ren ytgenerering . . . 12
    - 2.4.1.1 Kontaktvillkor . . . 13
  - 2.4.2 Konvergens . . . 13
  - 2.4.3 Beräkningsnät . . . 14
    - 2.4.3.1 Prismalager . . . 14
    - 2.4.3.2 Part-based Meshing . . . 15
- 2.5 Fysiska tester . . . 16
  - 2.5.1 Modelltester . . . 16
  - 2.5.2 Reynoldssvep . . . 17
  - 2.5.3 Blockeringseffekt . . . 17

3 Metod **18**
- 3.1 Modeller . . . 19
  - 3.1.1 Ärvd Bussmodell . . . 19
  - 3.1.2 Ny bussmodell . . . 20
  - 3.1.3 Modelltillverkning . . . 21
- 3.2 Uppsättning av simuleringar . . . 24
  - 3.2.1 Beräkningsvolym . . . 24
  - 3.2.2 Randvillkor . . . 25
    - 3.2.2.1 Randvillkor på beräkningsvolymen . . . 25
    - 3.2.2.2 Randvillkor på vägavsnitt . . . 26

3.2.2.3 Randvillkor på bussgeometrin . . . 27
3.2.3 Lokal förfining av beräkningsnät . . . 28
3.2.4 Generering av beräkningsnät . . . 29
3.2.5 Typ av beräkningsceller . . . 30
3.2.6 Konvergens av beräkningsnät . . . 32
3.2.7 Val av modeller i CFD . . . 34
3.2.8 Stoppkriterier . . . 34
3.3 Vindtunnel . . . 36
3.3.1 Dynamisk likhet i vindtunneln . . . 36
3.3.2 Utförande i vindtunneln . . . 37
3.3.2.1 Montering . . . 37
3.3.2.2 Reynoldssvep . . . 38
3.3.2.3 Mätserie . . . 41
3.3.2.4 Visualisering av flödet . . . 42
3.3.2.5 Mätning av robusthet . . . 43
3.3.2.6 Korrigering för blockeringseffekt . . . 43
3.3.2.7 Korrigering av moment . . . 43

4 Resultat **45**
4.1 Resultat på dubbeldäckaren . . . 45
4.1.1 C_d - Luftmotstånd . . . 45
4.1.2 C_s - Sidkraft . . . 51
4.1.3 C_l - Lyftkraft . . . 53
4.1.4 C_{M_x} - Rollmoment . . . 56
4.1.5 C_{M_y} - Tippmoment . . . 56
4.1.6 C_{M_z} - Girmoment . . . 57
4.1.7 Robusthet vid mätningar i vindtunnel . . . 58
4.1.8 Jämförelse mellan dynamisk och statisk simulering . . . 59
4.2 Jämförelse av dubbeldäckare och vanlig buss i vindtunnel . . . 63

5 Diskussion **65**
5.1 Diskussion av resultat för dubbeldäckare . . . 65
5.2 Förbättringsförslag . . . 66
5.3 Vidareutveckling av arbetet . . . 68

6 Slutsats **69**

Litteraturförteckning **70**

A Mätvärden från vindtunneltester **I**

B Resultat från simuleringar **V**

Förkortningar

Förkortning	Betydelse
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
AEP	Automotive Engineering Project
PLA	Polylactic Acid
GUI	Graphical User Interface
PBM	Parts-Based Meshing
DES	Detached Eddy Simulation
LES	Large Eddy Simulation

1
Introduktion

Statens vegvesen i Norge som närmast motsvaras av svenska Trafikverket, jobbar med det långsiktiga målet att utveckla Europaväg 39 mellan Trondheim och Kristiansand. Sträckan, som är 1100 kilometer lång, innehåller i dagsläget sju färjeförbindelser, där restiden ligger på 21 timmar. Denna restid vill Statens vegvesen halvera, och för det krävs en förbättring av de befintliga vägarna samt att färjorna ersätts med broar och tunnlar [1]. För att ersätta färjesträckan över den djupa Bjørnafjorden planeras en flytande bro [2]. Flytande broar är dock känsliga för sidvindar och därför minimeras brons sidarea för att inte fånga upp vind. Således kommer de fordon som färdas på bron exponeras mer för sidvindar jämfört med en traditionell bro.

Fordon med större sidarea som exempelvis bussar kan i kombination med starka sidvindar drabbas av oönskade effekter som exempelvis minskad sidostabilitet. Vid mycket kraftiga vindar tillsammans med det minskade vindskyddet från bron, ökar även risken för allvarligare konsekvenser som voltning. Statens vegvesen vill därför veta när de ska rekommendera sänkta hastigheter för stora fordon alternativt stänga bron helt. För att kunna ta fram dessa rekommendationer krävs en undersökning av de krafter och moment som till följd av sidvindar kan uppstå på ett fordon som kör över bron. Resultatet av undersökningarna ska sedan kunna användas för vidare forskning och evaluering av fordonsdynamiska aspekter som kan vara av intresse vid färd på en flytande bro.

1.1 Tidigare kopplade projekt på Chalmers

Chalmers påbörjade sitt samarbete med *Statens vegvesen* 2013 och har sedan dess genomfört flera separata projekt för att hjälpa till att skapa en färjefri E39 [3]. Följande arbete är också en del av det större samarbetet och för att ge en tydligare bild av arbetets utgångspunkt sammanfattas här de två närmast kopplande arbeten som genomförts tidigare.

Det första är ett *Automotive Engineering Project* (AEP) vilket färdigställdes i början av 2021 [4]. Projektet undersökte hur en lastbil, i form av en generisk långtrada-

re, påverkas av sidvind som flödade med varierande vinkel. Resultatet fastställdes genom att dels göra tester i en vindtunnel på en modell samt med hjälp av CFD-beräkningar på samma modell. De tester som gjordes i vindtunnneln använde stillastående hjul och mark medan simuleringarna i CFD använde roterande hjul och rörlig mark. Projektet tog endast fram storleken på krafterna och inte hur detta i sig påverkar dynamiken på fordonet.

Det andra projektet är också utfört av deltagare från masterprogramet *Automotive Engineering* [5]. Projektet genomfördes under höstterminen 2019 och slutfördes 2020. Även detta projekt undersökte sidvindars påverkan vid olika vinklar, och liknande tester utfördes som i det tidigarenämnda arbete. Skillnaden var att de istället studerade en generisk landsvägsbuss.

1.2 Syfte

Projektet har som syfte att ta fram de dimensionslösa krafter- och momentkoefficienter som uppstår på en buss till följd av starka sidvindar. Då denna framtagningsprocess kommer att ske med hjälp av datorberäkningar och vindtunneltester är ytterligare ett syfte att jämföra resultaten som uppmäts metoderna emellan.

1.3 Frågeställningar

De frågeställningar som projektet ämnar svara på under arbetes gång kan delas upp i tre grupperingar. Frågeställningarna besvaras dels genom simuleringar, dels genom vindtunneltester och till sist även genom olika typer av jämförelser.

Projektet kommer att ta fram de krafter och moment som verkar på bussen, där båda resultaten här samlas under begreppet *mätresultat*. Under samtliga tester kommer sedan mätresultaten att uppmätas för en varierande riktning på vinden, så kallad girvinkel. Processen när mätningar sker över ett flertal vinklar benämns här som ett *svep*.

Frågeställningarna ges då enligt:

Simuleringar

- Vilka mätresultat fås på en dubbeldäckare under ett svep då marken och hjulen står stilla?

- Vilka mätresultat fås på en dubbeldäckare under ett svep då marken rör på sig och hjulen roterar?

Vindtunnel

- Vilka mätresultat fås på en dubbeldäckare under ett svep då marken och hjulen står stilla?

Jämförande

- Hur skiljer sig mätresultatet från vindtunneln och CFD-beräkningarna?

- Hur skiljer sig mätresultatet från vindtunneln mellan en generisk landsvägsbuss och en dubbeldäckare?

1.4 Avgränsningar

Projektet kommer endast att ta fram mätvärden och genomföra de tidigare nämnda jämförelserna. Fordonsdynamiska simuleringar måste sedan tillkomma för att relatera mätresultaten till hur fordonet reagerar på de uppmätta krafterna, och hur detta upplevs för en förare.

Projektet kommer endast att utföra simuleringar och tester i vindtunnel på en generisk bussmodell samt en dubbeldäckarvariant baserad på samma geometri. Flera detaljer på bussen som backspeglar, handtag eller andra håligheter är borttagna för att få en så enkel geometri som möjligt.

För att minska kravet på beräkningskraft kommer dynamiska simuleringar endast ha dynamiskt beräkningsnät för underlag och hjul.

Vindtunneltester och simuleringar sker endast under stabila vindförhållanden för varje vinkel på vindflödet. Vidare kommer simuleringarna samt vindtunneln att ha konstant magnitud för vindhastighet oavsett vinkel på vindflödet.

Projektet kommer inte att inkludera geometri från bron i varken simuleringarna eller i vindtunneln. Avgränsningen görs då det för närvarande inte finns några fastställda dimensioner på brons design, samt att projektets resultat söks vara generellt.

1.5 Praktiska begränsningar

Vindtunneln på Chalmers där testerna utförs är utrustad med en vågplatta som mäter krafter och moment men som inte har möjlighet till rörligt underlag. Bussmodellen har dessutom sin infästning till vågplattan i hjulen; en annan faktor till att testerna i vindtunnel utförs statiskt med stillastående underlag och hjul.

Vågplattans placering under vindtunneln innebär att momenten mäts utifrån en punkt under markplan som är unik för uppsättningen i Chalmers vindtunnel. Då tryckfördelningen på modellen i vindtunneln inte är känd försvårar det konvertering av momenten till en annan punkt. Detta begränsar möjligheten att jämföra momenten mot andra mätningar där momenten utgår från en annan punkt.

Vindtunnelns storlek begränsar bland annat storleken på modellen men även eventuell placering av andra objekt inne i vindtunneln. I mindre vindtunnlar som denna kan en negligering av detta leda till avvikande resultat (se kapitel 2.5.3 - Blockeringseffekt).

För att få dynamisk likhet mellan modell och fullskalig buss krävs att Reynoldstalen är likvärdiga, vilket kräver förhållanden som vindtunneln inte kan efterlikna, då den har en maxhastighet på 63 m/s. Kvaliteten på bussens infästning i vindtunneln begränsar också den vindhastighet som testet kan genomföras vid utan att riskera att skada vindtunneln.

Projektet har under hela arbetet tillgång till en virtuell dator med 20 kärnor för att förbereda simuleringar. Utöver detta finns även periodvis tillgång till Chalmers kluster vilket ökar datorkraften till omkring 128 kärnor. Tillgången till klustret i detta projekt är dock begränsat till 8000 kärntimmar, något som begränsar hur mycket som kan simuleras. För att kunna hinna simulera allting som söks kommer noggrannheten på beräkningsnätet samt de inkrementella förändringarna av vindens vinklar vara grövre än idealt.

2

Teori

Detta kapitel har som syfte att introducera den teori som krävs för vidare förståelse gällande arbetets genomförande och resultat. Inledningsvis kommer därför detta kapitel att börja med teori kopplat till fordonsaerodynamik och de olika fysikaliska fenomen vilka berörs samt hur detta simuleras i en vindtunnel och i flödessimuleringar.

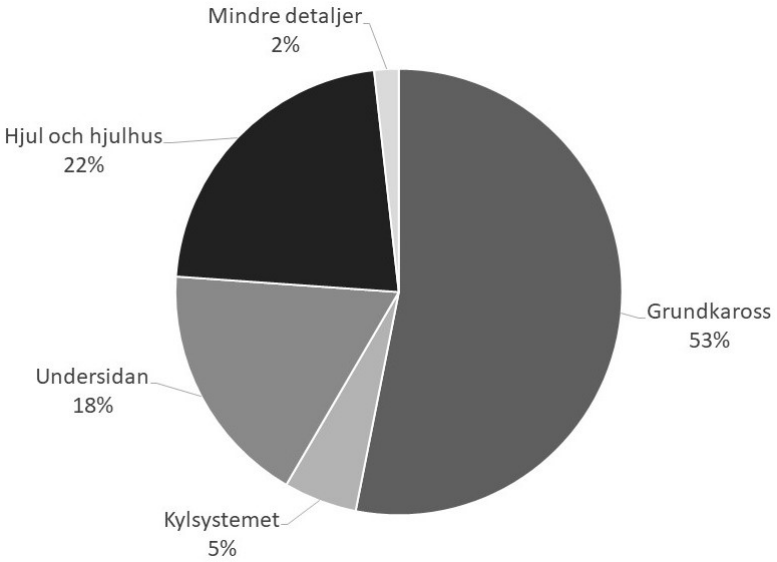
2.1 Fordonsaerodynamik

När luft strömmar runt ett fordon skapas ett luftmotstånd från att fordonets geometri tvingar luften att ändra riktning samt hastighetskillnaden mellan luften och fordonet. Hur stort detta motstånd är beror framför allt på fordonets utformning, både den övergripande formen men även hur mindre detaljer är designade. Motståndet beror även på hur fort fordonet rör sig framåt. Luftmotståndet resulterar i krafter som verkar på fordonet. Det är dels krafter skapad från ytfriktion (eng: *skin friction*) och dels krafter skapade från tryckskillnader. Krafter vilka skapas på grund av ytfriktion kommer från den luft som rör sig över fordonets yta och skapar friktion mellan luften och fordonet. Krafterna från tryckskillnader skapas av trycket över en yta, vilket matematiskt översätts till tryck $\times$ yta. Större ytor, eller högre tryck, genererar därför generellt sett högre resulterande krafter [6].

Arbete med fordonsaeordynamik innebär dels att försöka minska luftmotståndet, dels att utnyttja luftens rörelse för att kyla men också för att skapa krafter vilket påverkar fordonet på ett positivt sätt. Exempel på dessa krafterna är de skapade av en inverterad vinge vilket trycker fordonet mot marken. Detta genom att skapa optimala flöden över fordonet genom att justera geometrin. Det optimala flödet, utifrån att minimera luftmotståndet, utgår från att skapa ett så jämnt tryck framför, över och bakom fordonet som möjligt, men även att skapa släta ytor vilket skapar lägre ytfriktion.

För att beskriva ett fordons geometriska utformning ur ett aerodynamiskt perspektiv kan just storleken på dess luftmotstånd användas. Luftmotståndet kan sägas vara

storleken på krafterna från luften som fordonet måste övervinna för att accelerera. Storleken på luftmotståndet påverkas av olika delar på ett fordon [7], och delarnas storleksordning sorteras enligt figur 2.1.



Figur 2.1: Luftmotståndets uppdelning på olika delar av ett fordon.

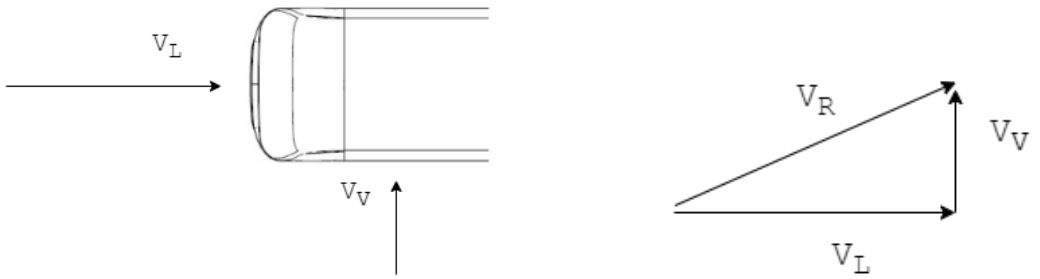
Vid simulering av fordonsaerodynamik är det viktigt att skapa simuleringar med modeller som har ett luftmotstånd vilket överensstämmer med de riktiga fordonet. Utifrån figur 2.1 kan det ses att framförallt måste modellens huvudform överensstämma med det verkliga fordonet. Därefter är den viktigaste aspekten att få däck och hjulhusen att stämma överens följt av flödet under fordonet. Anledningen till att däcken påverkar krafterna till så stor grad beror dels på att luften behöver strömma runt komplex geometri, i form av fälgar och hjulhus, men också att då däcken roterar skapas lokala luftströmmar. Detta i sig skapar krafter men påverkar också det totala flödet runt fordonet då dessa lokala strömmar runt däcken blandas med den externa luften.

På grund av däcken och hjulhusens påverkan på luftmotstånd blir simuleringar av luftmotståndet mer verklighetstrogna ifall simuleringarna använder roterande hjul. På grund av att däcken deformeras elastiskt i verkliga fordonssituationer, och därför inte är helt runda, bör också simuleringarna använda däck vilket är platta i botten. Slutligen är simuleringens flöde under fordonet viktigt, då det också är en betydande del av luftmotståndet. Därför bör marken ha en hastighet vilket rör sig med en korrekt hastighet relativt fordonet, då detta kommer påverka krafterna vilket luften skapar på underredet [7].

2.2 Sidvindars påverkan på fordon

Vind som kommer från sidan och träffar fordonet har en inverkan på fordonets stabilitet. Dels kan det uppfattas som obehagligt för föraren och även kräva att föraren parerar för att fordonet inte ska svänga. En studie som gjordes med syfte att studera sidvindsareodynmik på vägfordon av Youhanna E.William et al. [8] visar att sidkrafterna som resulterar i instabilitet uppkommer på grund av tryckskillnaden mellan vindsidan och läsidan på fordonet. I och med att bussar eller andra stora fordon har en stor sidarea i jämförelse med bilar påverkas de i högre grad av sidvindar. Ytterligare en upptäckt i studien var att lyft- och sidkrafterna som verkar på fordonet på grund av vind från en bred vinkel är högre jämfört med luftmotståndet.

Det finns en begränsning i den resulterande vindriktningen som verkar på bussen. Eftersom bussen färdas framåt med en hastighet som i de allra flesta fall överstiger vindens hastighet, kommer bidraget från luftmotståndet (V_L) att överstiga bidraget från vinden (V_V). Detta leder till att den resulterade vinkeln på vinden kommer att flackas ut, vilket kan ses i figur 2.2.



(a) Luften med en relativhastighet gentemot bussen, V_L, träffar bussen rakt framifrån. Den externa vinden V_V träffar bussen i någon vinkel. Figuren visar det fallet då det blåser rakt från sidan.

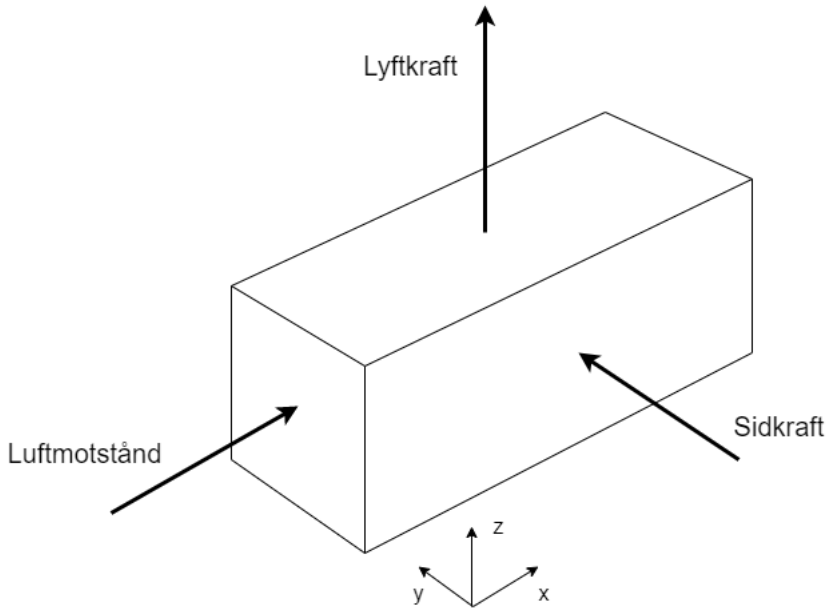
(b) Riktningen på vindresultantens V_R beror på förhållandet mellan de båda vindkomposanternas magnitud.

Figur 2.2: Hur vindresultantens vinkel beror på luftmotståndet samt riktningen på vinden.

Följden av detta är att det är högst orealistiskt att bussen upplever en resulterande vindriktning på vinklar närmare 90°, något som skulle innebära att $V_V \gg V_L$. Att vindens hastighet är mycket större än hastigheten på bussen kan endast ske då bussen i det närmaste står stilla.

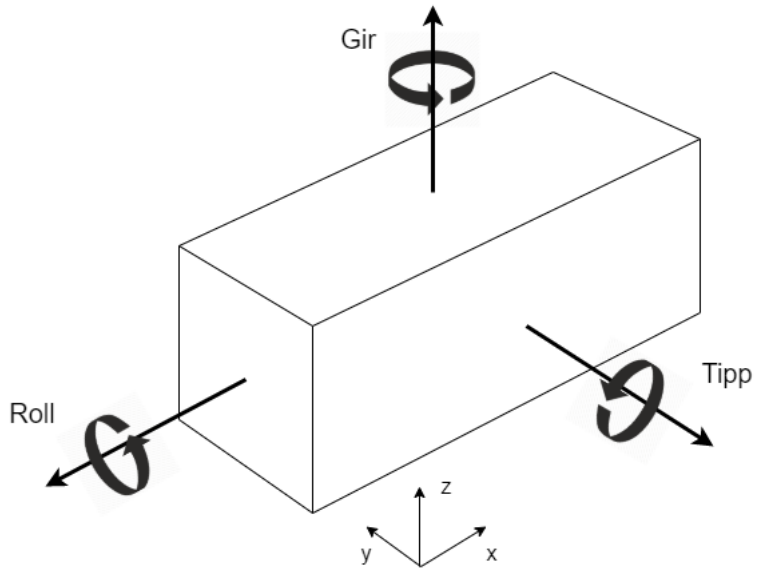
2.3 Dimensionslösa koefficienter

Alla kroppar som befinner sig i en flödande fluid kommer att uppleva krafter och moment. Dessa krafter och moment kan komposantuppdelas längs de tre koordinataxlarna, där x-axeln är parallell med fordonets färdriktning. Krafterna längs x-, y- och z-axeln kallas luftmotstånd (eng: *drag*), sidkraft (eng: *side force*) respektive lyftkraft (eng: *lift*), se figur 2.3. Koordinatsystemet orienteras så att luftmotståndet verkar parallellt med fordonets färdriktning, sidkraften verkar vinkelrätt mot fordonets färdriktning men parallellt med marken och lyftkraften verkar vinkelrätt mot både färdriktningen och marken. Vinden verkar i positiv x och y riktning.



Figur 2.3: Kraften på fordonet uppdelat i tre komposanter. Luftmotståndet verkar parallellt med fordonets färdriktning, sidkraften verkar vinkelrätt mot fordonets färdriktning men parallellt med marken och lyftkraften verkar vinkelrätt mot både färdriktningen och marken.

Analogt kan momentet som verkar på fordonet delas upp i tre komposanter i samma riktning som krafterna. Momenten kring x-, y- och z-axeln kallas roll (eng: *roll*), tipp (eng: *pitch*) respektive gir (eng: *yaw*), se figur 2.4 [6].



Figur 2.4: Momentet på fordonet uppdelat i tre komposanter: rollmomentet kring axel parallellt med fordonets färdriktning, tippmomentet kring axel vinkelrätt mot fordonets färdriktning men parallellt med marken och girmomentet kring axel vinkelrätt mot både färdriktningen och marken.

Girmomentet påverkar fordonets framåtgående stabilitet då momentet gör att bilen svänger. Detta sker eftersom momentet vill rotera fordonet runt sin rotationsaxel. Dessa krafter gör att fordonet upplevs instabilt då föraren upplever att fordonet svänger själv.

Det tippande momentet lyfter fordonet i fram- eller bakkant vilket ger flera effekter. Dels skapas ett annat tryck på hjulen vilket i sin tur ger olika mycket grepp på däcken, vilket ger fordonet annorlunda egenskaper. Dels kommer ett tippande moment att ändra undersidans lutning gentemot vägen vilket kommer påverka flödet. Detta gör att fordonet kommer ändra beteende.

Rollmoment påverkar också fordonets stabilitet men detta genom att dessa krafter vill välta fordonet i sidled. Dessa krafter kommer också att ändra kraftbilden på däcken, vilket påverkar greppet [7].

Hur stora dessa krafter och moment är beror på flera komplexa variabler såsom geometri, vinkel mot flödet och flödesförhållanden. Dessa komplicerade beroenden kan bakas in i den dimensionslösa luftmotstånds-koefficienten, C_d, och kraften fås då av ekvationen:

$$F_d = \frac{1}{2}\rho v^2 C_d A \tag{2.1}$$

där F_d är luftmotståndet, ρ är den strömmande fluidens densitet, v är friströmshastigheten och A är en referensarea [9]. Sambanden för resterande krafter och moment fås på samma sätt.

För given geometri och placering mot friströmmen beror de dimensionslösa koefficienterna på Reynoldstalet:

$$Re = \frac{vL}{\nu} \tag{2.2}$$

där v och ν är fluidens hastighet samt kinematiska viskositeten och L är en karaktäristisk längd för kroppen. För $Re \geq 10^4$ är de dimensionslösa koefficienterna i princip konstanta, vilket leder till att framtagna koefficienter kan användas för att beräkna krafter och moment vid olika Re [6]. Med hastigheter i storleksordningen 10 m/s, längdskala i storleksordningen 1 m, luft vid atmosfärstryck och temperaturen $20°C$ fås Re i storleksordningen:

$$Re \propto 10^6, \tag{2.3}$$

vilket tillåter koefficienterna att betraktas som konstanta.

Dimensionslösa koefficienter för tidigare nämnda krafter och moment kan användas fördelaktigen till indata i dynamiska fordonssimuleringar. Därför kommer dessa gås igenom härefter.

Kraftkoefficienterna ges av:

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A} \tag{2.4}$$

$$C_s = \frac{F_s}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A} \tag{2.5}$$

$$C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A} \tag{2.6}$$

där F_d, F_s och F_l är luftmotstånd, sidkraft och lyftkraft. A väljs att vara fordonets frontarea för alla koefficienter, vilket underlättar direkt jämförelse.

Momentkoefficienterna ges av:

$$C_{M_x} = \frac{M_x}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot L} \tag{2.7}$$

$$C_{M_y} = \frac{M_y}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot L} \tag{2.8}$$

$$C_{M_z} = \frac{M_z}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot L} \tag{2.9}$$

där M_x, M_y och M_z är de tidigare diskuterade momenten, A är återigen frontarean och L är fordonets längd [10].

Fördelen med att studera dimensionslösa koefficienter är att det ger ett mer generellt resultat. Uppmätta krafter eller moment visar endast en specifik bild där hastigheter, densiteter och areor är givna. Det är av större intresse i fordonsdynamiska simuleringar att erhålla generell data som kan appliceras i olika sammanhang, något som effektivt tillhandahålls av de dimensionslösa koefficienterna.

2.4 CFD

Computational Fluid Dynamics (CFD) är datorbaserade flödesberäkningar som idag är det enda sättet att lösa storskaliga strömmningsproblem matematiskt. En av fördelarna med CFD-simuleringar är att det är flexibelt och tillåter att simulera verkliga förhållanden utan att ta hänsyn till de begränsningar som kan finnas i en vindtunnel.

Efter en gjord CFD-beräkning, då det finns en genererad lösning, kan en stor mängd data enkelt hämtas via efterbehandling (eng : *Post processing*). Detta ökar flexibiliteten hos CFD-simuleringar jämfört med vindtunneltester, där flera resultat även kan vara mycket svåra att mäta.

Star-CCM+ är exempel ett kommersiellt CFD-baserat simuleringsverkyg. Programmet löser flödesproblem med hjälp av Navier-Stokes ekvationerna i en definierad kontrollvolym.

2.4.1 Ren ytgenerering

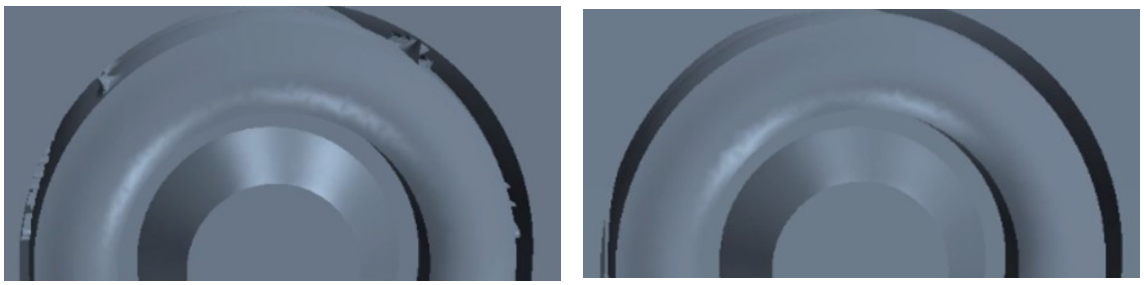
Ett problem som kan uppkomma då en komplex geometri importeras är att Star-CCM+ får problem i processen att generera ytorna. Det kan till exempel uppstå zoner där ytornas representation inte är kontinuerlig, eller där den överlappar med sig själv. Geometrin sägs vara *oren* (eng: *unclean*)[11], vilket slutligen leder till att det inte går att producera ett beräkningsnät för geometrin.

Ett av flera verktyg Star-CCM+ har för att reparera en oren geometri är *Surface Wrapper*. Då en *Surface Wrap* läggs över geometrin automatiseras en process som

löser de orenheter som finns, och genererar en ytrepresentation som går att diskretisera till ett beräkningsnät [12]. Verktyget kan närmast liknas med att slå in sin modell i plastfolie.

2.4.1.1 Kontaktvillkor

När ytrepresentationen genereras kan cellerna skapa ett oönskat beteende runt ytor som befinner sig nära varandra. Utan ett kontaktvillkor kommer celler att fylla igen tomrum som exempelvis förväntas vara luft. Se figur 2.5 för exempel på detta problem i hjulhusen på bussen, samt när detta problemet är löst med hjälp av kontaktvillkor.



(a) Felaktigt beräkningsnät i hjulhusen. **(b)** Korrekt beräkningsnät i hjulhusen.

Figur 2.5: Ett exempel på då ett kontaktvillkor är nödvändigt.

För att undvika detta sätts ett kontaktvillkor på de berörda ytorna, tillsammans med det minsta avståndet som tillåts finnas mellan två ytor. Detta gör att celler inte kommer att placeras i den volym som finns mellan två närliggande ytor.

2.4.2 Konvergens

Strömningen av en fluid runt ett objekt är olinjär i sin natur. Navier-Stokes ekvationer som används för att lösa strömningsproblem kan endast lösas genom att definiera begränsande villkor på modellen samt genom en iterationsprocess. På grund av detta måste en CFD-beräkning alltid lösas iterativt, vilket skapar problemet för när en lösning anses ha konvergerat.

En av de vanligare metoderna för att mäta konvergens är genom att undersöka residualerna från ekvationerna. I CFD-beräkningar görs en residualberäkning för varje beräknad ekvation i varje cell i beräkningsvolymen en gång varje iteration. För att nå konvergens bör residualerna gå mot noll, däremot kan de inte anta värdet noll. Istället finns olika strikta trösklar från 1E-3 till 1E-6 beroende på hur exakt lösningen söks vara [13].

Om andra parametrar av intresse beräknas i samband med simulationen är det på liknande sätt av intresse att låta dessa parametrar stabilisera sig på ett konvergerat värde. En vanlig metod för att underlätta konvergens på detta sättet är att studera förändringen av medelvärdet hos parametern under de senaste iterationerna. Parametrarna har stundtals en tendens att oscillera, vilket jämnas ut av medelvärdet. Konvergensvillkoret kan därför approximeras till att medelvärdet inte bör förändras, inom någon marginal, under ett visst antal iterationer.

2.4.3 Beräkningsnät

För att diskretisera beräkningsdomänen krävs det att hela volymen delas in i finita element, vilket bildar ett beräkningsnät. Vid genereringen av beräkningsnätet finns flera viktiga val som behövs göras, vilket kraftigt kan påverka slutresultatet.

En av de viktigare parametrarna som måste väljas är vilken generell cellgeometri som ska användas. Inom CFD finns det ett flertal olika geometriska former på cellerna, men som generella former till volymsnät finns det dock främst två former som dominerar [14].

Den första är *Trimmed cells* vilka är regelbundna och kvadratiska celler som ger en mycket god approximering av ytorna som den representerar. På grund av dess regelbundna form blir dock dess förmåga att hantera varierande riktningar på luften något begränsad.

Den andra cellgeometrin som hanterar just detta fall på ett bättre sätt är *Polyhedral cells*. Dess form består av oregelbundna polyedrar som skapar ett mer ostrukturerat beräkningsnät, men som därför förbättrar dess förmåga i varierande förhållanden [15]. Dess oregelbundna form ger också upphov till fler angränsande celler vilket förbättrar upplösningen av flödets gradienter.

Denna generella cellgeometri kommer dock inte alltid att fungera optimalt. Vid flödet mycket nära en yta krävs det större noggrannhet än vad två ovannämnda cellerna kan leverera. Därför används normalt sett en annan cellgeometri just där.

2.4.3.1 Prismalager

Gränsskiktets (eng: *Boundary layer*) upplösning beror på den första cellens höjd över modellens yta, samt hur många cellhöjder som läggs på varandra. Det är praxis inom CFD-beräkningar att använda cellgeometrin prismalager (eng: *Prism layers*) i syftet att förfina upplösningen precis intill modellens ytor, där centrum på den första prismacellen närmast ytan dimensioneras efter y^+.

Parametern y^+ är det dimensionslösa avståndet från en yta till en vald punkt i gränsskiktet, och beror på det faktiska avståndet, flödeshastigheten och fluidens egenskaper [6]. Den vanligaste arbetsmetoden för att dimensionera prismalagren består i att välja ett värde på y^+ vilket resulterar i en cellhöjd, och sedan justera höjden iterativt i CFD-mjukvara för att nå önskat resultat [16].

Vid valet av y^+ måste en bedömning angående betydelsen av det viskösa underskiktet göras. Om upplösningen av detta område förväntas ha stor inverkan på det slutliga resultatet bör detta reflekteras i ett val av ett lågt värde på y^+ (omkring 1). Om å andra sidan det viskösa underskiktet inte antas ha stor inverkan på resultatet kan en väggfunktion ge tillräcklig upplösning, och y^+ kan sättas högre för att placeras i *Log-Law Region* (omkring 30) [16].

Även när antalet prismalager bestäms används normalt en iterativ process. Det är övergången mellan prismalagren och den andra, mer generella, cellgeometrin som bestämmer hur många lager som krävs. För att en övergång ska anses vara fin bör det sista prismalagret vara ungefär hälften så tjockt som den närmast liggande generella cellgeometrin. En faktor för att styra detta utöver antalet lager är hur snabbt prismacellernas tjocklek ökar per lager, så kallad *Growth Factor*.

2.4.3.2 Part-based Meshing

Part-based Meshing (PBM) är ett alternativ till *Region Based Meshing* för att generera ett beräkningsnäts uppsättning. *Region Based Meshing* låter användaren definiera ett globalt beräkningsnätskontinuum med generella inställningar för beräkningsnäts genereringen, följt av specialiserade inställningar för varje region.

Med *Part-based Meshing* görs operationer av beräkningsnätet på de ingående delarna (eng: *parts*) vilket producerar en ny del. De olika operationerna, som inkluderar de viktigaste momenten i beräkningsnätsgenereringen, kedjas ofta ihop i en så kallad *pipeline* som producerar ett önskat beräkningsnät. Eftersom varje steg i denna pipeline producerar en ny part är det enkelt att orientera det flöde som genereringen av beräkningsnätet tar.

Några av de viktigaste fördelarna med PBM enligt CD-Adapco innefattar en större kontroll över beräkningsnätet. Den underlättar vid automatiseringen i genereringen, samt att den sparar tid då enskilda delar kan uppdateras var för sig [17].

2.5 Fysiska tester

Trots att CFD-simuleringar idag är mycket vanliga och kostnadseffektiva finns det fortfarande behov av fysiska simuleringar. Dels för att CFD-simuleringar fortfarande inte förutspår turbulent flöde perfekt och dels för att det finns risker att uppsättningen av simuleringen innehåller något mindre fel som annars inte kunnat upptäckas. Fysiska tester behövs därför som ett komplement och validering för CFD-simuleringar [18].

2.5.1 Modelltester

Tester på fullskaliga prototyper är resurskrävande både i tillverkningsprocessen av prototyperna men också i driften av de fullskaliga vindtunnlarna. Därför används ofta modeller i förminskad skala vid vindtunneltester. För att kunna använda resultat från testerna finns det en del krav på till exempelvis flödesförhållanden.

Allmänt gäller att flödesförhållandena är exakt lika om alla relevanta dimensionslösa parametrar har samma värden för modell och prototyp. Detta kravet brukar brytas ner och sammanfattas med geometrisk-, kinematisk- och dynamisk likhet.

En modell och prototyp är geometriskt lika om kroppsdimensionerna i alla tre koordinatriktingar har samma skalningsförhållande. Detta gäller även de minsta längderna så som ytfinhet, vilket ofta ställer krav på att modellers ytor skall vara släta. Ifall geometrisk likhet är uppnådd så kommer kinematisk och dynamisk likhet att nås om modellen och prototypen har identiska tryck- och kraftkoefficienter. Om flödet är inkompressibelt och fluiden är en gas är detta säkerställt då Reynoldstalet är samma för modell och prototyp. Då kommer kraft- och momentkoefficienter att vara direkt överförbara till prototypen [6].

I praktiken är det dock oftast omöjligt att uppnå exakt likhet. Detta eftersom det ofta inte finns någon fluid som har exakt de egenskaperna som krävs för att få alla dimensionslösa parametrar lika [6]. Trots att exakt likhet inte uppnås är fortfarande resultatet från de fysiska testerna användbara. Detta i enlighet med argumenten i kapitel 2.3, att de dimensionslösa koefficienterna kan betraktas som konstanta för $Re \geq 10^4$.

2.5.2 Reynoldssvep

För att kontrollera att koefficienterna är konstanta samt för att finna lämplig vindhastighet att använda i testerna brukar ett så kallat Reynoldssvep utföras. Det genomförs genom att mäta de relevanta dimensionslösa koefficienterna samtidigt som vindhastigheten sveps över ett intervall. Målet med svepet är att finna det område där Reynoldstalet är oberoende av hastigheten. Därför väljs den vindhastighet som ger upphov till minst förändring av koefficienterna som vindhastighet för testerna på modellen [19].

2.5.3 Blockeringseffekt

En viktig faktor att ha i åtanke vid tester i vindtunnel är blockeringseffekt (eng: *blockage effect*). Detta uppstår då vindtunnelns väggar hindrar flödet att expandera då det passerar modellen som är placerad i vindtunneln. Effekten blir att flödet accelereras och får en högre hastighet runt modellen vilket bland annat kan ge ökat luftmotstånd jämfört med en oändligt stor vindtunnel. För att undvika denna effekt är det viktigt att dimensionera modellen som ska testas utifrån ett blockningsförhållande (eng: *blockage ratio*) vilket är förhållandet mellan vindtunnelns tvärsnittsarea och modellens area vinkelrätt mot flödets riktning. För att kunna bortse från dessa effekter bör blockeringsförhållandet vara mindre än fem procent [20].

3

Metod

Metoden består av ett flertal huvuddelar. Först introduceras CAD-modellerna, både den modell som ärvts från tidigare projekt, samt den uppgraderade buss som detta projekt tagit fram. Sedan beskrivs tillverkningsprocessen av dubbeldäckarmodellen. Efter detta övergår fokus till uppsättningen av CFD-beräkningarna, där samtliga steg i metodiken beskrivs grundligt. Den sista delen i följande kapitel handlar om metodiken kring vindtunneln. Här beskrivs hur vindtunneltesterna förbereddes samt hur de genomfördes.

I metoden kommer ett flertal konstanter att användas, och för att samla deras värden på ett lättillgängligt sätt presenteras de i tabell 3.1 nedan.

Tabell 3.1: Konstanter som används i metoden med tillhörande värde.

Beteckning	**Fysisk Betydelse**	**Värde**	**Enhet**
T	Temperatur	25	$[°C]$
ρ	Luftens Densitet	1,18	$[\mathrm{kg/m^3}]$
ν	Kinematisk Viskositet	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$	$[\mathrm{m^2/s}]$
U	Friströmshastighet	27,78	[m/s]
v	Dubbeldäckarens Hastighet	27,78	[m/s]
L	Dubbeldäckarens Längd	13,8	[m]
A	Dubbeldäckarens Frontarea	10,03	$[\mathrm{m^2}]$
r	Dubbeldäckarens Hjulradie	0,5675	[m]

Värdena på temperaturen T, densiteten ρ och den kinematiska viskositeten ν har tagits från standardvärdena för luft vid normalförhållanden i Star-CCM+. Friströmshastigheten U och bussens hastighet v har satts för att simulera färdhastigheten 100 km/h för bussen. Dubbeldäckarens längd L, frontarea A och hjulradie r är tagna från CAD-modellen. Notera att den bussmodell som användes för mätningarna

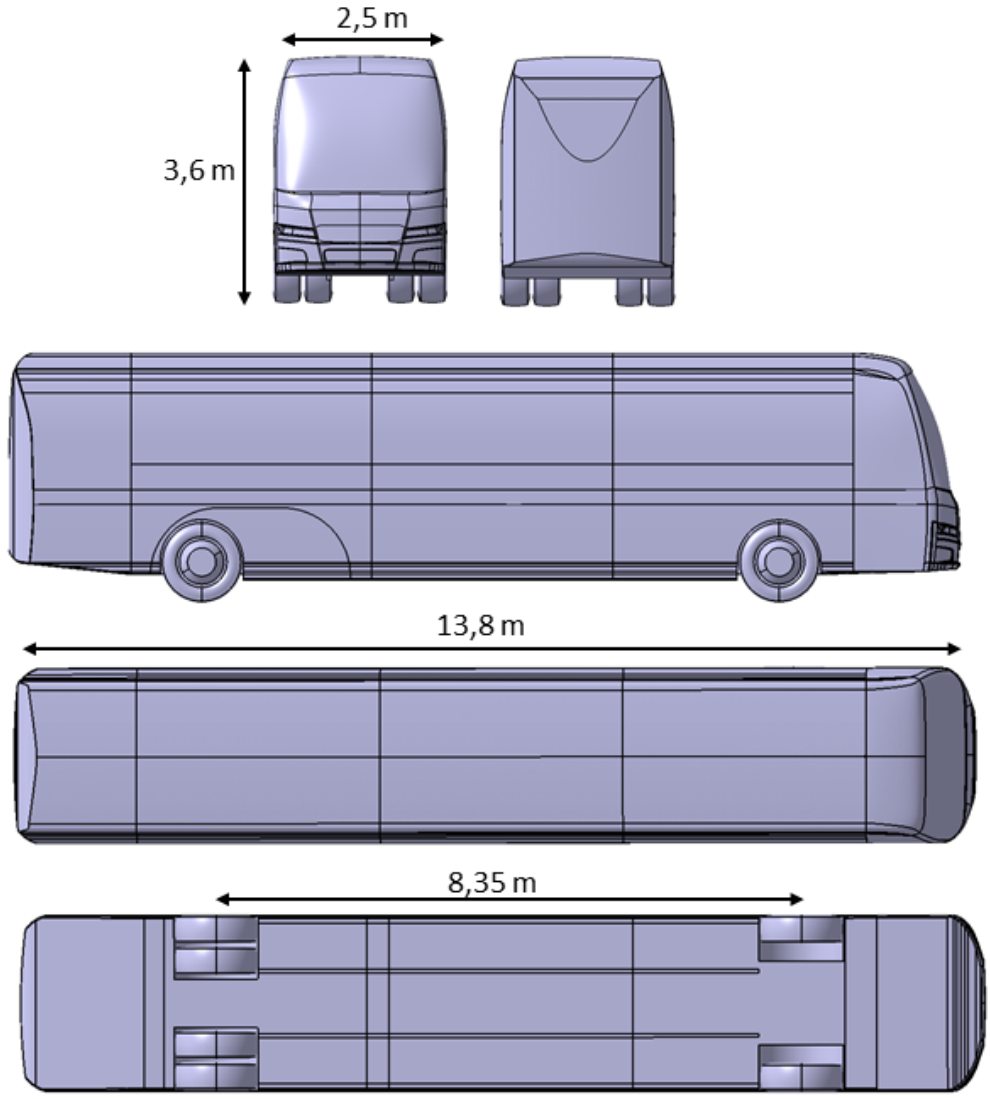
i vindtunneln är i skala 1:18 i förhållande till de geometriska mått i tabellen. För konstanter som A, som är i kvadratisk dimension, har värdet för modellen skalats med $1 : 18^2$.

3.1 Modeller

I följande underkapitel presenteras de CAD-modeller som används i projektet. Modellerna används både som geometrifil till CFD-beräkningar, men även som grund för den fysiska modellens 3D-utskrivning. Slutligen presenteras även tillvägagångsättet för modelltillverkningen av nya komponenter till dubbeldäckaren.

3.1.1 Ärvd Bussmodell

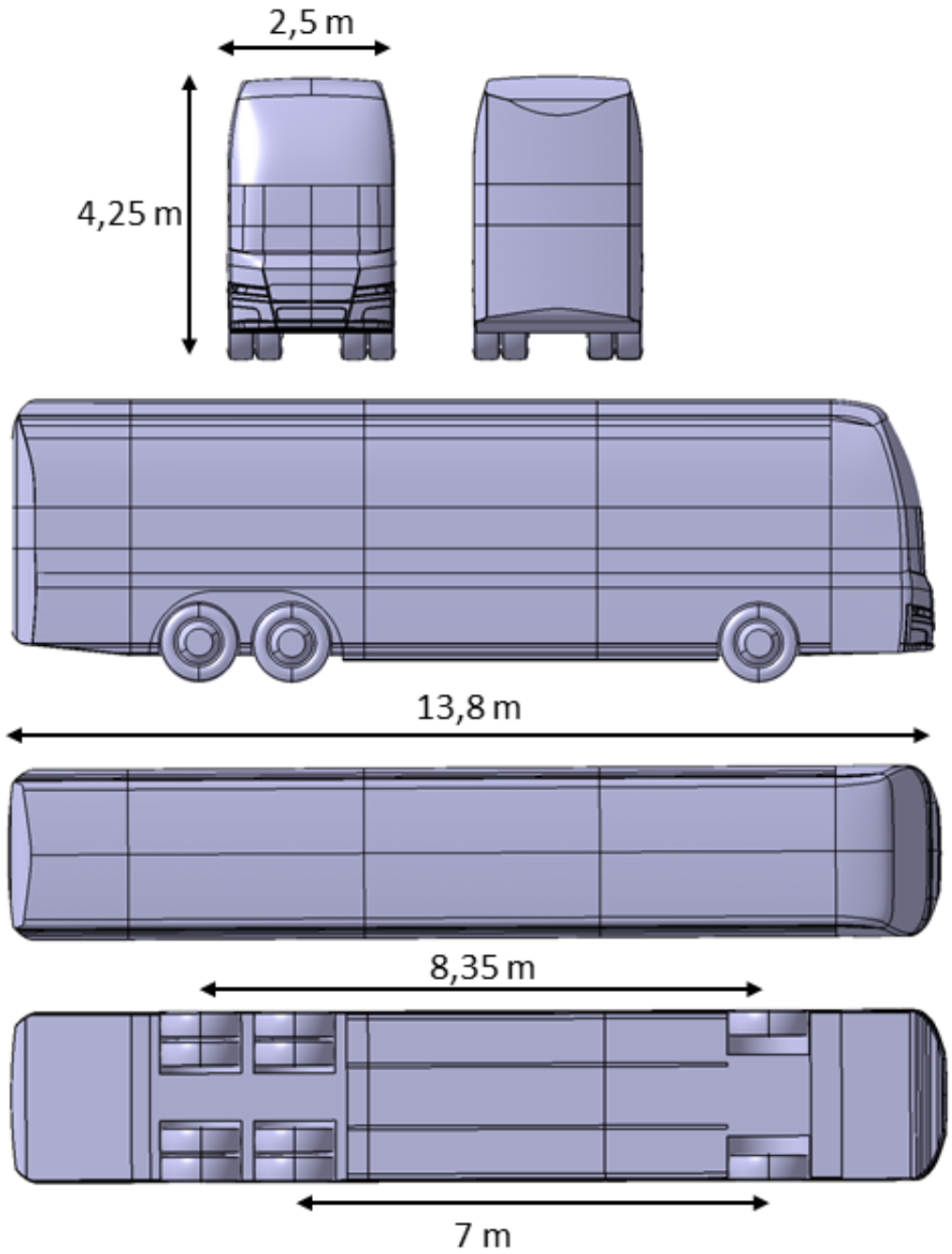
Projektet ärvde den fysiska modell av en generisk landsvägsbuss som tagits fram under de tidigare arbeten som genomförts inom detta område [5]. Modellen är fullt modulär, vilket innebär att bussens samtliga sektioner kan separeras från varandra. Syftet med detta är att kunna testa fler utformningar av bussen utan att behöva ta fram en ny buss för varje designändring. Exempelvis kan olika fronter och ändar på bussen testas genom att byta ut respektive modul. Det går även att variera mellan en eller två bakaxlar beroende på modul. Figur 3.1 visar den ärvda CAD-modellen med dess mått.



Figur 3.1: Den bussmodell som projektet ärvt från tidigare projekt.

3.1.2 Ny bussmodell

Modellen för dubbeldäckaren är en generisk modell som utgår från den tidigare beskrivna bussmodellen. Istället för att designa en buss från grunden utnyttjades den ärvda modellen så mycket som möjligt. Den nya modellen utnyttjar all gammal geometri där nya sektioner läggs till för att öka på bussens höjd. Principiellt går det att se det som att den ursprungliga modellen "sträckts ut" i höjdled. Vidare används dubbla bakaxlar på dubbeldäckaren. Den nya höjden samt dubbla bakaxlar är taget från specifikationerna för en Volvo 9700 DD [21]. Figur 3.2 visar CAD-modellen samt måtten för dubbeldäckaren.



Figur 3.2: Den dubbeldäckarmodell som användes i projektet.

3.1.3 Modelltillverkning

Efter att den ärvda CAD-modellen hade modifierats till en dubbeldäckare framställdes de olika modulerna till den fysiska bussmodellen. Fronten, mittsektionen och bakänden framställdes med hjälp av 3D-utskrivning, där de redan existerande modulerna även de var 3D-utskrivna. Axlarna som hjulen är monterade på är tillverkade i stål.

När utskrivning var färdig ytbehandlades varje modul med hjälp av spackel med härdare, spackelspray och sprayfärg. Första steget var att spackla modulerna vilket fyllde igen de ojämnheter som uppstått mellan varje lager i 3D-utskriften. När spacklet torkat kunde det slipas ned för att ge modellen en betydligt jämnare yta jämfört med en ospacklad 3D-utskrivning. Därefter applicerades en spackelspray vilket uppfyllde samma funktion som vanligt spackel. Däremot är sprayen något finare än spacklet, vilket tillåter en ännu finare yta efter slipning. Ytfinheten ökades ytterligare genom att slipa flera gånger med finare och finare sandpapper.

Till sist sprejades ytan med en blank svart färg. Den svarta färgen förväntades ge bäst kontrast mot garnbitar vid visualisering av flödet i vindtunneln. Förutom att lättare kunna visualisera flödet resulterade sprayfärgen även i att ytan gavs en liknande ytfriktionskoefficient som på en riktig buss.

Modulerna monterades sedan ihop med hjälp av både skruvar och magneter. Magneter som var placerade på utstickande koner (se figur 3.3) användes för att fästa fronten och bakdelen på resten av busskroppen. Modulerna som skapar mittenpartiet av kroppen sitter fast med hjälp av skruvar som går igenom varje modul.



Figur 3.3: Här ses baksidan av fronten och bakdelen för modellen. Delarna fästs på busskroppen med magneter på de utstickande konerna.

I figur 3.4 visas en sprängbild på alla moduler separerade och figur 3.5 visar till slut den färdiga och ihopmonterade modellen av dubbeldäckaren.



Figur 3.4: En sprängbild på dubbeldäckarmodellens samtliga moduler.



Figur 3.5: Dubbeldäckarmodellen i fullt monterat tillstånd.

3.2 Uppsättning av simuleringar

Följande underkapitel beskriver metoden bakom uppsättningen av projektets CFD-beräkningar. Simuleringarna gjordes med två olika uppsättningar för den framtagna dubbeldäckarmodellen. En med stillastående underlag och hjul, och en med rörligt underlag och roterande hjul. De båda uppsättningarna kommer i fortsättningen att benämnas statisk respektive dynamisk simulering.

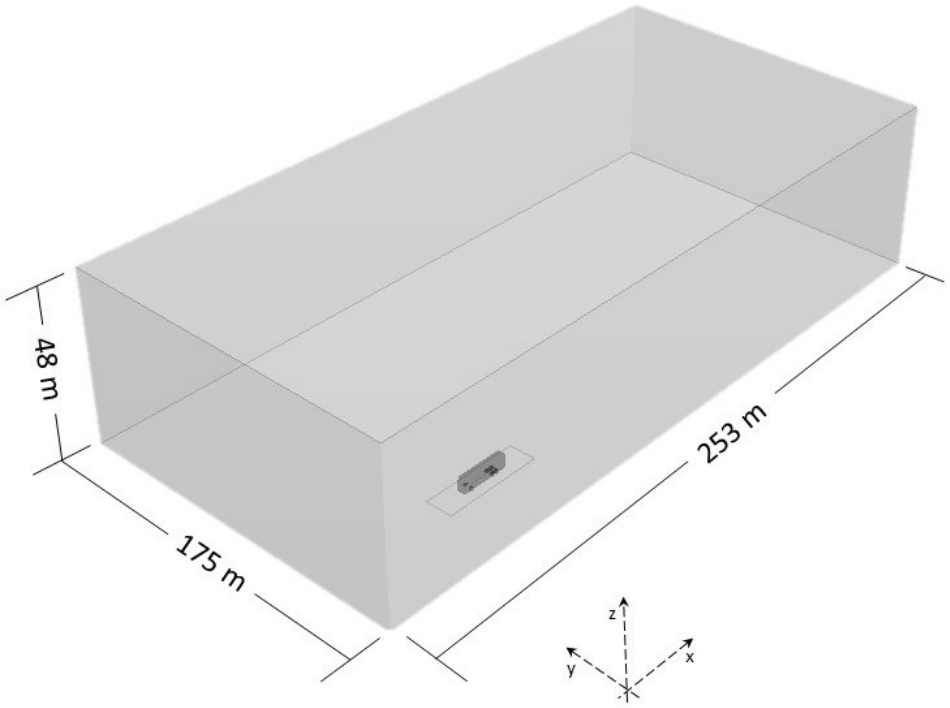
Till skillnad från verkliga förhållanden där bussen rör sig framåt på vägen och därav möter ett luftmotstånd, är simuleringarna förenklade till att kombinera luftmotstånd och vind till en resultant som verkar på bussen. En följd av denna förenkling är att det utan korrekta randvillkor kommer att bildas ett gränsskikt på marken framför bussen. Detta gränsskikt är alltså en orealistisk följd av förenklingen, men har eliminerats genom korrekta randvillkor (se kapitel 3.2.2).

Momentcentrum i samtliga simuleringar kommer att placeras på markplan direkt under bussens geometriska mittpunkt. Denna punkt är placerad enligt allmän konvention då ett fordon har flera bakaxlar.

I samtliga simuleringar har beräkningarna utförts i det kommersiella CFD-verktyget Star-CCM+.

3.2.1 Beräkningsvolym

Beräkningarna skedde i en rätblocksformad domän med inlopp från framsida samt den närmast liggande långsidan, se figur 3.6. Utloppet sattes på motstående långsida samt baksidan. Domänens dimensioner för simuleringarna togs fram genom att utgå från rekommendationer [8] vilket menar att domänen skall vara 15 gånger fordonets längd i x-led, 38 gånger fordonets bredd i y-led och sedan 12 gånger fordonets höjd i z-led. Därefter gjordes simuleringar på denna storlek där dimensionerna ökades inkrementellt tills gradienterna från bussens vak (eng: *wake*) inte nådde ytterdimensionerna på boxen. I figur 3.6 kan de slutgiltiga dimensionerna ses.



Figur 3.6: Beräkningsvolymens utformning samt det globala kordinatsystemets orientering.

3.2.2 Randvillkor

För att modellera verkliga förhållanden krävdes det randvillkor på samtliga ytor i CFD-modellen. Detta inkluderar samtliga sex sidor på beräkningsvolymen, vägavsnittet samt bussgeometrin.

3.2.2.1 Randvillkor på beräkningsvolymen

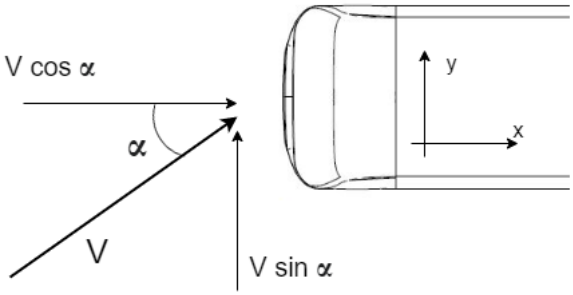
Beräkningsvolymen som kan ses i figur 3.6 ses som en vindtunnel med följande villkor på ränderna.

Inflöde
Flödet in i vindtunneln skedde genom de två närmaste sidorna på rätblocket. Två sidor valdes för att kunna generera en sidvind över både fronten och längs bussens sida. För att automatisera ett svep över de vinklar på vinden som önskades att mäta, parametriserades vindens komponenter till:

$$v \cdot (cos\,\alpha,\ sin\,\alpha,\ 0)\ \ [\mathrm{m/s}].$$

Med hänsyn till kapitel 2.2 bestämdes det att bortse från höga resulterande vinklar på vinden. Istället för att sätta mätpunkter på vinklar mellan $0° - 90°$ som tidigare

arbeten gjort, valdes intervallet $0° - 45°$. Detta intervall innehåller färre orealistiska scenarion, något som sparar beräkningstid.



Figur 3.7: Illustration av hur vinden kommer att variera runt bussen med vinkeln α ($0 < \alpha < 45°$).

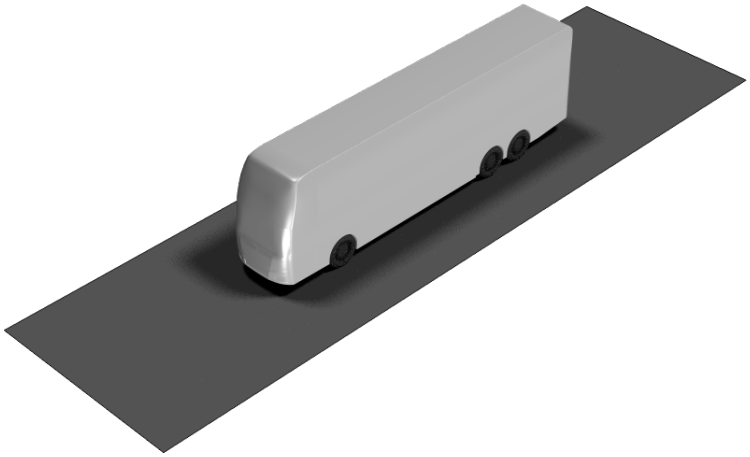
Utflöde
På liknande vis sattes beräkningsvolymens utflöden till att vara de två motstående sidorna. Villkoret på utflödet sattes till *Pressure Outlet*.

Bottenyta
Den stora bottenytan på beräkningsvolymen sattes till *Slip Wall*. Anledningen till detta var för att undvika att ett gränsskikt byggdes upp på ytan framför bussen.

Toppyta
Toppytan sattes till en symmetrirand, vilket eliminerade gradienter i dess normalriktning.

3.2.2.2 Randvillkor på vägavsnitt

Området precis under bussen med längd 27,5 m och bredd 7,5 m modellerades med *No Slip*. Vid de dynamiska simulationerna hade ytan en rörelse i positiv x-led på 27,78 [m/s]. Denna yta simulerar vägen omkring fordonet och tillåter uppbyggnad av ett gränsskikt från sidvinden likt verkligheten. Ytan kan ses i figur 3.8.



Figur 3.8: Vägavsnitt under buss. Ytan har längden 27,5 m och bredden 7,5 m.

3.2.2.3 Randvillkor på bussgeometrin

Bussens geometri delas upp i två grupper: den huvudsakliga kroppen samt dess hjul.

Busskropp
Ytans randvillkor sattes till *No Slip Wall*, vilket tillät uppbyggnad av ett gränsskikt längs med ytan vilket ger en inverkan av friktionskrafter från flödet på bussen.

Hjulen
Hjulen sattes till att rotera runt sin centralaxel med en vinkelhastighet som motsvarade bussens tangentiella hastighet. Med hjulradien r och hastigheten v känd gavs vinkelhastigheten ω:

$$\omega = \frac{v}{r} = 48{,}95 \ \ [\text{rad/s}].$$

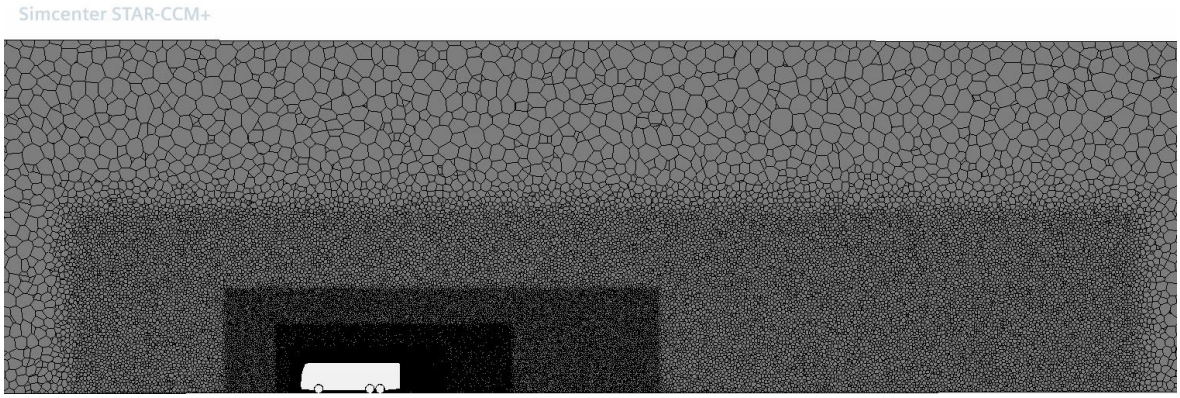
Vid den statiska simulationen sattes vinkelhastigheten till noll.

3.2.3 Lokal förfining av beräkningsnät

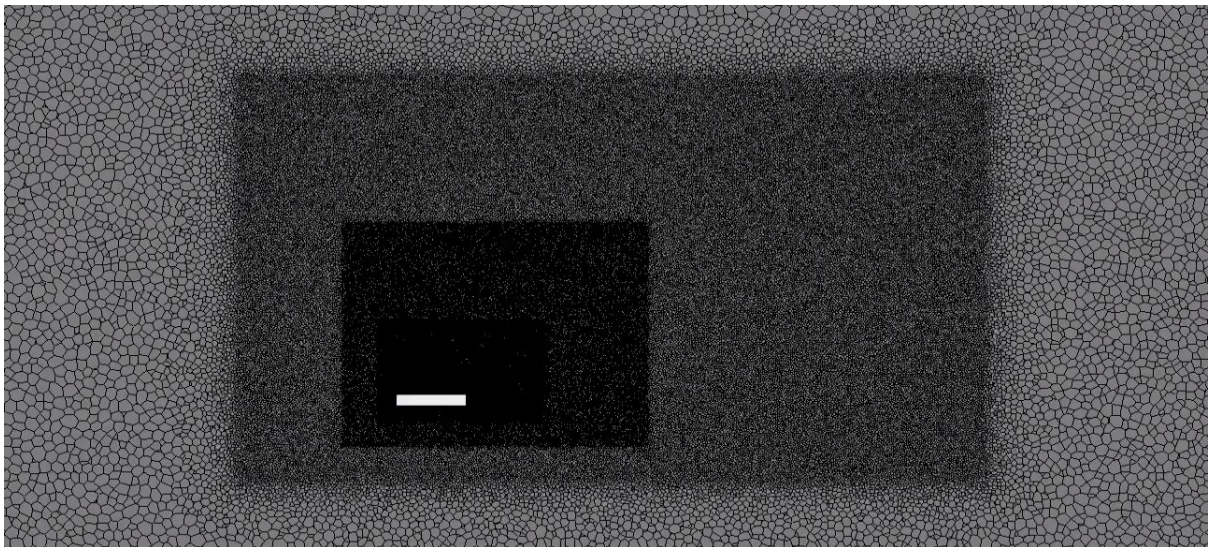
I områden där det förväntades finnas stora gradienter för lösningen krävdes ett finare beräkningsnät för att minska residualerna och nå konvergens. De största gradienterna förväntades vara närmast bakom bussen sett till vindriktningen, och fortsätta utåt. Därför användes fem olika förfinings-sektioner som på olika avstånd från bussen förfinar storleken på cellerna olika mycket. Närmast bussen sattes den finaste storleken, och ju längre från bussen cellen befinner sig desto grövre sattes dess storlek. Förfinings-sektionernas fysiska punkter kan ses i tabell 3.2 och övergripande bilder ses i figur 3.9 och 3.10.

Tabell 3.2: Med bussens yttre dimensioner som utgångspunkt syftar beteckningarna x+ och x- på avståndet i meter bakom respektive framför bussen i x-led. Samma princip gäller för beteckningarna y+, y-, z+ och z-.

Sektion	**x+**	**y+**	**z+**	**x-**	**y-**	**z-**
1	0.5 m	0.5 m	0.5 m	0.5 m	0.5 m	0 m
2	5 m	5.5 m	1.5 m	2.5 m	1 m	0 m
3	15 m	15 m	5 m	4.5 m	3 m	0 m
4	35 m	35 m	10 m	8 m	8 m	0 m
5	100 m	65 m	20 m	30 m	30 m	0 m



Figur 3.9: Genomskärning av dubbedäckarbussen i längsled vilket visar förfinings-sektionernas olika storlekar.



Figur 3.10: Genomskärning av dubbedäckarbussen sett från ovan vilket visar förfinings-sektionernas olika storlekar.

3.2.4 Generering av beräkningsnät

Den övergripande metoden som användes för att generera beräkningsnätet var *Parts-Based Meshing* (PBM). Därför skapades en *pipeline* med följande operationer:

Surface Wrap
För att skapa en ren geometri av bussen lades en *Surface Wrap* över dess yta.

Subtract
Eftersom det endast var luften omkring bussen som var av intresse subtraherades bussens interna volym från den totala beräkningsvolymen.

Bounded Shape
För att skapa förfinings-sektionerna användes operationen *Bounded Shape*. Som input till operationen sattes bussens geometri vilken användes som utgångspunkt för förfinings-sektionernas placering. Som kan ses i kapitel 3.2.3 sattes fem sektioner, varpå fem stycken *Bounded Shapes*-operationer krävdes. Resultatet blev fem *parts* som kunde användas som indata i följande steg.

Automated Mesh
Det sista steget i uppsättningen av beräkningsnätet innefattade en inledande generering av ett volymsnät. Nätet kommer sedan att behöva genomgå en konvergensstudie. *Automated Mesh* användes för att ställa in de generella inställningarna, som exempelvis *Base Size* vilket är utgångsstorleken för samtliga celler.

Förfinings-sektionerna implementerades i detta skede genom att addera flera *Volumetric Controls* i inställningarna. Varje förfinings-sektions korresponderande *part* användes som indata för respektive *Volumetric Control*. För att styra storleken på cellerna i sektionerna ändrades deras *Target Size* i förhållande till *Base Size* enligt tabell 3.3. Detta genererade i ett beräkningsnät med 33 miljoner celler.

Tabell 3.3: De olika sektionernas cellstorlek i förhållande till storleken på *Base Size*, angivet i procent.

Sektion	**Procent av Base Size**
1	100%
2	160%
3	320%
4	640%
5	1280%

3.2.5 Typ av beräkningsceller

Den generella typen av cell som användes i hela domänen sattes till att vara *Polyhedral cells*. Närmast bussens ytor användes flera lager av prismaceller för att fånga upp flödets gränsskikt. På grund av att en förfining av det viskösa underskiktet inte kommer att påverka det slutliga resultatet nämnvärt, dimensionerades det innersta prismalagret så att centrum hamnade på y^+ mellan 30 och 120. Detta innebar att en väggfunktion var tvungen att användas för att lösa upp det innersta området vid ytorna.

För att skapa en första utgångspunkt för dimensioneringen, som sedan var tvungen att itereras fram, användes ett idealfall av en plan platta vars längd motsvarar bussens. Beroende på Reynoldstalets storleksordning finns det olika väggfunktioner som bör användas. Reynoldstalet blev i detta fall:

$$Re = \frac{U \cdot L}{\nu} = 2{,}55 \cdot 10^7. \tag{3.1}$$

Då Reynoldstalet låg inom $10^7 < Re < 10^9$ användes Schlichting skin friction [22] vilket gav:

$$C_f = [2 \cdot log_{10}(Re) - 0{,}65]^{-2{,}3} = 0{,}00225 \tag{3.2}$$

$$\tau_w = C_f \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 = 1{,}0245 \ \text{[Pa]}. \tag{3.3}$$

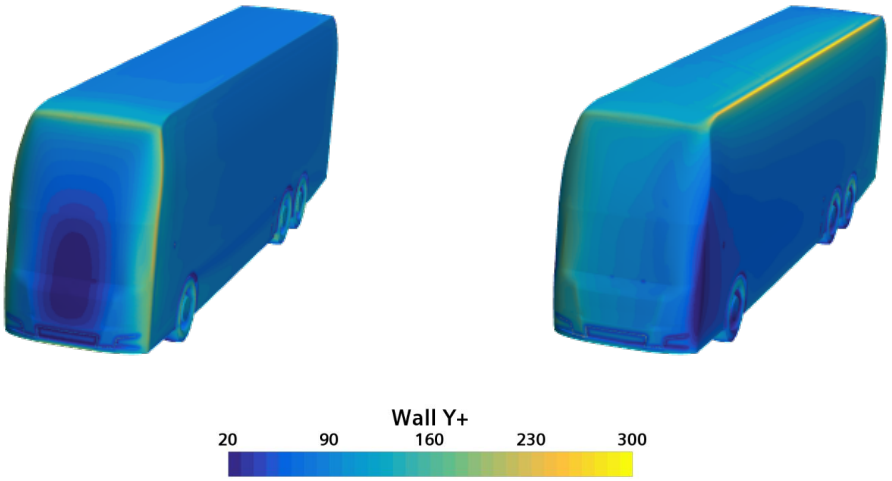
Med väggfunktionen definierad, bestämdes centrum på den första cellen enligt följande ekvationer [6].

$$u^\star = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = 0{,}9318 \ \text{[m/s]} \tag{3.4}$$

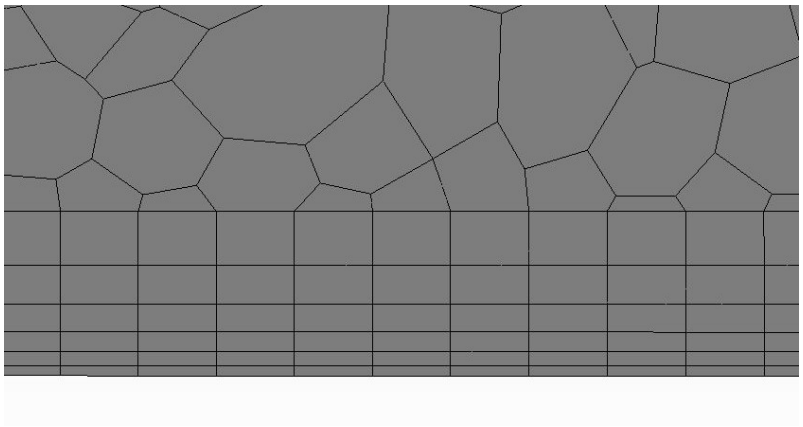
$$y = \frac{y^+ \cdot \nu}{u^\star} = 4{,}83 \cdot 10^{-4} \ \text{[m]}. \tag{3.5}$$

Centrum på första cellen bör i idealfallet ligga omkring 0,48 mm, vilket innebar en total celltjocklek på cirka 0,966 mm förutsatt att centrum hamnade vid $y^+ = 30$.

Den slutgiltiga tjockleken testades sedan fram i en iterativ process. För att kunna använda samma beräkningsnät vid olika vinklar mellan $0° - 45°$ genomfördes testet vid en girvinkel på 45°. Genomföringen av testet resulterade i en tjocklek för det första lagret till 2 mm vilket gav y^+ enligt figur 3.11. Prismalagren ökade sedan i tjocklek med en faktor på 1,4 för varje lager och där antalet lager sattes till 6. Även denna process gjordes iterativt då det yttersta prismalagret inte bör understiga halva tjockleken för den närmast liggande polyhederalcellen, detta resulterade i de prismalager som visas i figur 3.12.



Figur 3.11: y^+ vid girvinkel 0° till vänster och 45° grader till höger framtaget för beräkningsnätet med 33 miljoner celler.



Figur 3.12: Beräkningsnät vid övergången mellan prismalagren och den generella cellgeometrin.

3.2.6 Konvergens av beräkningsnät

När parametrarna för beräkningsnätet var bestämda genererades flera upplösningar av beräkningsnät med olika antal celler och där resultatet från beräkningarna sedan jämfördes. Följaktligen kunde det konstateras ifall lösningen konvergerade och inte var beroende av upplösningen på beräkningsnätet. Med den informationen kunde ett beräkningsnät väljas sådan att den ger en stabil lösning utan att använda mer än nödvändig beräkningskraft.

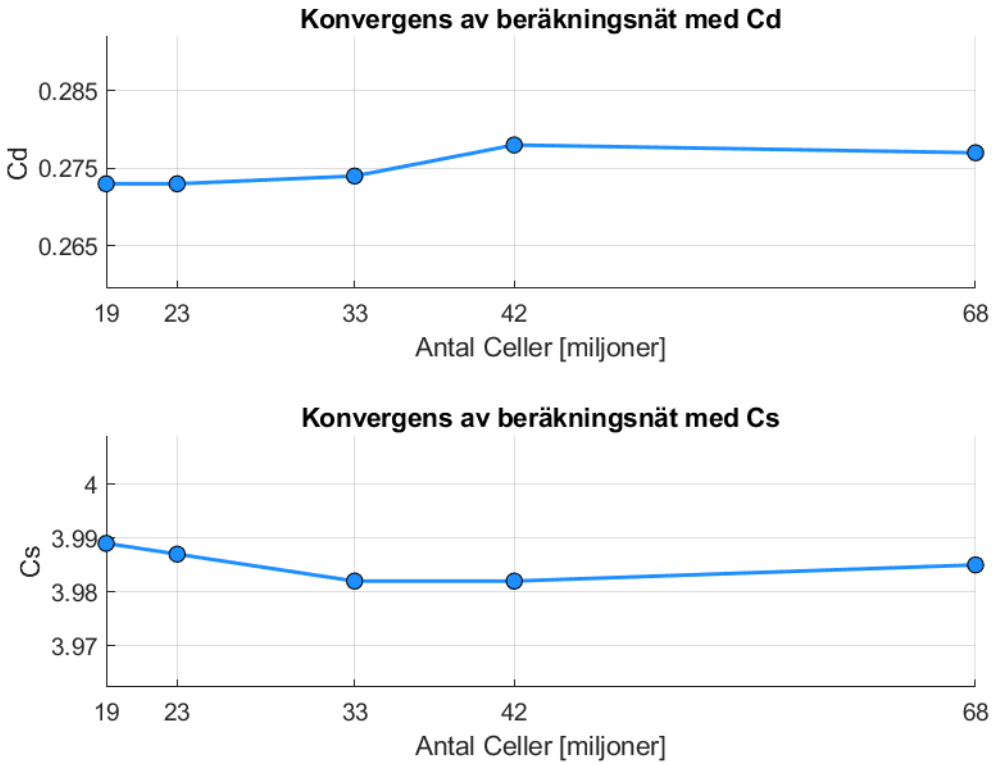
Antal celler justerades genom att ändra förfinings-sektionernas *Target Size*, vilket var angivet i procent av *Base Size*. Sektionernas *Target Size* ändrades genom att utgå från den storleken vilket enligt teorin skulle ge ett rimligt resultat och sedan skala dessa värden iterativt. Sektionen närmast bussen valdes att inte skalas utan att vara konstant över alla beräkningsnät, detta gjordes eftersom sektionens storlek var satt för att stämma överens med prismalagerens tjocklek.

Med grundinställningar genererades ett beräkningsnät med 33 miljoner celler. För att utföra testet gjordes fyra andra versioner med olika upplösningar enligt tabell 3.4.

Tabell 3.4: Cellantal i de beräkningsnät som testades.

Test	Antal celler
1	68 miljoner
2	42 miljoner
3	33 miljoner
4	23 miljoner
5	19 miljoner

För varje beräkningsnät genomfördes en simulering med vindriktning 45°. I figur 3.13 visas resultatet för koefficienterna C_d och C_s vilka är av störst intresse och därför används till att avgöra lösningens konvergens.



Figur 3.13: Resultatet av studien för att finna storleken på det beräkningsnät för vilka mätresultaten C_d samt C_s konvergerade.

Från resultatet av studien kan det observeras att varken C_d eller C_s varierade nämvärt i sina värden mellan de olika testerna. För de kommande simuleringarna valdes därför det beräkningsnät som genererade 33 miljoner celler.

3.2.7 Val av modeller i CFD

För att utföra beräkningarna specificerades valda modeller enligt tabell 3.5 utifrån vilket typ av flöde som betraktades samt vilka förenklingar som kunde antas gälla.

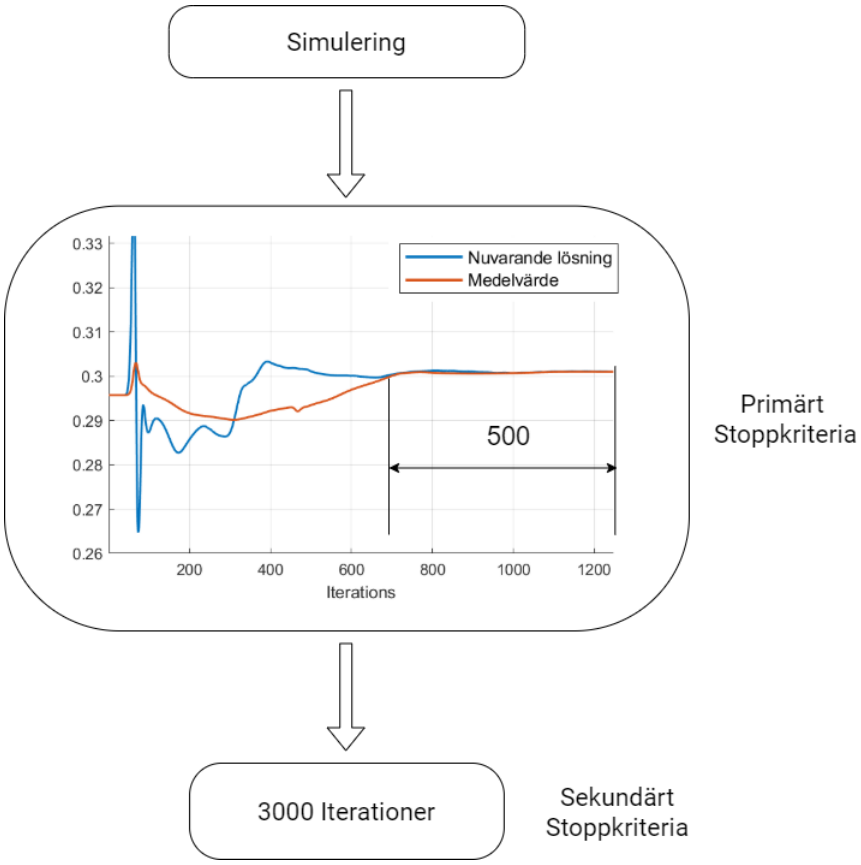
Tabell 3.5: Valda modeller för simuleringarna.

Egenskap	**Vald modell**
Space	Three Dimensional
Material	Gas (Air)
Flow	Coupled Flow
Equation of State	Constant Density
Time	Steady
Viscous Regime	Turbulent
Reynolds-Averaged Turbulence	K-Epsilon Turbulence

Luften antogs ha konstant densitet. Detta antagandet kunde göras då flödets hastighet inte översteg $0,3\,\mathrm{Ma}$, samt att temperaturen antogs vara konstant. Något som gjorde att skillnaden i densitet kunde försummas [6]. *Coupled flow* användes som lösningsmetod, vilket kräver mer beräkningskraft per iteration men konvergerar normalt tidigare jämfört med *segregated flow*. Som turbulensmodell användes *Realizable* $k-\epsilon$ vilket är vanligt förekommande och är en robust metod som fungerar bra vid flöde runt en relativt enkel geometri.

3.2.8 Stoppkriterier

För att avgöra när en simulation har konvergerat och en lösning är nådd användes ett specifikt stopkriterium, se figur 3.14. Istället för att studera residualerna, som kan ha svårt att nå stabilitet och tillräckligt små värden i komplexa simuleringar, användes parametrarna C_d och C_s som grund för konvergensen. Då även dessa parameter kan fluktuera kraftigt studerades parametrarnas medelvärde för att kunna jämna ut variationerna. Medelvärdet baserades på de 400 senaste iterationerna, och tilläts inte ändras mer än 0,002 under en period på 500 iterationer för att uppnå konvergens. Om inte detta kriterium kunde uppnås sattes ett sekundärt stopkriterium som avbröt simulationen efter 3000 iterationer.



Figur 3.14: En simulering kunde avslutas på två vis. Antingen om medelvärdet av parametrarna (orange linje) ändrades mindre än 0,002 under en period på 500 iterationer. Eller att simuleringen nådde 3000 iterationer.

3.3 Vindtunnel

I följande underkapitel kommer metoden bakom förberedelsen och genomförandet i vindtunneln att presenteras. Kommande underrubriker täcker ett resonemang kring dynamisk likhet i detta projekt, följt av hur förberedelserna genomfördes för modellen i vindtunneln. Tills sist beskrivs de steg och test som genomfördes i vindtunneln i kronologisk ordning.

3.3.1 Dynamisk likhet i vindtunneln

I detta projekt kunde dynamisk likhet inte uppnås även då strömningen alltid var inkompressibel och fluiden var luft. Den stora anledningen till att dynamisk likhet inte kunde nås var att modellen var nerskalad för mycket. Modellen som var i skala 1:18 ställde följande krav på Reynoldstalet:

$$Re_{verklig} = \frac{L\, v_{verklig}}{\nu_{verklig}} = \frac{L\, v_{modell}}{18\, \nu_{modell}} = Re_{modell} \tag{3.6}$$

där L är en karaktäristisk längd, v är flödets hastighet och ν är den kinematiska viskositeten. Fluiden i vindtunneln var luft vid samma temperatur som i verkliga förhållanden, vilket leder till $\nu_{verklig} = \nu_{modell}$ och ekvation 3.6 kan, efter förkortning av L, skrivas som:

$$v_{modell} = 18\, v_{verklig}. \tag{3.7}$$

För dynamisk och kinematisk likhet krävs alltså en hastighet som är 18 gånger högre i vindtunneln än för verkliga fallet. Med $v_{verklig} = 100\,\mathrm{km/h}$ fås $v_{modell} = 1800\,\mathrm{km/h}$. Denna hastighet överstiger klart den maximala hastighet som kan fås i vindtunneln, vilket är $227\,\mathrm{km/h}$.
Även om vindtunneln inte hade en maximal hastighet skulle flödet dessutom inte längre vara inkompressibelt ty:

$$1800\,\mathrm{km/h} \approx 1{,}5\,\mathrm{Ma} \gg 0{,}3\,\mathrm{Ma}. \tag{3.8}$$

Vilket innebär att flera oönskade strömningsfenomen kommer att uppkomma och som inte längre efterliknar det fallet som modellen söks efterlikna [6].

3.3.2 Utförande i vindtunneln

I följande del beskrivs genomförandet av testerna i vindtunneln. Först beskrivs förberedelserna med montering av modellen i vindtunneln. Därefter presenteras genomförandet av mätningarna, Reynoldssvep, rubusthetsmätningar samt visualisering av testerna.

3.3.2.1 Montering

Vindtunneltesterna började med montering av bussmodellen på vågen. På vågen, som mäter krafter och moment, monterades först en adapter vilket är en platta med fyra stavar på. Stavarna sticker upp ovanför vindtunnelns golv och fästes i fyra av hjulen på bussen. Tillsammans med stoppskruvar i sidan av hjulen spändes bussen fast i stavarna, vilket hindrade bussen från att flyga loss vid höga vindhastigheter. Vågen kunde roteras runt z-axel och möjliggjorde därmed att bussens vinkeln relativt vindriktningen kunde ändras.

För att få korrekta resultat var det viktigt att de krafter som vågen mätte endast uppkom av det luftflöde som påverkade bussmodellen. Det är därför nödvändigt att stavarna, som bussen monterades på, inte vidrörde underlaget under bussen. Vågen justerades till sist i höjdled så att bussen kom så nära skivan som möjligt, men utan att komma i direkt kontakt. Figur 3.15 visar bussen då hjulen är fastskruvade i stavarna, men innan vågen är justerad i höjdled.

Utgångsvinkeln specificerades genom att bussen vreds marginellt runt 0° med vind blåsandes på den. Läget för 0° i vindtunneltesterna sattes där de minsta sidkrafterna uppmättes.

Slutligen tejpades skarvarna mellan de olika modulerna på bussen för att få ett ostört flöde, samt för att vinden inte skulle kunna flöda direkt igenom modulerna (se figur 3.16).

Vid testerna på den vanliga bussen monterades modellen på samma sätt som beskrivits ovan.



Figur 3.15: Modell av dubbeldäckare monterad i vindtunnel.



Figur 3.16: Monterad bussmodell med tejpade skarvar.

3.3.2.2 Reynoldssvep

Eftersom dynamisk likhet inte var möjligt att uppnå var det av vikt att bestämma vilken vindhastighet som skulle användas för testerna. Detta gjordes genom två Reynoldssvep, ett vid vinkeln 0° samt ett vid 45°.

En övre gräns på tillåten vindhastighet sattes av de maximala värdena på moment och kraft som vågen kunde hantera. Dessa var 60 Nm och 300 N. Vilken hastighet detta motsvarade beräknades genom att ta indata i form av C_d, längd på momentarmen och den projicerade arean på dubbeldäckaren. C_d approximerades genom att ta C_d för ett rätblock (1,05) [6], och momentarmen bestämdes av riggen vid vilken modellen monterades, $l = 0{,}1$ m. Sidarean av dubbeldäckarmodellen baserat på figur 3.2 blir:

$$A_{sid} = \left(\frac{4{,}25}{18}\right) \cdot \left(\frac{13{,}8}{18}\right) \approx 0{,}181\,[\mathrm{m}^2]. \tag{3.9}$$

För att sedan beräkna den maximala vindstyrkan användes följande formel [6]:

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2 \cdot F_{max}}{C_d \cdot A_{sid} \cdot \rho}} \tag{3.10}$$

$$M = F \cdot l. \tag{3.11}$$

Enligt ekvation 3.11 kommer F_{max} vara begränsande då:

$$M = F_{max} \cdot l = 300 \cdot 0{,}1 = 30 < M_{max}. \tag{3.12}$$

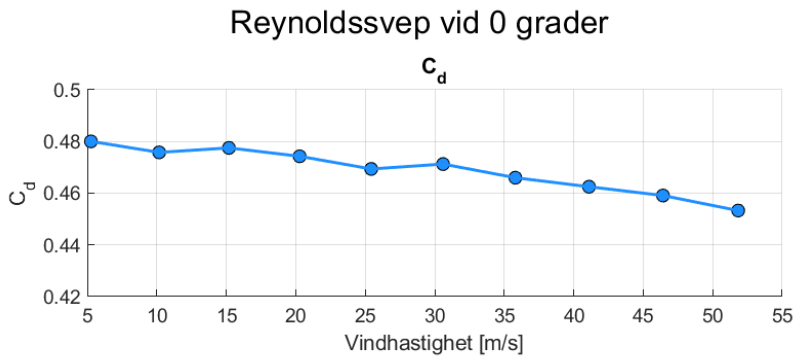
Med indatan i ekvation (3.10) får vi:

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2 \cdot 300}{1{,}05 \cdot 0{,}181 \cdot 1{,}25}} = 50{,}26\ [\mathrm{m/s}]. \tag{3.13}$$

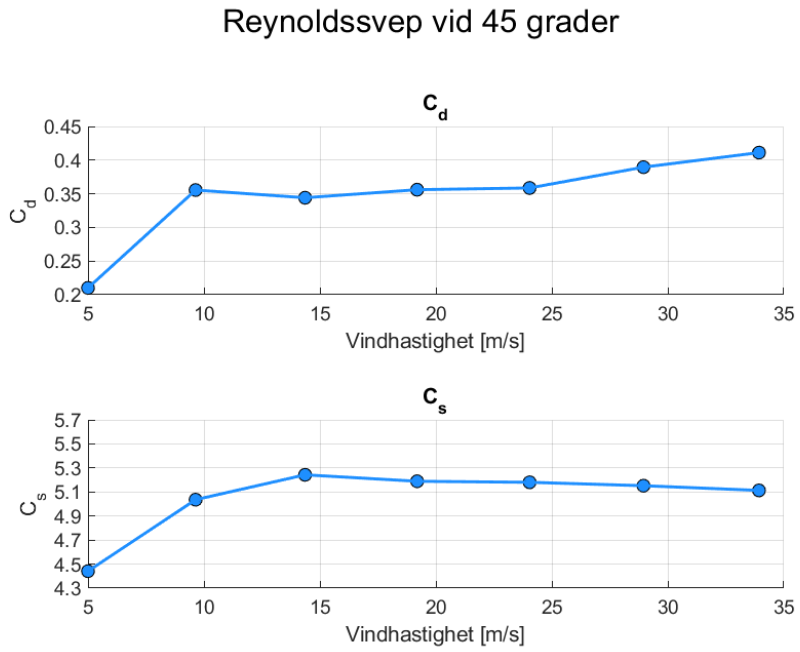
Den maximala vindhastigheten för dubbeldäckarmodellen är alltså approximativt 50,26 m/s.

I det faktiska testet genomfördes två svep vid två olika girvinklar, 0° samt 45°, som kan ses i figur 3.17 respektive 3.18. Under svepet där girvinkeln sattes till 0° kunde vindhastigheten i vindtunneln relativt säkert ökas upp till 50 m/s. I detta svepet kunde C_s bortses ifrån eftersom sidkrafterna förväntades gå mot noll vid luftströmmning rakt framifrån, något som sedan också kunde konstateras.

När svepet genomfördes med en girvinkel på 45° ökades hastigheten endast upp till 30 m/s för att inte riskera att modellen skulle gå sönder. I detta testet jämfördes både C_d och C_s.



Figur 3.17: Reynoldssvep vid 0° gir-vinkel. Grafen visar hur kraftkoefficienten C_d varierar vid olika vindhastigheter från 5 m/s till drygt 50 m/s.



Figur 3.18: Reynoldssvep vid 45° girvinkel. Graferna visar hur kraftkoefficienterna C_d och C_s varierar vid olika vindhastigheter från 5 m/s till dryga 30 m/s.

Som kan ses har både C_d och C_s perioder där de är relativt oberoende av vindhastigheten. Vid hastigheter mellan $25\,\mathrm{m/s} - 30\,\mathrm{m/s}$ fås den minsta variationen med hänsyn till samtliga grafer. Hastigheten i vindtunneln sattes, med hänsyn till detta, till $30\,\mathrm{m/s}$.

Vid vindtunneltesterna med den vanliga bussen användes samma hastighet på vinden som för dubbeldäckaren.

3.3.2.3 Mätserie

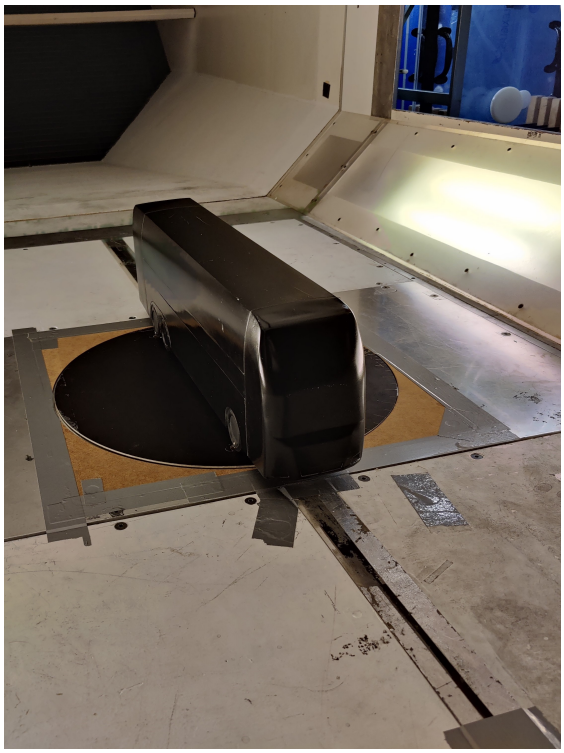
Mätningarna gjordes för vinklar mellan $0° - 45°$. Mellan $0° - 20°$ gjordes mätningarna med 2°-steg. Från $20° - 35°$ var stegen 5°. Till sist gjordes steg om 2,5° upp till 45°. För att öka resultatets tillförlitlighet utfördes två mätningar för varje vinkel. Detta gjordes genom att först svepa över $0° - 45°$ följt av ett svep åt andra hållet, $45° - 0°$, där mätutrustning och fläktar nollställdes mellan de båda svepen. Nedan beskrivs mätprocessen för hur ett svep utfördes:

1. Säkerställ att vindhastigheten är noll och nollställ sedan mätutrustning.
2. Sätt vindhastigheten till 30 m/s.
3. Rotera bussen till den önskade vinkeln samt kontrollera att stavarna ej vidrör plattan.
4. Spara mätningen då de angivna mätvärdena har stabiliserat sig.
5. Upprepa 3 och 4 för alla vinklar i svepet.

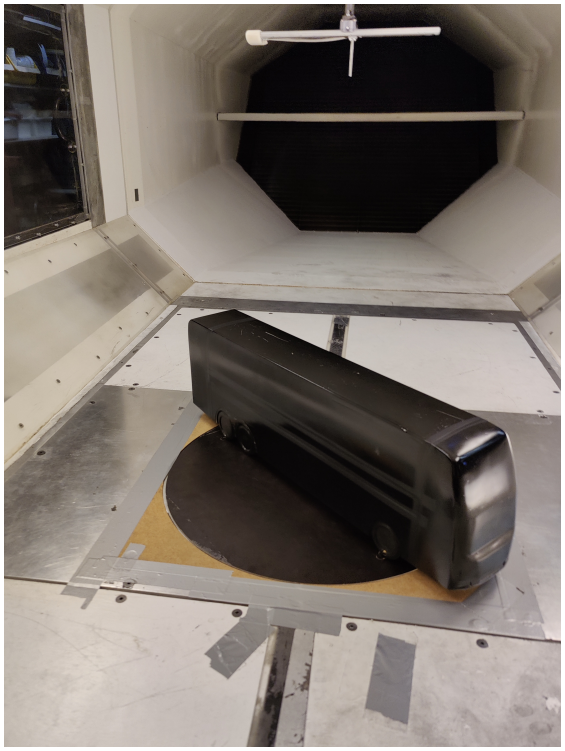
Samma tillvägagångssätt användes vid mätningarna på den vanliga bussen. Figur 3.19 visar hur bussen var placerad i vindtunneln för både girvinkel på 0° samt 45°.

De uppmätta krafterna och momenten omvandlades sedan till dimensionslösa koefficienter enligt kapitel 2.3. Till skillnad från CFD mättes momenten i vindtunneln kring den punkt som ligger mitt emellan den främre hjulaxeln och bakre bakhjulsaxeln, samt 160 mm under markytan. Detta momentcentrum kunde inte ändras eftersom den byggde på placeringen av mätutrustningen. Följden av detta är att momentcentrum i vindtunneln, utöver att vara placerad under marken, även är något förskjuten i längsled jämfört med simuleringarna.

De uppmätta krafterna och momenten för alla mätningar kan ses i appendix A.



(a) Girvinkel 0°, vindflöde rakt framifrån i förhållande till bussen.



(b) Girvinkel 45°, vindflöde snett från sidan i förhållande till bussen.

Figur 3.19: Bussen vriden till 0° och 45° i vindtunneln.

3.3.2.4 Visualisering av flödet

För att visualisera flödet användes korta längder av garn som visade hur flödet var riktat på ytan av bussen. Med garnet gick det lätt att se om flödet hade separerat då garnet slutade ligga längs med flödet och istället virvlade runt. Se figur 3.20.



Figur 3.20: Bild på bitarna av garn som användes för att visualisera flödet.

3.3.2.5 Mätning av robusthet

Det fanns ett flertal felkällor i vindtunneln som påverkade mätresultaten och därmed tillförlitligheten på mätningarna. Variationerna kunde bero på mätutrustningen, marginella skillnader i vindhastighet eller vinkel.

För att få en uppfattning om hur stora felmarginaler som kunde förväntas i resultatet, gjordes en undersökning gällande mätmetodens robusthet. Tre vinklar valdes vid vilka testen skulle genomföras. Ett vid 0°, ett vid 22,5° och ett vid 45°. Dessa vinklar valdes för att både få med extremfallen samt en mätningar däremellan. Vid varje vinkel gjordes fem mätningar, där testen genomfördes genom att inför varje ny mätning sätta vindhastigheten till 0 m/s, nollställa vågen samt ställa om vinkeln. Detta försäkrade i så hög grad som möjligt att försöken var oberoende av varandra.

3.3.2.6 Korrigering för blockeringseffekt

På grund av den blockeringseffekt som fås i vindtunneln måste samtliga koefficienter korrigeras något. Blockeringen, som beror på kvoten mellan den projicerade arean på modellen A_{proj} samt tvärsnittsarean på vindtunneln S, ger följande förhållande för korrigeringen [23]:

$$C = C_m \left(1 - \frac{A_{proj}}{S}\right)^{1,288}. \tag{3.14}$$

Där C_m är det uppmätta, och uträknade värdet på en godtycklig koefficient, och där Chalmers vindtunnel har de givna dimensionerna $1{,}25 \times 1{,}8 \times 3{,}0$ $[m]$.

Faktorn $\left(1 - \frac{A_{proj}}{S}\right)^{1,288}$ kommer i vindtunneln att variera då bussen roterar. Vid 0° kommer A_{proj} att vara frontarean, men då bussen roteras kommer den projicerade arean att öka då sidoarean får ett ökande bidrag. För att ta fram hur den projicerade arean förändras beroende på vinkeln, användes ett verktyg i Star-CCM+ som beräknar just detta, vid varje vinkel.

3.3.2.7 Korrigering av moment

Eftersom momenten mäts kring olika punkter i CFD-beräkningarna och vindtunneln måste det göras en korrigering för att resultaten ska gå att jämföra med varandra. Den stora skillnaden mellan momentpunkternas placering är att den i vindtunneln är placerad 160 mm under markplan medan den i CFD ligger precis i markhöjd.

För att beräkna det nya korrigerade momentet subtraherades ett bidrag från den kraft som hade störst inverkan på momentet, multiplicerat med förlängningen av hävarmen. Förflyttningen av momentcentrum i z-led innebär endast en förkortad

hävarm för krafter vinkelrätt mot z-axeln. Detta betyder att endast roll- och tipp-momenten modifieras medan gir-momentet förblir samma.

Uppdateringen av roll- och tipp-momenten gjordes enligt följande formler:

$$M_x = M_{x,\text{uppmätt}} - F_s \cdot 0{,}160 \tag{3.15}$$

$$M_y = M_{y,\text{uppmätt}} - F_d \cdot 0{,}160 \tag{3.16}$$

Skillnaden mellan vågens momentcentrum och bussmodellens geometriska mittpunkt i x-led är 5,3mm. Då det inte var känt i vilken position de resulterade krafterna på bussen verkar i måste en uppskattning göras om hävarmen blev längre eller kortare för momenten vid olika vinklar. Detta skulle leda till en osäkerhet hos resultatet och eftersom skillnaden var liten beslutades det därför att inte förflytta momenten i x-led.

4

Resultat

Följande kapitel kommer att redovisa de resultat som projektet mynnat ut i, samt en diskussion kring vad resultatet visar. Resultaten inkluderar både simuleringar med CFD och vindtunneltester vilka ofta kommer att presenteras tillsammans eftersom samma mätningar gjorts i båda fallen. Därefter kommer den robusthetsanalys som genomfördes för vindtunneln att presenteras. Detta kan ge en uppfattning i hur stora felmarginaler som är rimliga från dessa test. Slutligen presenteras de uppmätta krafterna och momenten på den vanliga landsvägsbussen i vindtunneln. Dessa presenteras i jämförelse med resultaten från mätningarna på dubbeldäckaren i vindtunneln. Mätdata från vindtunneltesterna samt simuleringsdatan från simuleringarna kan ses i sin helhet i appendix A och appendix B.

4.1 Resultat på dubbeldäckaren

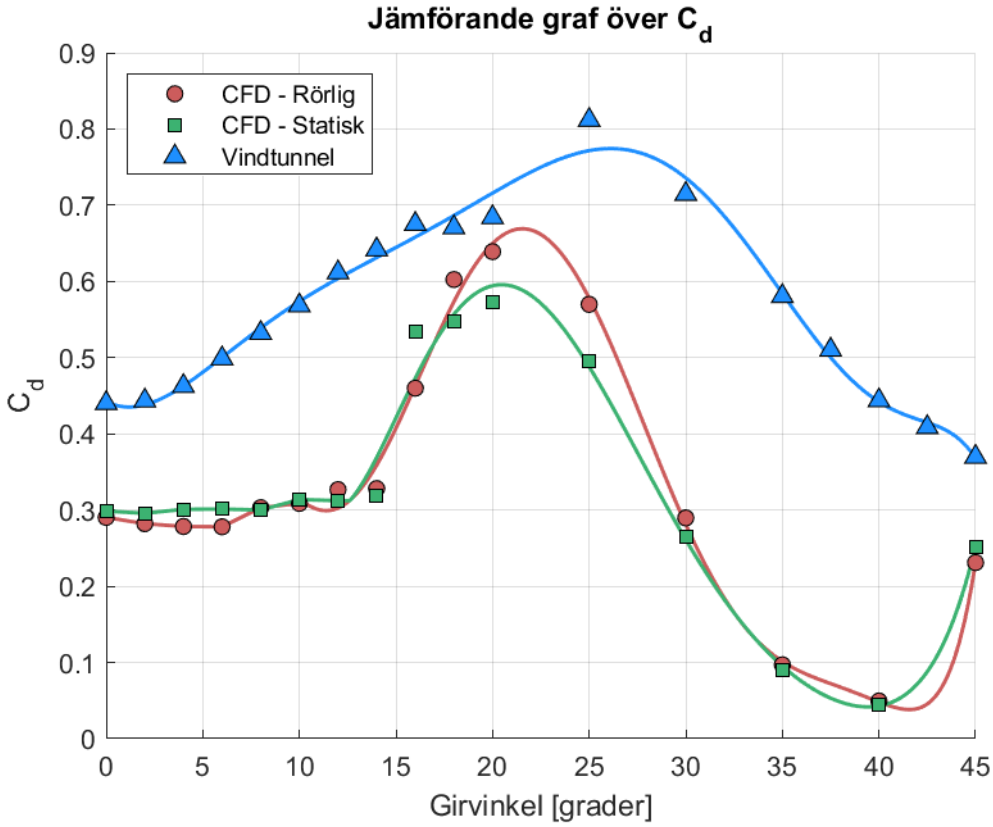
För att presentera resultatet på dubbeldäckaren kommer följande underkapitel att vara indelat i flera sektioner som berör varje kraft- eller momentkoefficient separat. Varje del innefattar en jämförande visualisering från de mätresultat som tagits fram i både simuleringar och vindtunneln. Visualiseringarna innehåller mätpunkterna, representerade av punkter, men även polynomanpassade kurvor som approximerar mätdatan till en funktion. Notera att mätpunkterna från vindtunneln är medelvärdet från flera upprepade mätserier, där även grovt avvikande värden manuellt har plockats bort. Tillsammans med mätresultaten kommer analyser och diskussioner ske för att förklara de trender som uppmätts.

4.1.1 C_d - Luftmotstånd

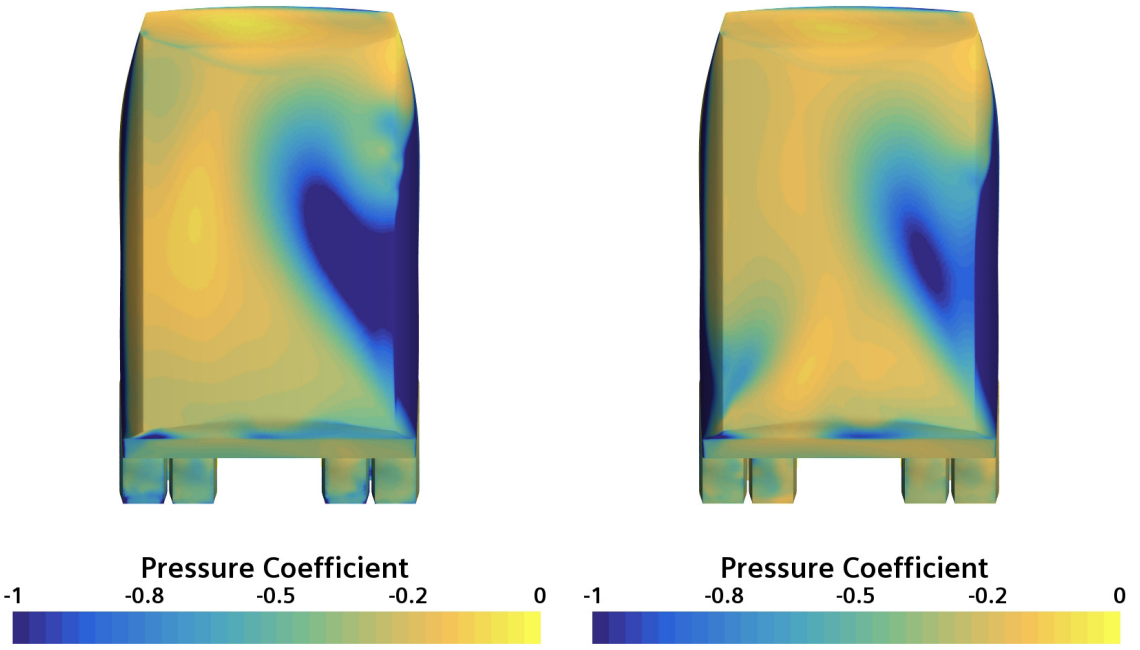
C_d visualiseras i figur 4.1 där både klara skillnader, samt liknande trender uppvisas. Stora likheter hittas primärt i de båda simuleringarna, där en mindre skillnad är att den starka ökningen vid 15° är något större för simuleringen med rörlig mark. Detta resulterar därför också i att det maximala värdet på C_d blir större. Anledningen till detta skulle kunna vara att en större vak, med lägre tryck, bildas på bussens baksida vid dynamisk simulering. Detta kan ses i figur 4.2 där tryckkoefficienten på bussens baksida kan ses för statiska och dynamiska simuleringen vid 20°. Om storleken på

vaken främst kommer från det rörliga underlaget eller de roterande hjulen är dock svårt att säga.

Grafen för C_d för vindtunneltesterna skiljer sig en del från simuleringarna. För det första är C_d alltid större för resultatet från vindtunneln, även vid 0°. Ökningen av C_d sker också mer gradvis jämfört med CFD. Den sista ökningen av C_d vid 45° som syns vid CFD-simuleringarna uteblir dessutom för vindtunneltesterna.



Figur 4.1: Graf över hur luftmotståndskoefficienten, C_d, varierar som funktion av girvinkeln. Blå kurva visar resultatet för C_d från vindtunneltesterna. Grön kurva visar resultatet från CFD-simuleringen med statisk mark och stillastående hjul. Röd kurva visar resultatet från CFD-simuleringen med rörlig mark och roterande hjul.



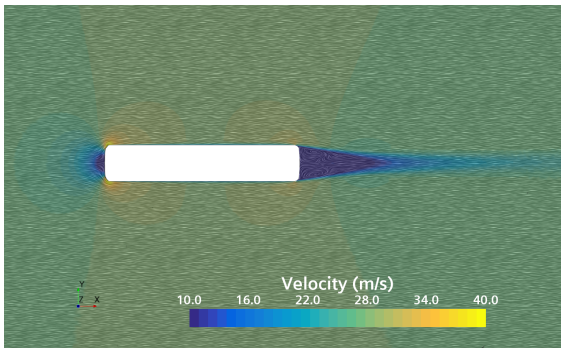
(a) Tryckkoefficient på bussens baksida från simulering med rörligt underlag och roterande hjul, 20° girvinkel.

(b) Tryckkoefficient på bussens baksida för simulering med stillastående underlag och hjul, 20° girvinkel.

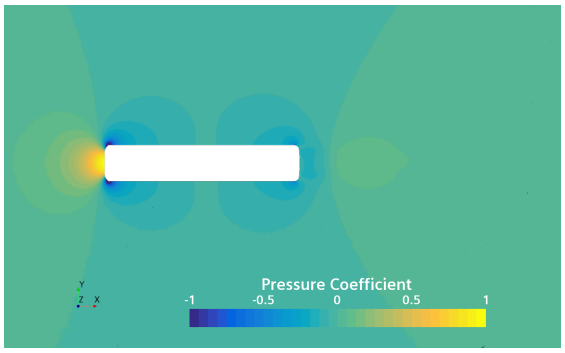
Figur 4.2: Tryckkoefficienterna på bussens baksida, för dynamisk samt statisk simulering. Detta är för 20° girvinkel. Notera den större regionen med lägre tryck för simuleringen med rörligt underlag.

En anledning till att C_d ökar för vinklar upp till 20° är att trycket på bussens baksida sjunker. Detta kan ses i figur 4.3 där trycket runt bussen för 0°, 16°, 20° och 45° visas. Ett undertryck bakom bussen leder till att motståndet i bussens färdriktning ökar.

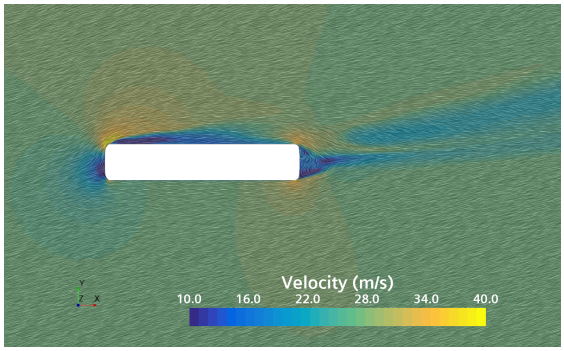
Minskningen i C_d efter maximumvärdet kommer troligtvis från att vinden angriper bussen mer från sidan. Att trycket på bussens baksida ökar igen kan ses i figur 4.3h. Som vi kan se i figur 4.1 sjunker C_d till under värdet för C_d vid 0°. Detta sker både för simuleringarna och vindtunneln. I CFD fås C_d nära 0 vid 40°.



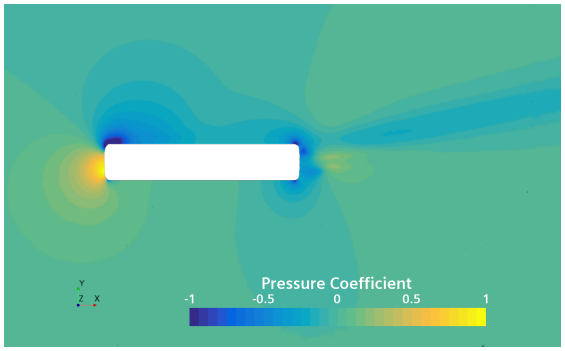
(a) Hastighetsfält vid 0°.



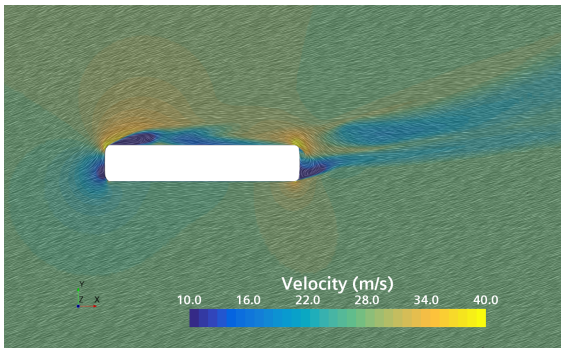
(b) Tryckkoefficient vid 0°.



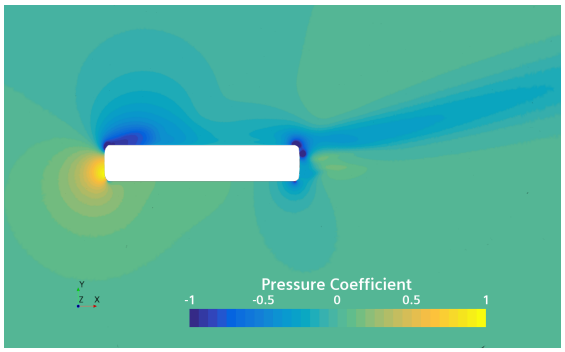
(c) Hastighetsfält vid 16°.



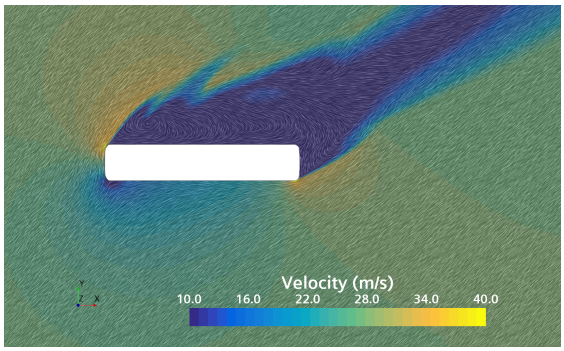
(d) Tryckkoefficient vid 16°.



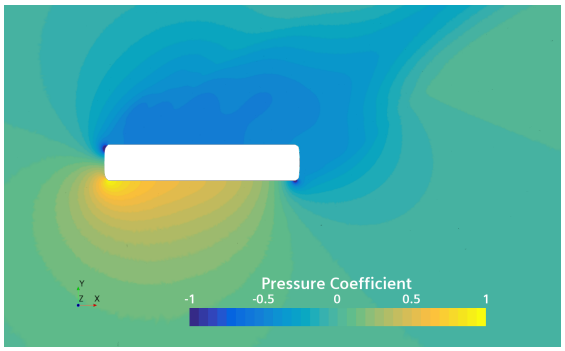
(e) Hastighetsfält vid 20°.



(f) Tryckkoefficient vid 20°.



(g) Hastighetsfält vid 45°.

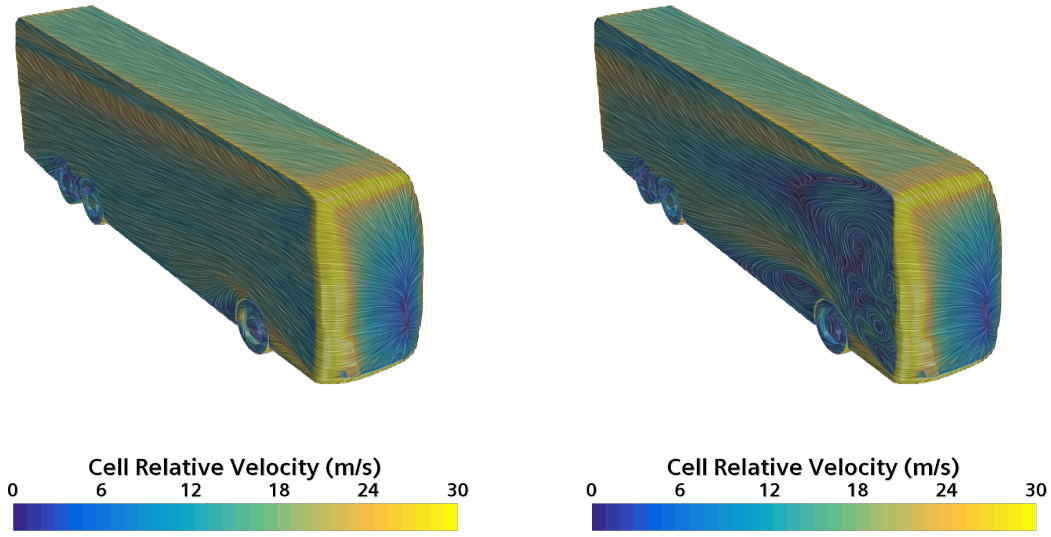


(h) Tryckkoefficient vid 45°.

Figur 4.3: Hastighetsfält och tryckkoefficient två meter över markplan från simuleringen med stillastående underlag för vinklarna 0°, 16°, 20°och 45°.

Anledningen till att C_d ökar så abrupt i CFD vid ungefär 16° är att det sker en separation långt fram på bussen. Detta ses tydligt i figur 4.4 där flödet jämförs mellan 14° och 16° girvinkel. För 16° vinkel visar linjerna att flödet längs med ytan är turbulent mot fronten, till skillnad mot vid 14° där samma område har ett kontinuerligt flöde. Att detta sker mer gradvist för den fysiska modellen i vindtunneln (se figur 4.5) skulle möjligtvis kunna bero på att separationen uppstår tidigare och sker något mer successivt i vindtunneln jämfört med i simuleringarna.

I vindtunneln separerar flödet runt fronten redan vid 0° och återansluter sedan direkt, se figur 4.5a. Vid en girvinkel på 4°, figur 4.5b återansluter flödet vid den främre hjulaxeln. Med ökande girvinkel återansluter flödet allt längre bak. Vid en girvinkel på 14°, i figur 4.5c, indikerar garnbitarna på att flödet längs sidan av bussen separerar vid fronten för att sedan återansluta mellan hjulaxlarna. Med 16° girvinkel i figur 4.5d återansluter flödet fortfarande men nu kring den bakre hjulaxeln.



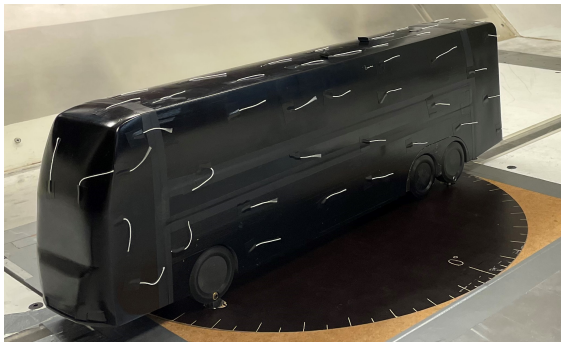
(a) Hastighetsfält vid 14° längs med bussens yta.

(b) Hastighetsfält vid 16° längs med bussens yta.

Figur 4.4: Visualisering av flöde längs bussyta med hastighetsfält för 14° samt 16° girvinkel. Notera att flödet har separerat vid den främre delen av bussens sida vid 16°.



(a) Garnbitar vid girvinkel 0°.



(b) Garnbitar vid girvinkel 4°.



(c) Garnbitar vid girvinkel 14°.

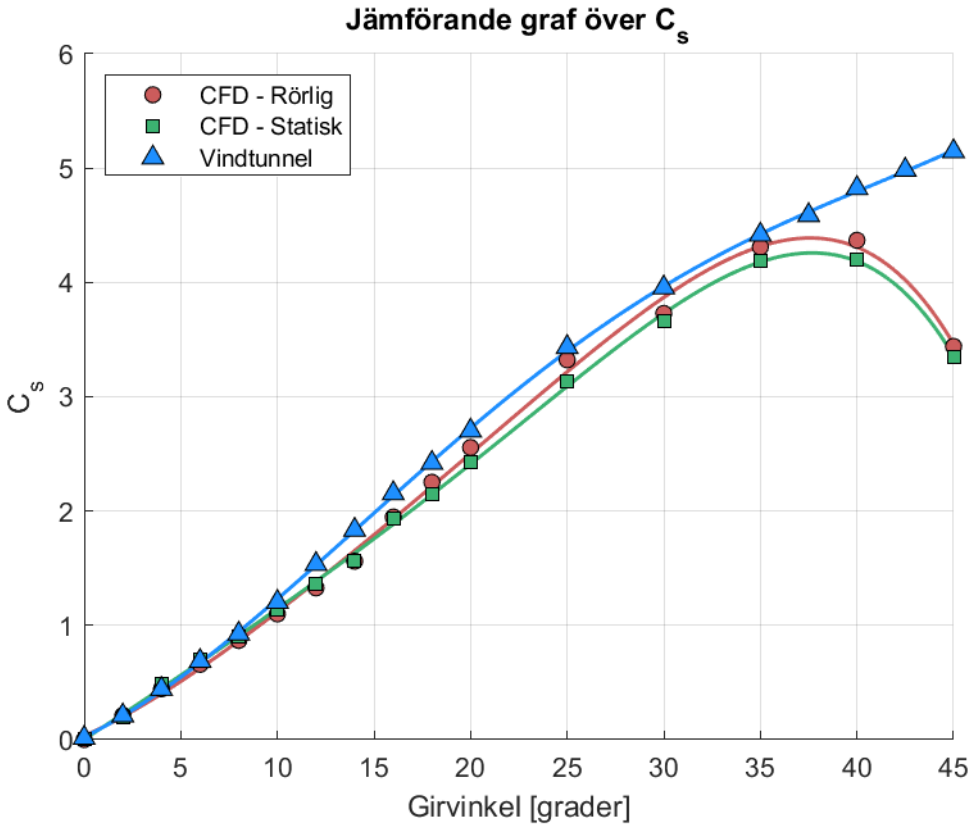


(d) Garnbitar vid girvinkel 16°.

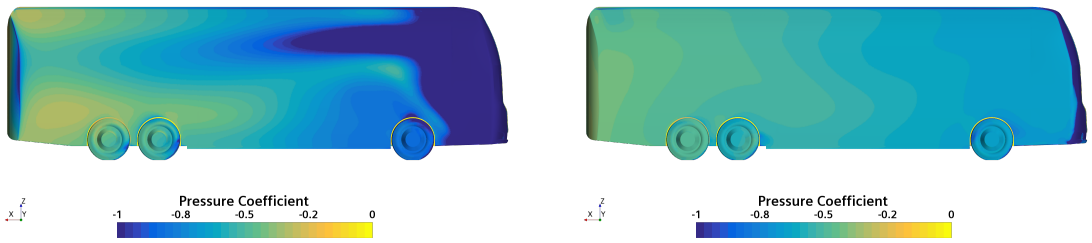
Figur 4.5: Visualisering av flödet längs modellens yta med hjälp av garnbitar. Notera att flödet har separerat längst fram på bussens sida, redan vid 0°. Detta syns på att garnbitarna inte pekar bakåt i bussens ”färdriktning”.

4.1.2 C_s - Sidkraft

Sidkrafterna på bussen är ett av arbetets viktigaste resultat. Som ses i figur 4.6 ökar C_s nästan linjärt med ökad girvinkel. CFD och vindtunnelns resultat överensstämmer relativt väl, förutom att C_s minskar vid 45° i resultatet från CFD. Vindtunnelns resultat visar inte på någon sådan minskning. En anledning till minskningen i CFD kan ses i figur 4.7, där det kan observeras att trycket på bussens läsida ökar igen för 45° jämfört med 40°. Anledningen till minskningen i CFD beror på att flödet återansluter vid 40° vilket ger ett flöde med hög hastighet och lågt tryck längs bussens läsida. Vid 45° sker en stor separation vilket leder till en lägre hastighet och högre tryck för flödet längs bussen.



Figur 4.6: Graf över hur sidokraftskoefficienten, C_s, varierar som funktion av girvinkeln. Blå kurva visar uppmätt C_s från vindtunneltesterna. Grön kurva visar resultatet från CFD-simuleringen med statisk mark och stillastående hjul. Röd kurva visar resultatet från CFD-simuleringen med rörlig mark och roterande hjul.

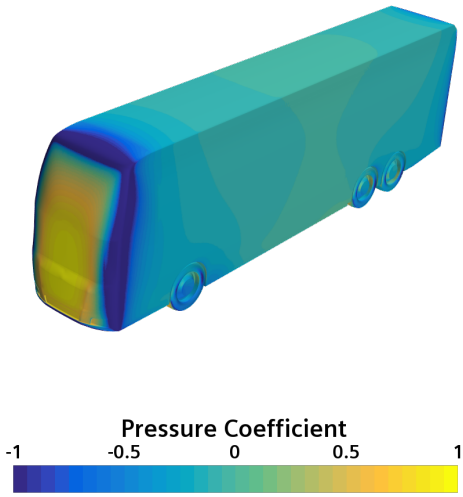


(a) Tryckkoefficient på bussens läsida vid 40°, rörligt underlag.

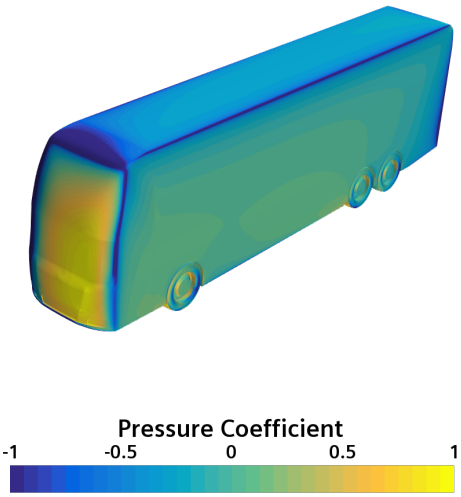
(b) Tryckkoefficient på bussens läsida vid 45°, rörligt underlag.

Figur 4.7: Tryckkoefficienten på bussens läsida för dynamisk simulation. Notera det högre trycket vid 45° jämfört med 40° vilket bidrar till att C_s sjunker.

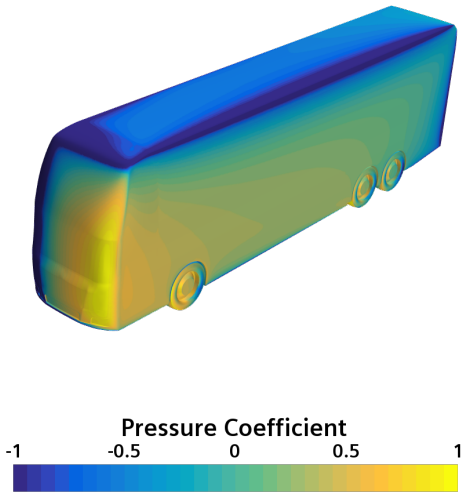
En anledning till varför C_s konstant ökar fram till 40°, görs tydligt i figur 4.8. Gula områden indikerar ett högre tryck, alltså att tryckkoefficienten längs med ytan ökar. För varje ökning av girvinkeln ökar storleken på den gula ytan, vilket indikerar att trycket på vindsidan av bussen ökar allt mer.



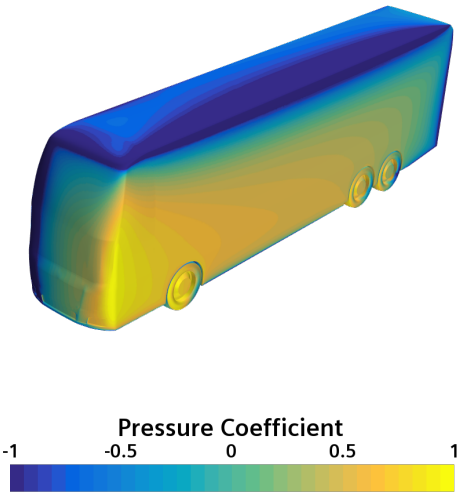
(a) Tryckkoefficient på bussens vindsida vid 0°.



(b) Tryckkoefficient på bussens vindsida vid 16°.



(c) Tryckkoefficient på bussens vindsida vid 30°.



(d) Tryckkoefficient på bussens vindsida vid 45°.

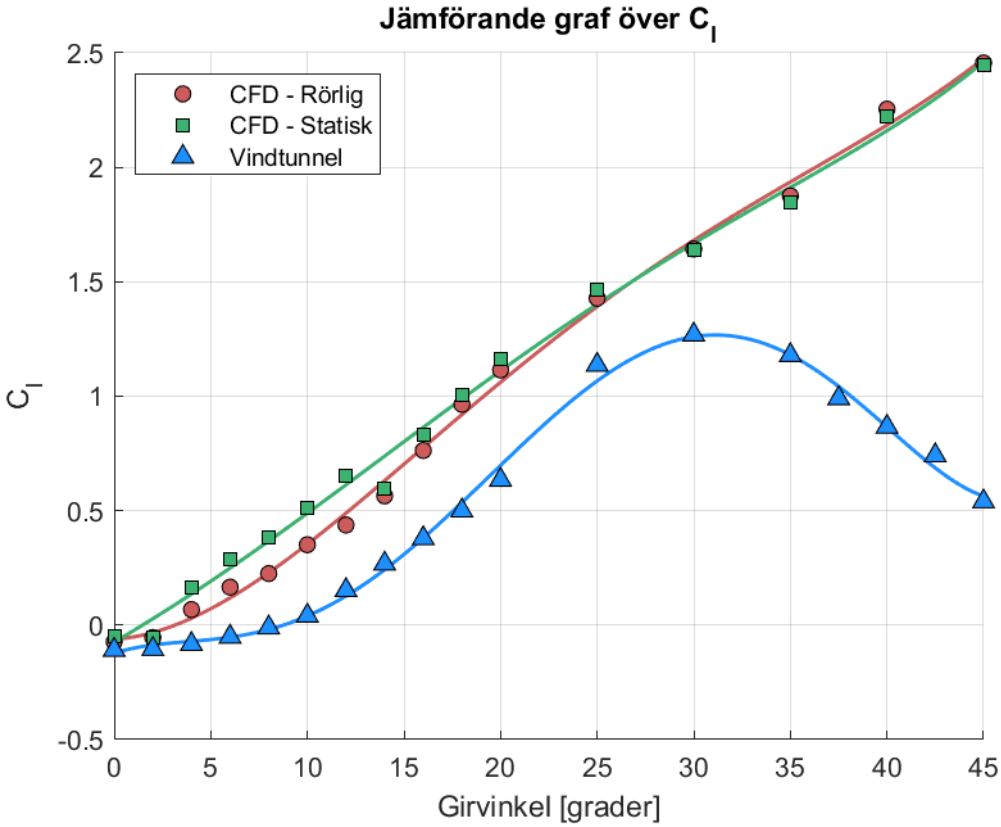
Figur 4.8: Tryckkoefficienten på bussens vindsida från den statiska simuleringen. Notera att det gula området med högt tryck ökar för ökande vinkel.

4.1.3 C_l - Lyftkraft

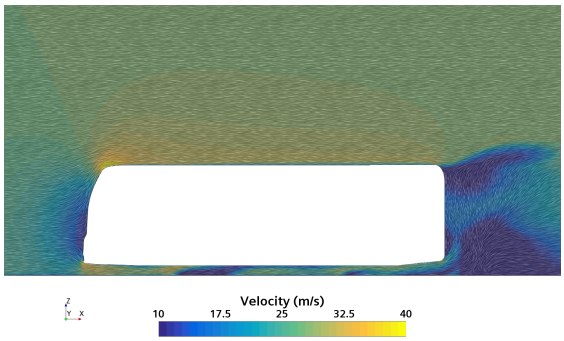
I figur 4.9 kan lyftkraftskoefficienten C_l ses. I CFD-simuleringarna ökar lyftkoefficienten med ökad vinkel. Den uppmätta lyftkoefficienten från vindtunneltestet följer en något annorlunda trend, där lyftkraften ökar fram till 30°, men sedan minskar fram till 45°.

Generellt uppstår lyftkraften från att luften strömmar snabbare över bussen än under, vilket kan ses i figur 4.10. För alla vinklar syns att ett område under bussen uppstår där luftens hastighet är låg jämfört med ovanför bussen. Då sjunker även trycket över bussen, vilket leder till en lyftkraft.

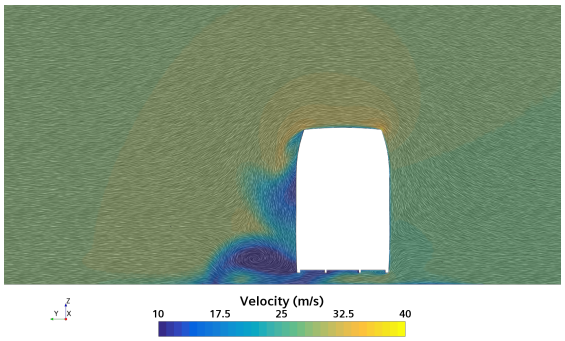
En anledning till att resultatet från simuleringarna och vindtunnelmätningarna skiljer sig kan bero på den något högre markfrigången i vindtunneln jämfört med simuleringarna. Detta leder sannolikt till att trycket under bussen är högre i vindtunneln jämfört med simuleringarna, och bussen trycks således ned mindre mot underlaget. Ytterligare en faktor kan vara de fyra hål i vindtunnelns golv där monteringsstavarna sticker upp. Luft kan flöda genom hålen och påverka trycket under bussen.



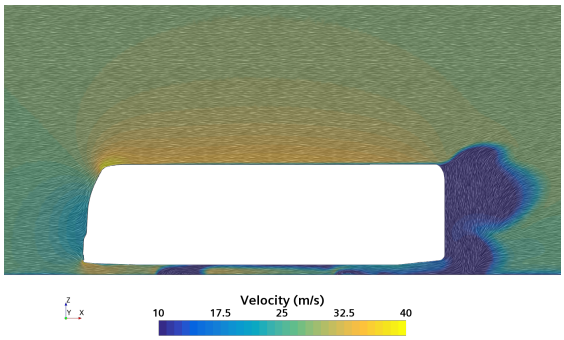
Figur 4.9: Graf över hur lyftkraftskoefficienten, C_l, varierar som funktion av girvinkeln. Blå kurva visar uppmätt C_l från vindtunneltesterna. Grön kurva visar resultatet från CFD-simuleringen med statisk mark och stillastående hjul. Röd kurva visar resultatet från CFD-simuleringen med rörlig mark och roterande hjul.



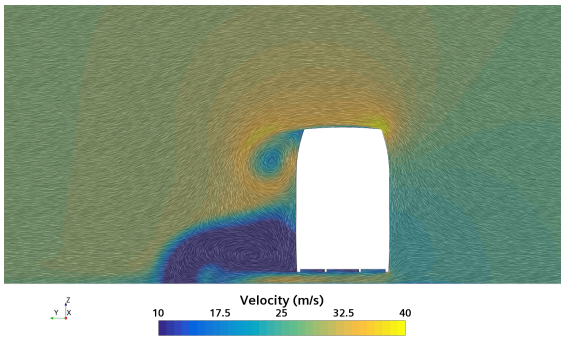
(a) Hastighetsfält vid 16°



(b) Hastighetsfält vid 16°



(c) Hastighetsfält vid 30°

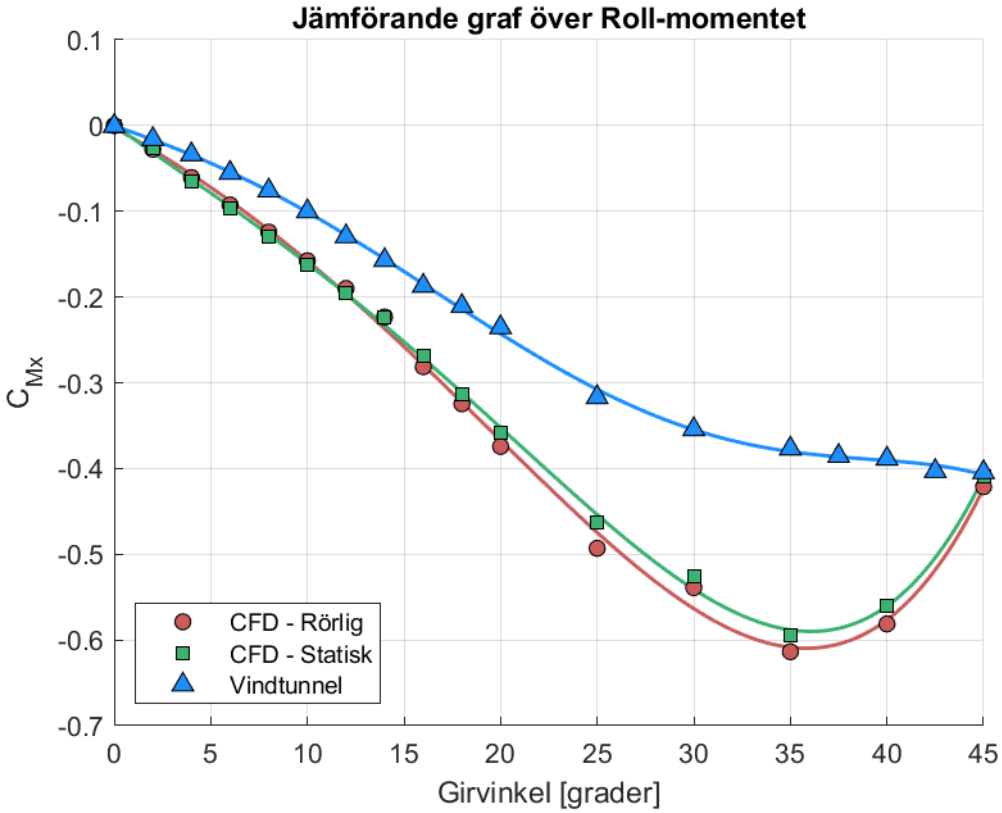


(d) Hastighetsfält vid 30°

Figur 4.10: Tvärsnitt av bussen vid geometrisk mittpunkt från sidan och framifrån med hastighetsfält. Notera den högre lufthastigheten över bussen jämfört med under.

4.1.4 C_{M_x} - Rollmoment

Rollmomentet, C_{M_x}, se figur 4.11, beror till stor del på sidokrafterna och följer därför en inverterat liknande trend som C_s. Skillnaderna mellan CFD-simuleringarna och vindtunneln skiljer sig dock mer i detta fall jämfört med resultatet för C_s. Det är inte känt hur positionerna för de resulterade krafterna skiljer sig mellan CFD-simuleringarna och vindtunneln vilket kan påverka momentet.

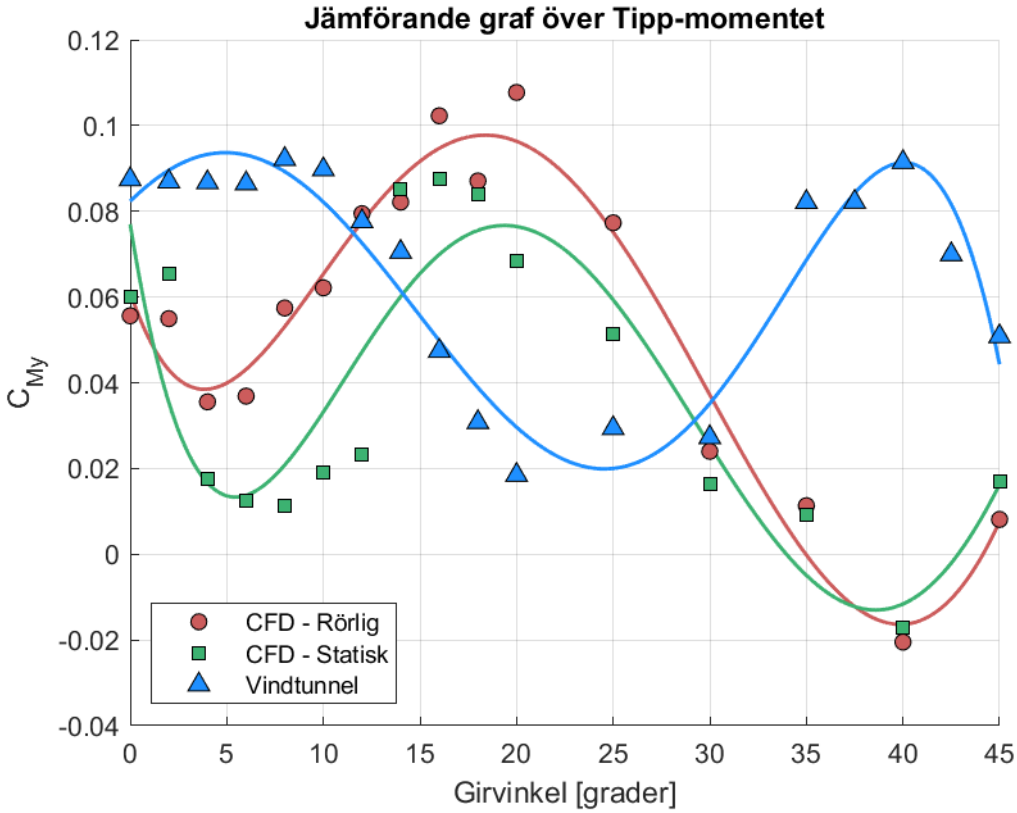


Figur 4.11: Graf över hur rollmomentet, C_{M_x}, varierar som funktion av girvinkeln. Blå kurva visar uppmätt C_{M_x} från vindtunneltesterna. Grön kurva visar resultatet från CFD-simuleringen med statisk mark och stillastående hjul. Röd kurva visar resultatet från CFD-simuleringen med rörlig mark och roterande hjul.

4.1.5 C_{M_y} - Tippmoment

Tippmomentet, C_{My}, kan ses i figur 4.12. Trenderna för simuleringen med rörlig och statisk mark följer varandra, även om skillnader ses i både amplitud och en förskjutning mellan kurvorna. En möjlig förklaring, om än spekulativ, är att krafterna från bussens undersida påverkar C_{My} i relativt hög grad. Flödet vid bussens undersida antas skilja sig åt mellan stillastående och rörlig mark eftersom hjulen i det förstnämnda fallet står stilla, men roterar i det andra.

Resultatet från vindtunneln skiljer sig kraftigt åt från simuleringarna vad gäller den övergripande trenden. En möjlig anledning skulle kunna vara att underlaget skiljer sig jämfört med i CFD-beräkningarna, då det finns hål i markplattan i vindtunneln. Det är även värt att notera att koefficienten har låga värden för samtliga vinklar vilket innebär att noggrannheten hos mätinstrumentet får en större påverkan på resultatet.

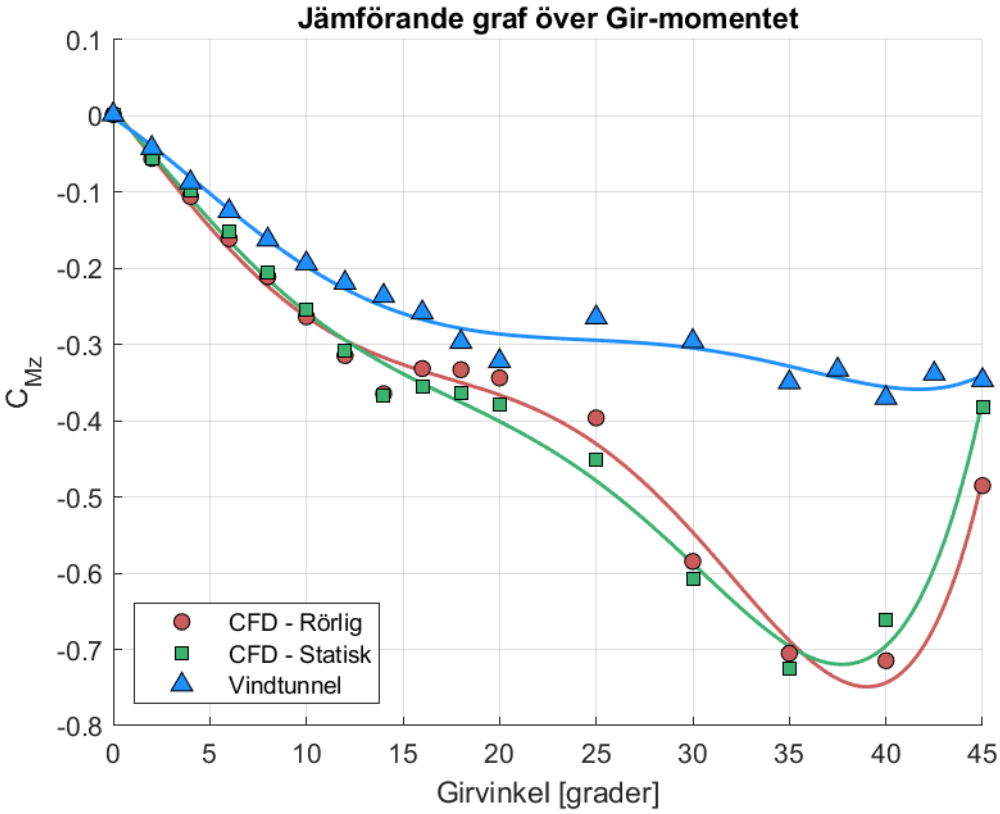


Figur 4.12: Graf över hur tippmomentet, C_{M_y}, varierar som funktion av girvinkeln. Blå kurva visar uppmätt C_{M_y} från vindtunneltesterna. Grön kurva visar resultatet från CFD-simuleringen med statisk mark och stillastående hjul. Röd kurva visar resultatet från CFD-simuleringen med rörlig mark och roterande hjul.

4.1.6 C_{M_z} - Girmoment

För girmomentet visar figur 4.13 en något liknande trend upp till 20° mellan CFD-simuleringarna och mätvärden från vindtunneltesten, innan de avviker från varandra. Resultaten från de båda simuleringarna följer varandra även för större vinklar, där girmomentet ökar i magnitud fram till girvinkelintervallet 35° - 40°. Det uppmätta momentet från vindtunneln ökar inte lika mycket för vinklar över 20°, utan har en mer flack kurva. Girmomentet påverkas av sidkrafter och luftmotståndet.

Luftmotståndet skiljer sig kraftigt mellan CFD-simuleringarna och vindtunneln i girvinkelintervallet 35° - 40° vilket troligtvis påverkar momentet. Det är även inte känt i vilken position de resulterade krafterna verkar i, vilket också påverkar momentet.



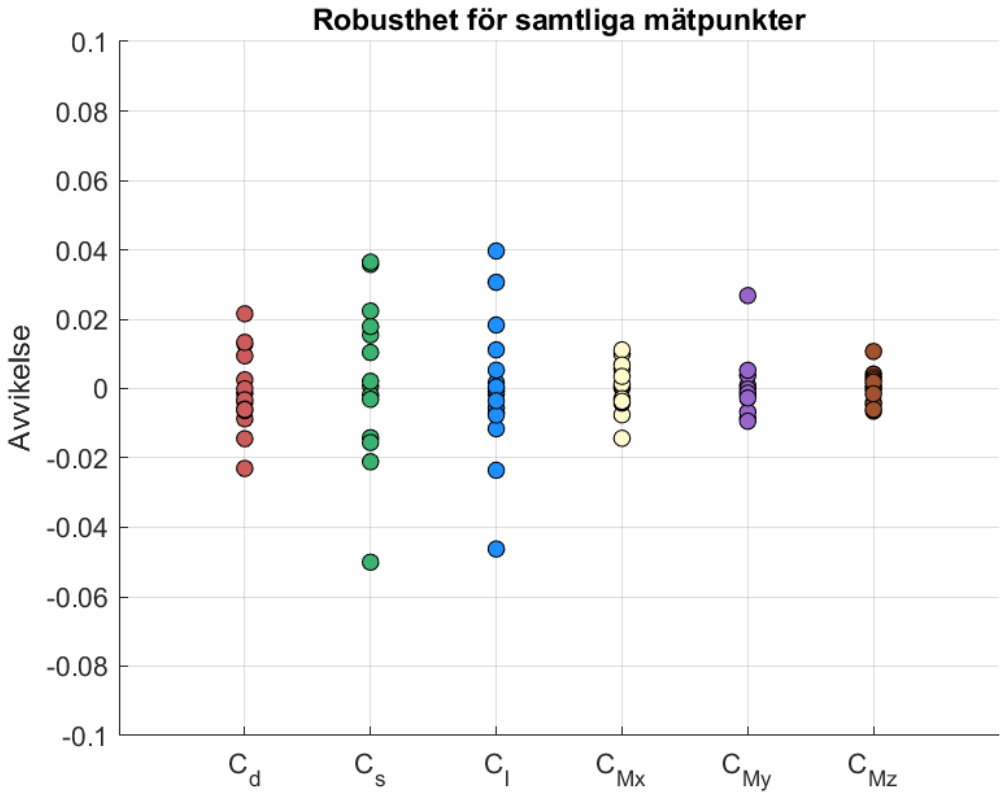
Figur 4.13: Graf över hur girmomentet, C_{M_z}, varierar som funktion av girvinkeln. Blå kurva visar uppmätt C_{M_z} från vindtunneltesterna. Grön kurva visar resultatet från CFD-simuleringen med statisk mark och stillastående hjul. Röd kurva visar resultatet från CFD-simuleringen med rörlig mark och roterande hjul.

4.1.7 Robusthet vid mätningar i vindtunnel

De mätpunkter som uppmätts under samtliga robusthets-tester kan ses nedan i figur 4.14. För att jämföra resultatet för varje dimensionslös koefficient uppmättes varje mätpunkts avvikelse från genomsnittet för den vinkeln. Detta resulterar i en visualisering som generellt visar hur stor avvikelse som kan förväntas i mätningarna.

Som kan ses hålls de flesta mätpunkter inom ett intervall på ± 0,02 enheter. Koefficienter som C_l och C_s har en viss tendens till ökad spridning, och avvikande värden. Detta innebär att sannolikheten att felaktiga värden uppmätts här är större än för mer koncentrerade spridningar som hos C_{M_x} eller C_{M_z}. Det bör dock tilläggas att

för koefficienter som C_{M_y} innebär även denna förhållandevis koncentrerade spridning relativt stora mätfel då trenden över dess mätserie varierar mycket lite.



Figur 4.14: Spridningen av de dimensionslösa koefficienterna för robusthetstesten vid 0°, 22,5° och 45°. Avvikelsen ses gentemot varje koefficients medelvärde.

4.1.8 Jämförelse mellan dynamisk och statisk simulering

Flödesanalysen presenterar med hjälp av resultatet skillnaden mellan den statiska och dynamiska simuleringen. Skillnaden mellan flödena har enligt tidigare presenterad data störst olikheter på C_d av de olika dimensionslösa krafterna, och tippmomentet för de tre olika dimensionslösa momenten. Utifrån figur 4.15 skall nu dessa skillnader i C_d och tippmoment förklaras genom att kolla på flödet runt bussen.

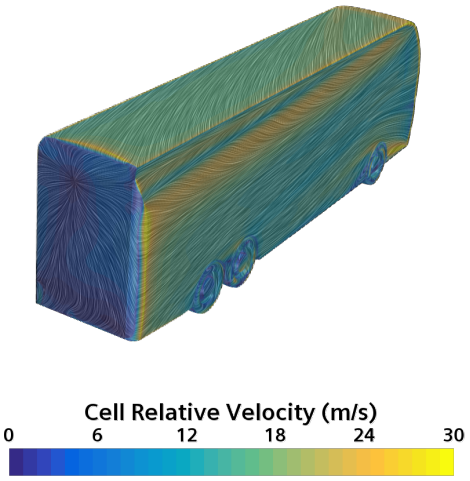
Enligt figur 4.15 är skillnaden vid 14° mycket hårfin, men framförallt synlig bakom bakersta axeln där den dynamiska simuleringen har mer flöde nedåt marken. Det kan bero på att gränsskiktslagret på marken är mindre för den dynamiska simuleringen jämfört med den statiska. Detta borde i sin tur resultera i en mindre vak bakom bussen då luften hålls närmare marken. Därför borde C_d vara lägre i den dynamiska simuleringen för 14° vilket också är fallet. Det går inte att se någon skillnad på flödet

i sidled och därmed är det svårt att säga något om de små skillnader i tippmoment för denna vinkeln.

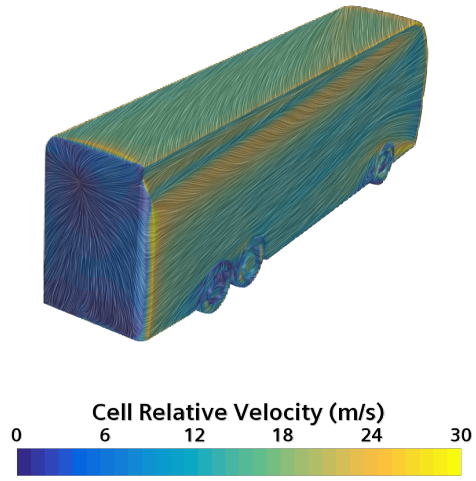
För nästa vinkel vid 16° är skillnaderna på flödet större än vid 14°. Här är flödet för den dynamiska mer nedåtriktad längs hela busen samt att separationen vid högra A-stolpen är annorlunda. Vidare finns vid bussens taklinje en annorlunda övergång där den dynamiska har högre hastighet på virveln vilket skapas då luften går över bussens tak och ned på andra sidan. Detta beror troligen på ett lägre tryck vid bussens ovankant vilket vidare beror på vinkeln på flödet från sidan. Utifrån detta borde C_d vara lägre för dynamiska även för denna vinkel men borde vara större än för 14°, vilket stämmer med figur 4.1. Vidare borde tippmomentet vara större för den dynamiska än den statiska, vilket också stämmer med figur 4.12.

För vinkel 20° (figur 4.15) kan även här ses att den dynamiska har ett mer vinklat flöde nedåt, framförallt bakom hjulen vid denna vinkel. Här kan ses att den dynamiska har en mer turbulent övergång runt A-stolpen på bussen, vilket troligen beror på de högre hastigheterna i virveln vid skarven mellan bussens sida och taket. Därmed kan det anses troligt för denna vinkel att C_d borde vara högre för den dynamiska simuleringen. Inverkan från virveln i fram är större än skillnaden på vinkeln på flödet, sett till storlek och hastighet, något som också stämmer med figur 4.1. Då virveln vid skarven mellan bussens sida och taket även för denna vinkel är större borde tippmomentet fortsatt vara större för den dynamiska, vilket också stämmer med figur 4.12.

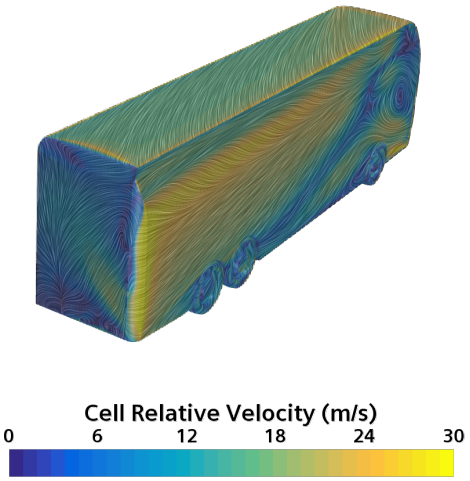
För den sista vinkeln, 35°, i figur 4.15, är de visuella skillnaderna mindre än de föregående vinklarna. Detta kan bero på att skillnader i gränskikt, samt hjulens flöde, framförallt påverkar i x-riktningen, men då allt större del av flödet går i y-riktningen kommer inverkan av dessa fenomen att minska. Detta återspeglas också i figur 4.1 och figur 4.12.



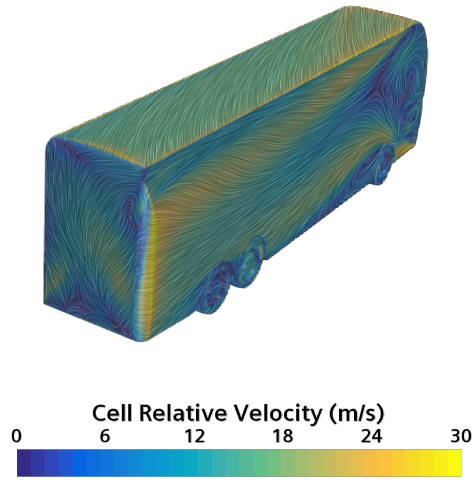
(a) Hastighetsfält för dynamisk simulering vid 14°.



(b) Hastighetsfält för statisk simulering vid 14°.

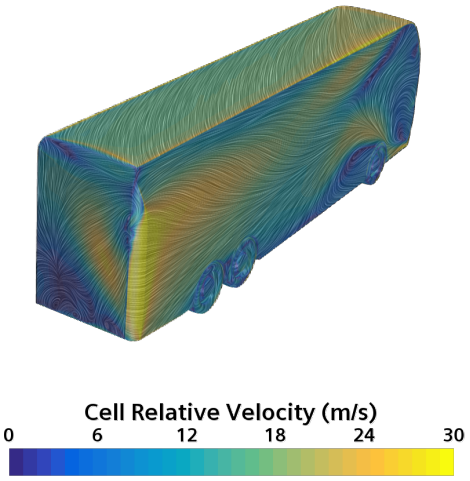


(c) Hastighetsfält för dynamisk simulering vid 16°.

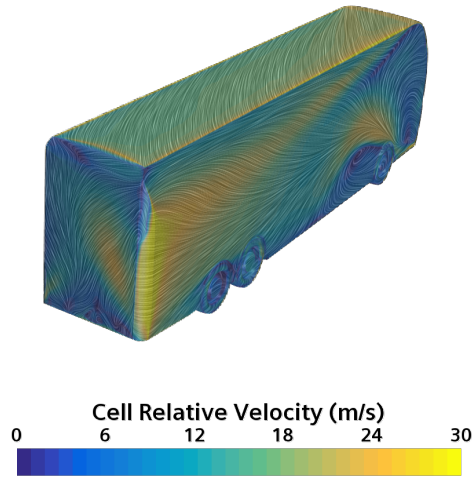


(d) Hastighetsfält för statisk simulering vid 16°.

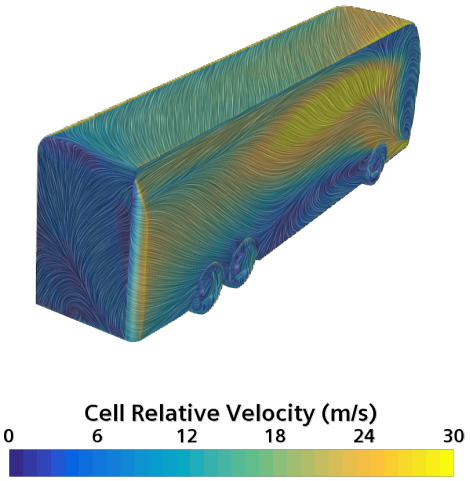
Figur 4.15: Hastighetsfält på bussen bakifrån för statisk samt dynamiska simuleringar för vinklarna 14°, 16°, 20°och 35°.



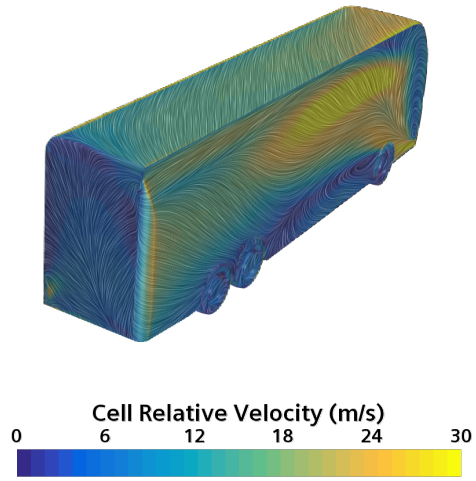
(e) Hastighetsfält för dynamisk simulering vid 20°.



(f) Hastighetsfält för statisk simulering vid 20°.



(g) Hastighetsfält för dynamisk simulering vid 35°.



(h) Hastighetsfält för statisk simulering vid 35°.

Figur 4.15: Fortsättning: Hastighetsfält på bussen bakifrån för statisk samt dynamiska simuleringar för vinklarna 14°, 16°, 20°och 35°.

4.2 Jämförelse av dubbeldäckare och vanlig buss i vindtunnel

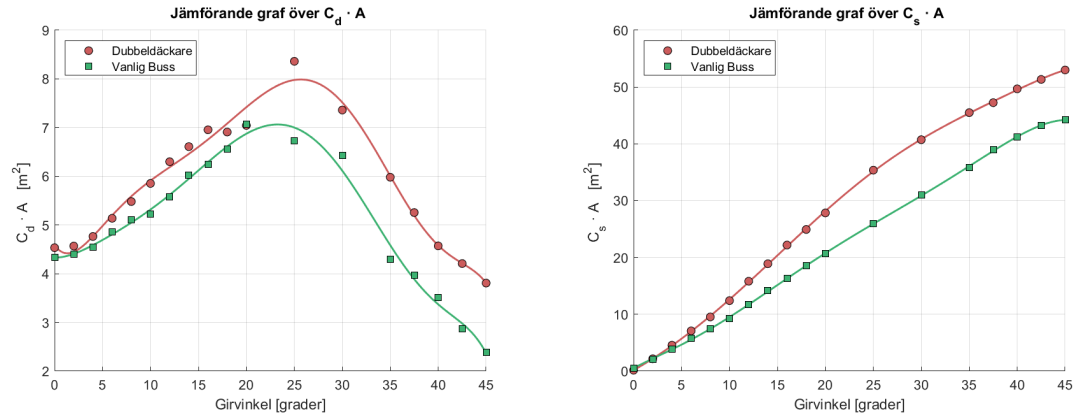
Följande del presenterar skillnaderna mellan vindtunnelmätningarna av dubbeldäckaren och den vanliga bussen. Figurerna visar den dimensionslösa koefficienten multiplicerad med den verkliga frontarean A på respektive buss, vilket innebär att kurvorna blir proportionella till kraften som verkar på dem.

Generellt följer mätningarna den förväntade trenden. Dubbeldäckaren kommer att utsättas för krafter av högre magnitud än den vanliga bussen på grund av att dess area är större, något som reflekteras i graferna. Även när det kommer till momenten har dubbeldäckaren högre absoluta värden.

Skillnaderna i sidkraft $C_s \cdot A$ är presenterade i figur 4.16b där en klar skillnad växer fram efter 10°. Det högre värdet på $C_s \cdot A$ för dubbeldäckaren består sedan under resten av mätserien. Denna utveckling är förväntad eftersom sidkrafterna initialt är mycket små, men ökar då girvinkeln ökar, och då dubbeldäckaren har en större area kommer den att gradvis utsättas för större krafter.

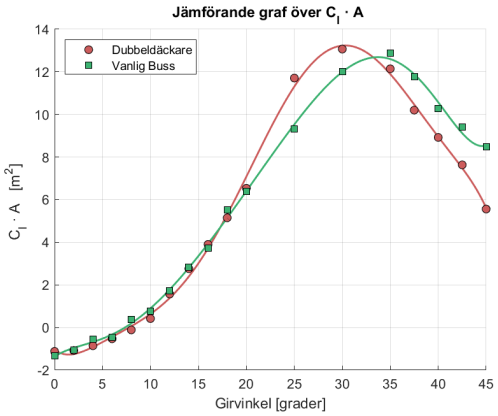
I figur 4.16a visas $C_d \cdot A$. Det är tydligt att de två mätningarna följer en liknande trend vilket var väntat då den enda skillnaden mellan bussmodellerna är höjden. Precis som tidigare är det också förväntat att $C_d \cdot A$ är större för dubbeldäckaren, men det är intressant att notera att båda bussarna har nästintill samma $C_d \cdot A$ vid vinklar under 5°. Detta resultat var inte förväntat, och kan inte förklaras.

För rollmomentet, $C_{M_x} \cdot A$ (figur 4.16d), fås en liknande trend som dubbeldäckarens vindtunnelresultat hade mot simuleringarna. Då uppstod skillnaderna för att vindtunneln hade en längre hävarm än simuleringarna hade, något som skalade upp momenten. På ett liknande sätt kommer dubbeldäckaren att ha en något längre hävarm än enkelbussen. Dubbeldäckaren är högre, vilket därför placerar den resulterande kraften något högre upp på sidan än för enkelbussen och därför förlänger hävarmen.

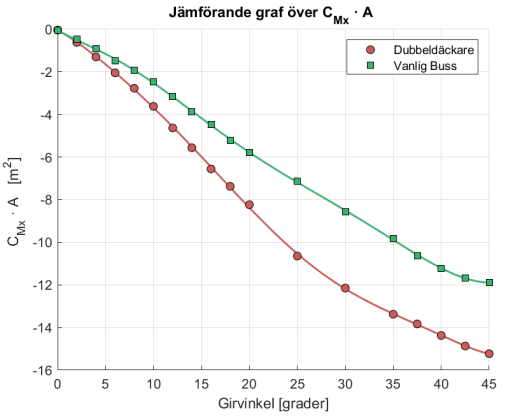


(a) $C_d \cdot A$

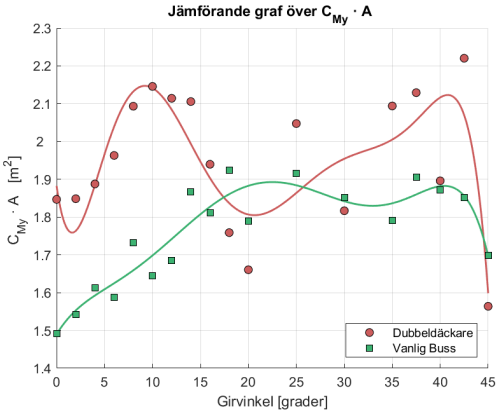
(b) $C_s \cdot A$



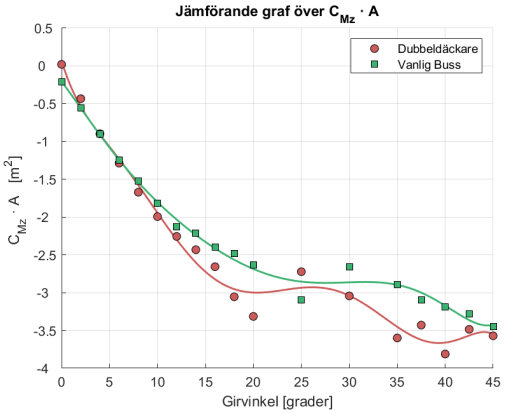
(c) $C_l \cdot A$



(d) $C_{M_x} \cdot A$



(e) $C_{M_y} \cdot A$



(f) $C_{M_z} \cdot A$

Figur 4.16: Grafer över hur de dimensionslösa koefficienterna multiplicerat med respektive frontarea varierar som funktion av girvinkeln, uppmätt i vindtunnel. Grön kurva visar uppmätta värden för vanlig buss. Röd kurva visar resultatet för dubbeldäckaren.

5

Diskussion

Resultatet i detta projekt har kommit från både CFD-simuleringar och från vindtunneltester vilka i detta kapitel kommer att diskuteras mer överskådligt än i kapitel 4. Följande kapitel inleds med att diskutera resultatet på dubbeldäckaren runt olika perspektiv. Detta följs åt av en grundlig diskussion av de förbättringsförslag som projektet hade kunnat dra nytta av. Till sist diskuteras kort olika alternativ på vidareutvecklingar av detta projekt.

5.1 Diskussion av resultat för dubbeldäckare

Eftersom momenten är uppmätta kring olika punkter i simuleringarna och vindtunneln måste de konverteras till nya positioner för att jämföras. För att inte riskera felaktiga antaganden angående de resulterade krafternas position har ingen konvertering gjorts i x-led och momenten har därför inte konverterats till exakt samma position. Eftersom skillnaden i x-led dock är mycket liten anses ändå jämförelse mellan resultaten vara berättigad. Vågen i vindtunneln mäter momenten och krafterna separat vilka kan innehålla felaktigheter i mätvärden oberoende av varandra [23]. Ur perspektivet att jämföra CFD-simuleringar och vindtunneltester är det troligen optimalt att det ursprungliga momentcentrumet har samma position för att undvika konvertering.

Några större skillnader mellan stillastående och rörligt underlag har inte kunnat observerats i simuleringarna. För koefficienter som till exempel C_s och C_{M_x} är resultaten i princip identiska. Hos andra koefficienter ses små skillnader, och en viss förskjutning hos trenderna mellan simuleringarna. Dock följer de alltid samma trend i stort. Vid analys av scenerna har inte heller några stora skillnader upptäckts. En nämnvärd skillnad är dock att flödet verkar dras ner mot bakhjulen mer för simuleringen med roterande hjul. Detta sågs i figur 4.15. Dock verkar inte detta fenomen påverka några koefficienter i större utsträckning.

CFD-beräkningarna utfördes likt vindtunneltesterna som ett svep med start vid 0° för att sedan successivt öka till 45°. För att effektivisera beräkningarna använder

Star-CCM+ lösningen från föregående vinkel som startgissning för varje nästkommande vinkel. Det märktes dock under projektets gång att resultaten från simuleringarna kan skilja sig relativt stort beroende på om vinkeln beräknades i ett svep, eller om den beräknades enskilt. Ett exempel på en simulering som inte hade en tidigare startgissning var värdet på C_s som beräknades i kap 3.2.6 - Konvergens av beräkningsnät. Simuleringen med 33 miljoner celler hade identiska inställningar till de som senare användes för svepen, vilket gör att de är direkt jämförbara. Då simuleringen kördes enskilt fick C_s ett värde på 3,982 vid 45°, medan värdet från svepet var 3,4406. Detta är en betydande skillnad som uppstår i två helt oberoende konvergerade lösningar. I samma simulering uppkom även betydande skillnader mellan ett par av de andra koefficienterna, dessa värden har dock aldrig presenterats i denna rapport. Uppkomsten av denna skillnad kan tyda på att lösningen för CFD simuleringarna är beroende av startgissningen vilket därför är en potentiell felkälla i resultatet.

Projektet skulle med tanke på detta ha kunnat gett ett mer robust resultat ifall fler simuleringar hade gjorts i CFD för enskilda vinklar, utan en startgissning från en föregående vinkel. Detta för att kunna fånga upp ifall det finns variation av de beräknade krafterna vid vissa vinklar på vinden, då en variation av startgissning existerar.

5.2 Förbättringsförslag

Under följande del kommer de förbättringsförslag som hade kunnat göra resultatet bättre att presenteras. Förbättringarna baseras dels på felkällor men även andra förslag vilka skulle gjort arbetets resultat mer tillförlitligt.

Första förbättringen utgår från några av de avgränsningar och begränsningar som projektet hade. En av avgränsningarna var att inte inkludera geometri för bron i simuleringarna, något som gjort dem mindre överensstämmande med de verkliga omständigheterna för projektet. Projektet har heller inte kunnat undersöka hur fordon påverkas av varandra i kombination med stark sidvind, under till exempel omkörning. Vid dessa fall skulle de skiftande omständigheterna kunna ge ett annat flöde runt bussen, vilket skulle kunna resultera i en annorlunda kraftdistrubution.

Vidare kan vindtunneltesterna på bussarna göras mer verklighetstrogna om roterande hjul samt rörlig mark använts. Detta skulle möjligtvis ha kunnat ge en annorlunda kraftsituation på bussen. Samtidigt visar resultatet från de gjorda simuleringar att roterande hjul och rörlig mark verkar ha en relativt liten påverkan på det slutliga resultatet, men denna upptäckt skulle kunna valideras i vindtunneln.

Ytterligare en förbättring berörande de praktiska detaljerna i vindtunneln är felkällorna kring mätutrustningen. Vårt arbete hade vissa problem med att en del mätpunkter visade stora avvikande värden från varandra, och som var tvungna att tas bort manuellt. Om de avvikande värdena beror på mätutrustningen eller hanteringen av den är oklart, men en förbättring skulle vara att minimera dessa fel.

Andra praktiska detaljer som kan förbättras är den platta vilken bussens hjul monteras fast på. Denna platta tillåter bussen att börja vibrera vid vissa vinklar på vinden och som i sin tur troligen leder till felaktiga mätresultat eftersom bussen rör sig på ett sätt vilket den inte skulle gjort i en verklig situation. En förstärkning av plattan hade troligen gjort att bussens vibrationer skulle minska och därmed gett bättre resultat.

En annan förbättring kopplat till mätinstrumenten är att ändra momentcentrum i vindtunneln. Detta för att momenten skall vara jämförbara mellan CFD-simuleringarna och vindtunnel utan att de behövs konverteras. Detta kan i praktiken vara svårt då instrumentet inte tillåter detta. Ett alternativ kan därför vara att istället lägga till en punkt, med samma koordinater som momentet för vindtunneln, i CFD-simuleringarna där moment mäts runt.

För att öka trovärdigheten på resultatet från simuleringarna är en förbättring att undersöka fler parametrar som kan påverka det slutliga resultatet. Projektet kollar idag endast på påverkan av hur antalet celler samt hur beräkningsvolymens storlek påverkar den slutliga lösningen. Ytterligare parametrar att undersöka är till exempel betydelsen av storleken på vägbiten under bussen.

Förbättringsförslag gällande den tillverkade bussmodellen är för det första att undersöka modellens ytfinhet. Detta kan sedan jämföras med en fullskalig buss och se ifall den är skalenlig. Vidare hade en undersökning av olika ytfinheters påverkan på känsligheten för sidvindar genererat ett resultat vilket kunnat ge inblick i hur mycket detta påverkar bussars aerodynamiska egenskaper.

En annan eventuell förbättring är att göra modellen i ett annat material. Det kan inte uteslutas att bussen är för vek, vilket kan göra att den vrider sig eller får andra formändringar när den utsätts för krafter från vinden. Detta är troligen inte något som överensstämmer med hur en verklig buss ändrar sig. För att säkerställa att inte plasten vrider sig bör detta undersökas genom att göra tester på hur den deformeras när den utsätts för starka vindar.

Relaterat till CFD-simuleringarna kan användningen av andra turbulensmodeller vara en förbättring. Som tidigare nämnt användes *Reynolds-Averaged Turbulence* och *K-Epsilon Turbulence* i Star-CCM+ för att modellera turbulens. Ett annat alternativ vore att testa *Detached Eddy Simulation* (DES). DES ska vara bättre på att förutspå turbulens jämfört med den valda modellen, och Siemens beskriver hur DES övergår från laminär till turbulent strömning på ett mer naturligt sätt [24].

En DES-modell påstås vara bättre på att förutspå separation och vidare rekommenderas DES av Siemens när flödet förväntas innehålla kraftig separation, vilket förekom mycket i detta projekt. En nackdel med DES är att det kräver betydligt mer beräkningstid och beräkningskraft, vilket kan vara begränsat i ett projekt som detta.

5.3 Vidareutveckling av arbetet

Den klaraste vidareutvecklingen av detta projekt är att utföra fordonsdynamiska simuleringar baserade på det resultat som tagits fram. Det är först efter denna typ av analys som det går att avgöra hur bussen kommer att reagera på de aerodynamiska effekterna den utsätts för, och därmed avgöra vid vilka hastigheter det blir farligt att färdas över en bro.

Ett nästa steg vid en potentiell vidareutveckling av detta projekt hade varit att göra tester på fler olika varianter av bussar. Detta genom att dels variera detaljgraden på bussarna men också formen och storleken. Genom att göra detta skulle arbetets resultat kunna gälla för fler fordon. Vidare skulle också arbete kunna ge en bild på hur stor påverkan förenklingen av detaljnivån gör.

Vidare skulle även fler konfigurationer på varje buss ge ett resultat vilket fångar upp fler situationer som kan uppstå i verkligen. Exempel på möjliga konfigurationer är att testa varje buss med skidbox eller släpkärra. Här skulle också olika konfigurationer där bussen har olika höjd på karossen relativt marken, detta då flertalet bussar har luftfjädring och kan justera sin höjd samt att de kan vara olika tungt packade.

En annat steg att testa är hur stor påverkan luftens egenskaper har vid extremfall av tryck och temperatur på resultaten i CFD-simuleringarna samt vindtunneltesterna. Detta innebär inga svårigheter i implementering i CFD, utan belastar endast antalet beräkningstimmar.

6

Slutsats

Utifrån projektets resultat kan slutsatsen generellt dras att skillnaden mellan de dynamiska och statiska simuleringarna inte är markant framträdande jämfört med skillnaderna mot vindtunneltesterna. Detta innebär att skillnaderna mellan simuleringarna och vindtunneln inte kan krediteras till rörliga hjul och mark.

Slutsatserna som kan dras från de enskilda kraftkoefficienterna är framför allt att C_s är mycket stabil mellan samtliga mätningsmetoder, och ökar jämbördigt och linjärt upp till 40°.

För C_d, men även till viss del C_l, har simuleringarna liknande trender. Värdena överensstämmer ofta bättre för lägre vinklar och skiljer sig stundtals mer i storlek vid högre vinklar. Detta gör att det är svårt att säga vad det absoluta värdet för dessa kraftkoefficienter är vid något högre vinklar.

När det kommer till momentkoefficienterna kan slutsatsen dras att de tre momenten korrelerar väl mellan de båda CFD-simuleringarna. Slutasten gällande resultatet från vindtunneln jämfört med CFD-simuleringarna är att Roll och Gir-momenten är lika för lägre vinklar. För högre vinklar blir skillnaderna större. För tipp-momentet är de absoluta skillnaderna på värdena mellan vindtunneln och CFD-simuleringarna mycket små. Med hänsyn till robustheten i vidtunneln kan därför inga slutsatser kring C_{M_y} dras med säkerhet.

Vid jämförelsen av dubbeldäckaren och den vanliga bussen framkom det att båda till stor del följer samma trender, men att krafterna och momenten på dubbeldäckaren är större. Eftersom detta var förväntat då dubbeldäckaren hade en större area kan det därför konstateras att en ändring av geometrin i höjdled inte ledde till några drastiska förändringar i de aerodynamiska egenskaperna hos bussen.

Litteraturförteckning

[1] Statens vegvesen. ”The E39 Coastal Highway Route.” Statens vegvesen. https://www.vegvesen.no/en/roads/Roads+and+bridges/Road+projects/e39coastalhighwayroute (hämtad februari 27, 2021).

[2] Norconsult. ”Ferryfree E39: Bjørnafjorden floating bridge.” Norconsult. https://www.norconsult.com/projects/bjornafjorden/ (hämtad mars 17, 2021).

[3] Chalmers tekniska högskola. ”Chalmers helps Norway bridge the fjords.” Chalmers tekniska högskola. https://www.chalmers.se/en/departments/ace/news/Pages/Chalmers-helps-Norway-bridge-the-fjords.aspx (hämtad mars 18, 2021).

[4] A. Dineff, A. Upadhyaya, P. Hoorn, K. N. Rao, V. Gudial. ”Aerodynamic investigations of a simplified truck under high yaw wind conditions,” Chalmers tekniska högskola, Göteborg, Sverige, 2021. Hämtad: februari 4, 2021. [Online]. Tillgänglig: https://hdl.handle.net/20.500.12380/302252

[5] O. Hellsten m.fl. ”Aerodynamic investigations of a bus,” Chalmers tekniska högskola, Göteborg, Sverige, 2019. Hämtad: januari 20, 2021. [Online]. Tillgänglig: https://hdl.handle.net/20.500.12380/301635

[6] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 8 uppl. New York, NJ, USA: McGraw-Hill Education, 2016.

[7] T. Schuetz, *Aerodynamics of Road Vehicles*, 5 uppl. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2016.

[8] Youhanna E. William, Mohamed H. Mohamed and Walied A. H. Oraby. ”Investigation Of Crosswind Aerodynamics For Road Vehicles Using CFD Technique” presenterad vid Eleventh International Conf of Fluid Dynamics, 2013.

[9] NASA. ”The drag coefficient.” NASA. https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/dragco.html?fbclid=IwAR3S-J7L1mqtHoyUrGP1Ig9fSRCFJ8Q4RXAAWqy355CakHxvSVceqqJcpc4 (hämtad mars 18, 2021).

[10] AeroToolbox. ”Aerodynamic Lift, Drag and Moment Coefficients.” AeroToolbox. https://aerotoolbox.com/lift-drag-moment-coefficient/ (hämtad mars 18, 2021).

[11] A. KhawajaStar, ”Meshing in StarCCM+: Recent Advances” presenterad vid Star Chinese Conf, Shanghai, Kina, dec 9-10, 2013. [Online]. Tillgäng-

lig: http://mdx2.plm.automation.siemens.com/sites/default/files/Presentation/STAR%20Chinese%20Conference%202013%20Presentation%20Aly%20Khawaja%20Meshing.pdf.

[12] Manufacturing.net. "Third Generation Surface Wrapping Software." Manufacturing.net. https://www.manufacturing.net/home/news/13129630/thirdgeneration-surface-wrapping-software (hämtad mars 25, 2021).

[13] M. Kuron. "3 Criteria For Assessing CFD Convergence." Engineering.com. https://www.engineering.com/story/3-criteria-for-assessing-cfd-convergence (hämtad april 1, 2021).

[14] K Maley, "Best Practices: Volume Meshing" presenterad vid Star South East Asian Conf, Singapore, 2012. [Online]. Tillgänglig: http://mdx2.plm.automation.siemens.com/sites/default/files/Presentation/SEA%20Conference%202012_CDadapco_VolumeMeshing_Used_KM.pdf.

[15] Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (2017). Marine CFD course 2017 Meshing. [Online]. Tillgänglig: http://www.shiplab.hials.org/wp-content/uploads/2017/09/06_Marine_CFD_course_2017_Meshing.pdf.

[16] Leap Australia. "Understanding the physics behind y^+." Leap Australia. https://www.computationalfluiddynamics.com.au/y-plus_part1_understanding-the-physics-of-boundary-layers/ (hämtad april 5, 2021).

[17] K Maley, "Parts and Mesh-based Operations" presenterad vid Star South East Asian Conf, Kuala Lumpur, Malaysia, nov 11-12, 2013. [Online]. Tillgänglig: http://mdx2.plm.automation.siemens.com/sites/default/files/Presentation/Kynan_PBM_Final.pdf.

[18] J. Stumpe. "The drag coefficient." Aeorspace America. https://aerospaceamerica.aiaa.org/features/symbiosis-why-cfd-and-wind-tunnels-need-each-other/ (hämtad april 9, 2021).

[19] S. Mansor *et al.*, "Evaluation of aerodynamic derivatives of Mk82 bomb from wind tunnel testing and semi- empirical methods," vid *2nd International Conference on Mechanical, Automotive and Aerospace Engineering (ICMAAE 2013)*, 2013. Hämtad: April 9, 2021. [Online]. Tillgänglig: https://www.researchgate.net/publication/245033046_Evaluation_of_aerodynamic_derivatives_of_Mk82_bomb_from_wind_tunnel_testing_and_semi-empirical_method, Hämtad: april 9, 2021.

[20] Choi C, Kwon D. (1998) Wind tunnel blockage effect on aerodynamic behavior of bluff body. Wind and Structures, Uppl.1, Num. 4.

[21] Volvo buses. "VOLVO LAUNCHES ALL-NEW DOUBLE DECKER FOR OPERATIONS IN EUROPE." Volvo buses. https://www.volvobuses.com/en-en/news/2021/jan/

volvo-launches-all-new-double-decker-for-operations-in-europe.html (hämtad april 1, 2021).

[22] H. Schlichting, "Turbulent boundary layers at zero pressure gradient," i *Boundary Layer Theory*, 7:e uppl. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1979, kap. 11, s. 641.

[23] A. Vdovin. *Wind tunnel project instruction, MTF236 - Road Vehicle Aerodynamics*. [PDF]. Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, Sverige.

[24] Siemens *Simcenter STAR-CCM+ Turbulence Modeling*. (2019). Hämtad: maj 12, 2021. [Online]. Tillgänglig: https://web.cecs.pdx.edu/~gerry/class/ME448/lecture/pdf/STARCCM_Turbulence_Technical_Spotlight_Rich.pdf.

A

Mätvärden från vindtunneltester

Tabell A.1: Förklaring för de beteckningar som används för att systematisera mätningarna.

Beteckning	**Förklaring**
Bus_DD_RSy_x	Reynoldssvep för dubbeldäckaren vid $y°$ vinkel och hastighet x
Bus_DD_30ms_up_x	Mätserie för dubbeldäckare vid 30 m/s vid $x°$ vinkel då svepet görs från 0° - 45°.
Bus_DD_30ms_down_x	Mätserie för dubbeldäckare vid 30 m/s vid $x°$ vinkel då svepet görs från 45° - 0°.
Bus_DD_30ms_Repeat	Upprepade mätningar för dubbeldäckaren för vissa vinklar både upp och ner.
Bus_S_30ms_up_x	Mätserie för enkelbussen vid 30 m/s vid $x°$ vinkel då svepet görs från 0° - 45°.
Bus_S_30ms_down_x	Mätserie för enkelbussen vid 30 m/s vid $x°$ vinkel då svepet görs från 45° - 0°.
Bus_DD_30ms_y_r&r_x	Robusthetsmätning vid vinkel y och test x

Mätvärden från vindtunneltester

Namn	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
Bus_DD_RS0_5ms	-0.253651174	-0.0497148132	-0.280265885	0.00757644669	0.0239373337	0.00239486419
Bus_DD_RS0_10ms	-0.939576151	-0.0840496882	-0.782043785	0.00691848705	0.152874249	0.00579968150
Bus_DD_RS0_15ms	-2.10380417	-0.138191374	-1.17045394	-0.00471439821	0.451946440	0.0175086383
Bus_DD_RS0_20ms	-3.72435647	-0.229995699	-1.71055464	-0.0288135017	0.892192165	0.0309103899
Bus_DD_RS0_25ms	-5.79573379	-0.383135253	-2.37211522	-0.0596023109	1.47120704	0.0330245166
Bus_DD_RS0_30ms	-8.42574047	-0.634688203	-3.24535163	-0.114866787	2.21856803	0.0399026466
Bus_DD_RS0_35ms	-11.4032419	-0.952488413	-4.26391666	-0.181020421	3.04770955	0.0555903787
Bus_DD_RS0_40ms	-14.9171364	-1.14861591	-5.49579610	-0.227937686	4.05439400	0.0595927693
Bus_DD_RS0_45ms	-18.8891450	-1.63044508	-6.75299735	-0.332062359	5.13296221	0.0665832204
Bus_DD_RS0_50ms	-23.2500210	-2.02665348	-8.11137040	-0.419321846	6.41657118	0.0638795932
Bus_DD_RS45_5ms	-0.106674465	-2.25542461	-0.0258326511	-0.579640704	0.0378214756	0.0628223140
Bus_DD_RS45_10ms	-0.671102666	-9.50607668	0.181383856	-2.18674746	0.134601843	0.421537494
Bus_DD_RS45_15ms	-1.44126103	-21.9603472	1.00012766	-4.95434361	0.305837006	1.04133762
Bus_DD_RS45_20ms	-2.66338105	-38.8157846	3.10163255	-8.69708144	0.560683449	1.88616201
Bus_DD_RS45_25ms	-4.20980664	-60.8151634	6.00343307	-13.5766286	1.15224591	3.06394675
Bus_DD_RS45_30ms	-6.63129092	-87.7105105	9.92426855	-19.5570704	1.89772823	4.42787167
Bus_DD_RS45_35ms	-9.61446004	-119.568574	15.3127899	-26.6074495	2.92141473	6.20933419
Bus_DD_30ms_up_0	-8.48635786	-0.203995867	-2.69010469	-0.0304021625	2.27782697	-0.0716181014
Bus_DD_30ms_up_2	-8.55172972	-3.95351141	-2.60428760	-0.849719723	2.29169783	0.570104058
Bus_DD_30ms_up_4	-8.86630593	-8.04862244	-2.21204045	-1.74557246	2.32522826	1.18955304
Bus_DD_30ms_up_6	-9.52380028	-12.4969792	-1.56432951	-2.75179266	2.45910510	1.70911509
Bus_DD_30ms_up_8	-10.2483514	-17.1137840	-0.676171388	-3.79952650	2.64976240	2.26964858
Bus_DD_30ms_up_10	-10.8583548	-21.9285456	-0.0789037094	-4.88107925	2.69260189	2.67522629
Bus_DD_30ms_up_12	-11.5770568	-27.9348433	2.04098345	-6.23993991	2.61553041	3.00386454
Bus_DD_30ms_up_14	-12.2181517	-33.5720422	4.38646358	-7.54740516	2.65156715	3.24650944
Bus_DD_30ms_up_16	-12.6735054	-39.1379784	5.87237743	-8.82536296	2.32942309	3.56094226
Bus_DD_30ms_up_18	-12.6054515	-43.7849788	7.73394374	-9.87345044	2.04299085	4.07173644
Bus_DD_30ms_up_20	-12.8581517	-48.6819363	9.74122757	-10.9780393	1.87030624	4.38754823
Bus_DD_30ms_up_25	-15.0298947	-61.0669852	18.9994912	-14.0225622	2.42789676	3.58622208
Bus_DD_30ms_up_30	-13.6098310	-70.8715738	21.5530115	-16.1527266	2.20114281	3.93946364
Bus_DD_30ms_up_35	-10.9183773	-77.5871823	17.4096102	-17.3871529	2.11526922	4.67636254
Bus_DD_30ms_up_375	-31.9223971	-78.1872275	14.5251224	-17.6984710	4.35426506	3.07999930
Bus_DD_30ms_up_40	-8.40945782	-84.1206857	12.5598836	-18.5293722	1.95628110	4.85751724
Bus_DD_30ms_up_425	-7.96781007	-87.4120915	9.94155509	-19.1649438	1.79221776	4.81811924
Bus_DD_30ms_up_45	-7.29610443	-89.6095151	6.86632317	-19.5158123	1.22784032	4.66430983
Bus_DD_30ms_down_45	-7.09101650	-94.1663748	10.8207704	-20.8339000	2.06842482	4.92984824
Bus_DD_30ms_down_425	-16.7929914	-90.9067163	13.4758549	-20.3946600	3.46614932	4.33547246
Bus_DD_30ms_down_40	-8.61341986	-88.5052204	15.2865640	-19.7291016	2.65931860	5.06255269
Bus_DD_30ms_down_375	-9.67612806	-85.5512179	19.1892909	-19.2242929	2.92330646	5.12552397
Bus_DD_30ms_down_35	-10.9479101	-82.0688697	26.1089827	-18.6157591	3.74502805	4.92220969
Bus_DD_30ms_down_30	-13.2812038	-74.8329674	26.1415837	-17.2299995	2.94284925	4.19638514
Bus_DD_30ms_down_25	-14.1941841	-62.5511734	21.9239189	-14.5027975	3.05847196	3.70879790
Bus_DD_30ms_down_20	-12.0281838	-49.6556846	13.3382994	-11.3253981	2.62659064	4.58691140
Bus_DD_30ms_down_18	-11.8338678	-44.4137151	10.4808629	-10.1258981	2.72707885	4.21263592
Bus_DD_30ms_down_16	-11.5208298	-38.0571948	7.69646779	-8.66433713	2.84350713	3.52442909

Bus_DD_30ms_down_14	-10.8704180	-32.4418265	5.26490688	-7.34692087	2.98745512	3.26617661
Bus_DD_30ms_down_12	-10.3743624	-27.1890362	3.43260452	-6.13937565	3.03267728	3.02194539
Bus_DD_30ms_down_10	-9.54362608	-21.3034558	1.53879105	-4.79378395	3.04110704	2.65169456
Bus_DD_30ms_down_8	-8.91014972	-16.2222746	0.283890599	-3.63009541	2.95934845	2.20784849
Bus_DD_30ms_down_6	-8.39258320	-12.1907312	-0.277767619	-2.72115344	2.78928476	1.72935509
Bus_DD_30ms_down_4	-7.70255505	-7.80865553	-0.769287628	-1.71948636	2.70732013	1.20275551
Bus_DD_30ms_down_2	-7.31159656	-3.58929513	-1.14788691	-0.793375856	2.63009861	0.584206832
Bus_DD_30ms_down_0	-7.21750968	-0.332370152	-1.19206075	-0.0748210328	2.62635568	0.0166340623
Bus_DD_30ms_upRepeat_30	-13.8189819	-70.4524067	21.6935367	-16.2032386	1.96652044	4.02297016
Bus_DD_30ms_upRepeat_35	-11.2960784	-79.6274655	19.5330243	-18.0471955	2.35555734	4.79660873
Bus_DD_30ms_upRepeat_375	-12.7619551	-81.1981415	17.1643514	-18.3048967	2.53483109	4.76529897
Bus_DD_30ms_upRepeat_40	-8.80655422	-84.5011682	14.9998094	-18.8327838	2.03107572	4.95008509
Bus_DD_30ms_upRepeat_425	-19.6001811	-85.7928064	12.7156008	-19.2735765	3.23452466	4.02240440
Bus_DD_30ms_upRepeat_45	-15.3560036	-88.5659013	8.06124187	-19.7569207	2.12831314	4.06768033
Bus_DD_30ms_downRepeat_2	-4.33732161	-89.8892810	12.2542606	-19.6831244	2.76951174	5.04835518
Bus_DD_30ms_downRepeat_2	-4.99906023	-88.4430295	16.2899902	-19.4460784	3.19707396	5.17246385
Bus_DD_30ms_downRepeat_2	-5.75908274	-86.2157388	18.8084485	-19.0583875	3.39792358	5.32391648
Bus_DD_30ms_downRepeat_2	-7.38349659	-82.4120004	19.7949913	-18.2410081	3.31665570	5.24394049
Bus_DD_30ms_downRepeat_2	-8.69424951	-79.1111902	21.9311732	-17.7199852	3.01954444	4.91551959
Bus_DD_30ms_downRepeat_2	-11.1909354	-71.0510292	22.7564678	-16.0914028	2.71021570	4.29332329
Bus_S_30ms_up_0	-6.92977421	-0.589989652	-2.10952668	-0.119469281	1.93340652	0.115821755
Bus_S_30ms_up_2	-7.05239600	-3.10984024	-1.95695453	-0.620148294	1.94388400	0.568684055
Bus_S_30ms_up_4	-7.26963487	-6.18202408	-1.45163091	-1.25581227	1.95230632	1.00694142
Bus_S_30ms_up_6	-7.96648126	-9.36403439	-1.84673632	-1.98050759	1.86748396	1.45722622
Bus_S_30ms_up_8	-8.41082606	-12.2987184	-1.09457929	-2.60686631	1.93453250	1.83570213
Bus_S_30ms_up_10	-8.71847083	-15.5224108	0.149076830	-3.28750345	1.93420175	2.23008742
Bus_S_30ms_up_12	-9.34267554	-19.7489895	1.96274893	-4.19414281	2.02218807	2.67466402
Bus_S_30ms_up_14	-10.2493053	-24.4081087	3.48779337	-5.19042245	2.20568757	2.80149006
Bus_S_30ms_up_16	-10.6227154	-28.1594639	5.28216979	-5.99116413	2.15850513	3.05508547
Bus_S_30ms_up_18	-10.9140809	-32.5773346	7.45809646	-6.93564603	2.08504738	3.32293905
Bus_S_30ms_up_20	-11.7261226	-36.4725424	9.89957682	-7.75316366	2.15564372	3.51486555
Bus_S_30ms_up_25	-12.0620221	-45.3526023	15.4421539	-9.59925072	2.27627102	4.15235972
Bus_S_30ms_up_30	-11.6423574	-54.6879244	20.4288022	-11.5931519	2.35909758	3.58550897
Bus_S_30ms_up_35	-7.78404205	-62.7957598	22.1275022	-13.1890965	2.21434905	3.85997550
Bus_S_30ms_up_375	-7.08035143	-67.5153827	20.6368112	-14.1245948	2.49734338	4.14251187
Bus_S_30ms_up_40	-6.47826612	-72.1211806	17.7748188	-15.0272739	2.50618568	4.26793159
Bus_S_30ms_up_425	-5.34076156	-75.3949656	16.1938247	-15.6037418	2.53627735	4.39208156
Bus_S_30ms_up_45	-4.47099561	-77.1841089	14.5744200	-15.9153659	2.26463469	4.56813866
Bus_S_30ms_down_45	-3.83325978	-76.7400702	14.9159378	-15.8230270	2.26814372	4.64375515
Bus_S_30ms_down_425	-4.67437739	-75.2025948	16.6197922	-15.5828081	2.41234192	4.37578192
Bus_S_30ms_down_40	-5.81230136	-72.1703125	18.1438607	-15.0445434	2.51100365	4.28711148
Bus_S_30ms_down_375	-6.74837695	-68.2647365	20.3648938	-14.2944001	2.59652639	4.14245310
Bus_S_30ms_down_35	-7.24613733	-62.6189604	22.9212405	-13.1793438	2.59005610	3.90359013
Bus_S_30ms_down_30	-10.8562910	-53.7486142	21.6456265	-11.3671615	2.60871449	3.55908775
Bus_S_30ms_down_25	-11.4640743	-45.3373187	17.1663450	-9.51559143	2.86139282	4.15326429
Bus_S_30ms_down_20	-12.9877908	-35.9135348	12.4465392	-7.79782829	2.64140508	3.54956570
Bus_S_30ms_down_18	-11.9855676	-32.0261920	11.7957425	-7.04663039	3.06316766	3.32236396

Bus_S_30ms_down_16	-11.0892851	-28.6925747	7.63925248	-5.89065817	2.67073577	3.32813308
Bus_S_30ms_down_14	-10.6491726	-24.7617104	6.35416582	-5.07342542	2.75790950	3.07627930
Bus_S_30ms_down_12	-9.89408312	-20.4620179	4.00531280	-4.11238670	2.42615441	2.93857991
Bus_S_30ms_down_10	-9.16028102	-16.2516691	2.47822446	-3.17777860	2.37841037	2.52422151
Bus_S_30ms_down_8	-8.89467842	-12.8492262	2.40385813	-2.43818108	2.56899796	2.11453553
Bus_S_30ms_down_6	-8.38251459	-9.93697061	0.298271207	-1.81972841	2.23180403	1.74988992
Bus_S_30ms_down_4	-7.93157746	-6.59294519	-0.340326181	-1.11366430	2.17923392	1.29238422
Bus_S_30ms_down_2	-7.59722807	-3.89186609	-1.54105328	-0.559617935	1.98744122	0.855467614
Bus_S_30ms_down_0	-7.41553152	-1.25174596	-2.32263498	-0.0160562985	1.84942155	0.416499454
Bus_DD_30ms_45_r&r_1	-6.41413877	-88.5805084	12.0700694	-19.6132041	1.92513559	4.68780146
Bus_DD_30ms_45_r&r_2	-6.78135503	-87.9857548	11.3539654	-19.4854648	1.94537068	4.63081292
Bus_DD_30ms_45_r&r_3	-6.40885652	-88.9505104	12.2231004	-19.7137320	1.94887204	4.73853994
Bus_DD_30ms_45_r&r_4	-6.69937145	-88.6244899	11.4319827	-19.6078981	1.98803307	4.68576124
Bus_DD_30ms_45_r&r_5	-7.02410840	-87.9746108	10.7661492	-19.4703981	1.91738330	4.62462549
Bus_DD_30ms_45_r&r_6	-6.47352110	-89.4418000	11.4576418	-19.8018228	1.90080834	4.73709463
Bus_DD_30ms_225_r&r_1	-12.5513957	-53.5331798	17.6144678	-12.2334795	2.68688592	4.91230811
Bus_DD_30ms_225_r&r_2	-12.8118062	-53.7703146	15.5293013	-12.2309171	2.20613523	4.84021373
Bus_DD_30ms_225_r&r_3	-12.7427323	-54.1817874	15.8622904	-12.3055369	2.29445703	5.04773685
Bus_DD_30ms_225_r&r_4	-13.0440357	-54.0626161	15.6947197	-12.3071208	2.23046637	4.89659612
Bus_DD_30ms_225_r&r_5	-12.7889153	-53.4901474	15.2471623	-12.1736354	2.19467853	4.81389006
Bus_DD_30ms_0_r&r_1	-7.80956695	-0.754760517	-2.28799270	-0.189490505	2.36402006	0.0546475549
Bus_DD_30ms_0_r&r_2	-8.25110672	-0.951866223	-2.41129727	-0.201715040	2.27668298	0.0449411968
Bus_DD_30ms_0_r&r_3	-8.29871047	-0.976669151	-2.39458742	-0.199854891	2.29011707	0.0366348633
Bus_DD_30ms_0_r&r_4	-8.30691515	-0.301202803	-2.37378547	-0.0568433271	2.27425230	-0.0714596177
Bus_DD_30ms_0_r&r_5	-8.30156994	-0.513902290	-2.44516483	-0.102013720	2.25493702	-0.00939021966

B

Resultat från simuleringar

Resultat från simuleringar med statiskt beräkningsnät

Girvinkel [deg]	C_d medel	C_s medel	C_l medel	C_Mx medel	C_My medel	C_Mz medel
0.0	0.2986	5.364E-4	-0.0464	-4.7605E-4	0.0598	0.0019
2.0	0.2957	0.2010	-0.0547	-0.0267	0.0654	-0.0557
4.0	0.3009	0.4844	0.1666	-0.0653	0.0175	-0.0977
6.0	0.3013	0.6975	0.2885	-0.0971	0.0124	-0.1516
8.0	0.3000	0.9063	0.3808	-0.1293	0.0112	-0.2059
10.0	0.3138	1.1407	0.5111	-0.1627	0.0193	-0.2536
12.0	0.3123	1.3642	0.6527	-0.1955	0.0231	-0.3073
14.0	0.3193	1.5608	0.5962	-0.2233	0.0851	-0.3667
16.0	0.5345	1.9320	0.8345	-0.2821	0.0923	-0.3208
18.0	0.5472	2.1527	1.0066	-0.3175	0.0747	-0.3539
20.0	0.5729	2.4242	1.1615	-0.3571	0.0694	-0.3784
25.0	0.4948	3.1345	1.4645	-0.4631	0.0520	-0.4513
30.0	0.2643	3.6624	1.6371	-0.5263	0.0169	-0.6071
35.0	0.0905	4.1919	1.8472	-0.5940	0.0087	-0.7267
40.0	0.0451	4.1995	2.2225	-0.5632	-0.0179	-0.7042
45.0	0.2528	3.3522	2.4450	-0.4097	0.0172	-0.4699

Resultat från simuleringar med dynamiskt beräkningsnät

Girvinkel [deg]	C_d medel	C_s medel	C_l medel	C_Mx medel	C_My medel	C_Mz medel
0.0	0.2903	5.4648E-4	-0.0724	-8.2838E-5	0.0556	0.0018
2.0	0.2821	0.2131	-0.0543	-0.0276	0.05493	-0.0558
4.0	0.2784	0.4447	0.0679	-0.0606	0.0355	-0.1057
6.0	0.2780	0.6590	0.1660	-0.0926	0.0367	-0.1609
8.0	0.3031	0.8683	0.2252	-0.1240	0.0584	-0.2125
10.0	0.3087	1.0998	0.3513	-0.1578	0.0619	-0.2632
12.0	0.3268	1.3280	0.4373	-0.1899	0.0795	0.3142
14.0	0.3281	1.5615	0.5647	-0.2232	0.0821	-0.3645
16.0	0.4598	1.94747	0.7630	-0.2814	0.0895	-0.3508
18.0	0.6025	2.2520	0.9644	-0.3315	0.0931	-0.3246
20.0	0.6391	2.5557	1.1148	-0.3777	0.0991	-0.3385
25.0	0.5699	3.3228	1.4280	-0.4930	0.0766	-0.3962
30.0	0.2896	3.7292	1.6432	-0.5390	0.0238	-0.5844
35.0	0.0969	4.3087	1.8751	-0.6137	0.0112	-0.7050
40.0	0.0494	4.3687	2.2542	-0.5940	-0.0162	-0.6975
45.0	0.2310	3.4406	2.4561	-0.4218	0.0105	-0.4848

INSTITUTIONEN FÖR
MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2021
www.chalmers.se



CHALMERS