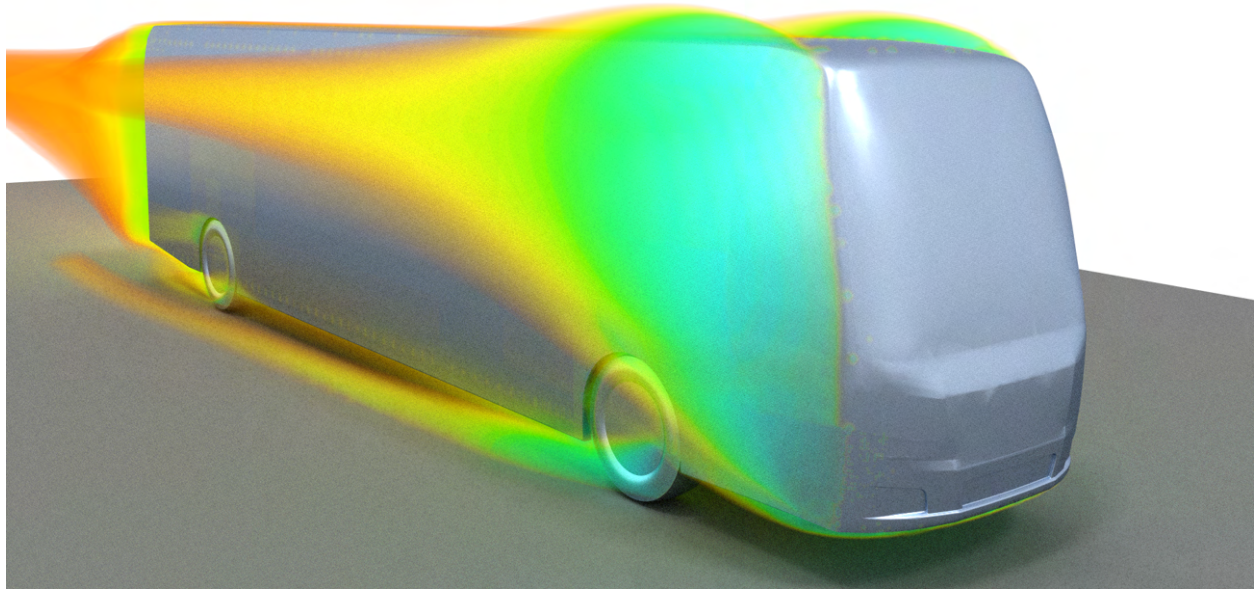




CHALMERS



Påverkan av att inkludera vindtunnelgeometri i CFD på fordons aerodynamiska krafter

En analys av skillnader i resultat mellan flödessimuleringar och Chalmers vindtunnel

Kandidatarbete vid Mekanik och Maritima Vetenskaper, M2

ALBIN AHLKOG
ELIN FAHLGREN
ISAK LUNDGREN
EMMA-LIISA MIKKOLA

Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2022
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2022:02

Påverkan av att inkludera vindtunnelgeometri i CFD på fordons aerodynamiska krafter

En analys av skillnader i resultat mellan flödessimuleringar och Chalmers
vindtunnel

ALBIN AHLKOG
ELIN FAHLGREN
ISAK LUNDGREN
EMMA-LIISA MIKKOLA

Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Avdelningen för fordonsteknik och autonoma system
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2022

Påverkan av att inkludera vindtunnelgeometri i CFD på fordons aerodynamiska krafter

En analys av skillnader i resultat mellan flödessimuleringar och Chalmers vindtunnel

ALBIN AHLKOG

ELIN FAHLGREN

ISAK LUNDGREN

EMMA-LIISA MIKKOLA

© ALBIN AHLKOG, ELIN FAHLGREN, ISAK LUNDGREN, EMMA-LIISA MIKKOLA, 2022.

Kandidatarbete 2022:02

Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper

Chalmers Tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg

Sverige

Tel. nr. +46 (0)31 772 1000

Omslag: Rending av tryckfördelning i transparent volym nära bussen från STAR-CCM+.

Format: L^AT_EX

Tryckeri / Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper

Göteborg, Sverige 2022

Sammandrag

I tidigare studier har stora skillnader hos aerodynamiska krafter mellan datorgenererade värden och värden tagna från Chalmers vindtunnel observerats. Denna studie ämnar att analysera dessa skillnader, hitta kärnproblemen till dem och ge förslag till vidare studier hur dessa skillnader kan åtgärdas eller hanteras.

Studien genomfördes med redan framtagna CAD-modeller för både en buss och Chalmers vindtunnel, där vindtunneln modifierades i syfte att efterlikna den fysiska vindtunneln. CFD beräkningar utfördes i programmet STAR-CCM+. Samtidigt analyserades resultat från Chalmers vindtunnel utifrån olika inställningar tillgängliga i styrprogrammet och utifrån hål i tak och breather slot, vilka tejpades över i olika konfigurationer.

Utifrån datormodellerna fanns att användandet av turbulensmodellen $k-\omega$ SST och användandet av en mesh med låga y^+ var de största påverkande parametrarna för att säkerställa riktighet. Däremot kunde dessa inte fullt kompensera för den totala skillnaden som finns mellan datormodell och verkliga vindtunneltester. För att ta hänsyn till denna skillnad förväntas analyser kring bl.a. gränsvillkor i de tidigare nämnda detaljerna behöva genomföras. I de verkliga vindtunneltesterna observerades en kraftig ökning av C_D när tunnelns breather slot tejpades över, stundvis ökning då taket tejpades över och stor minskning då båda tejpades över i jämförelse med endast breather slot övertespat. En stor skillnad verkade även uppstå mellan kalibreringar av vågen som användes för att mäta alla värden, där skillnaderna kunde nå storlekar på 10 counts. Resultaten vilka framkom under arbetet visade sig vara närmare den data man får från vindtunneln jämfört med tidigare arbetens resultat vid viss inställning och konfiguration i vindtunneln respektive beräkningsmodellen.

Nyckelord: CFD, Vindtunnel, CAD, STAR-CCM+, Avvikelse.

Abstract

During previous studies there has been a big discrepancy between the aerodynamic force values calculated from CFD models and values received from experiments in the Chalmers wind tunnel. This study seeks to analyse the differences observed, locate key factors to this discrepancy and give suggestions from improvements to further studies within the area.

The study was conducted using existing CAD geometries for a buss and the Chalmers wind tunnel, with further additions being made to the wind tunnel in edits. CFD simulations were conducted in STAR-CCM+. In parallel, the wind tunnel was used and analysed in regard to all the available settings in the given control program. Alongside, tests were conducted with the breather slot and the opening for the traverse system at the top of the tunnel taped off.

In regards to computer-models, key factors to further the accordance with live simulations were found to be the usage of the $k - \omega$ SST turbulence model and the usage of low y^+ meshing, but these did not account for the total discrepancy observed between computer-models and live simulations. It is speculated that further analysis is required with regards to the boundary conditions in the included wind tunnel details. The live simulations showed a significant increase in C_D when the breather slots were taped of, occasional increases when the top was taped off and significant decreases when both slots were taped off in contrast to only the breather slots being taped off. Furthermore there seems to be a large discrepancy in regards to calibration of the balance used to calculate the coefficients, showing differences upwards of 10 counts between the supposed same configurations. The results that emerged from the work turned out to be closer to the data obtained from the wind tunnel compared to the results of previous work at a certain setting and configuration in the wind tunnel and the calculation model, respectively.

Keywords: CFD, Wind tunnel, CAD, STAR-CCM+, Discrepancy.

Tillkännagivande

Vi vill ge ett stort tack till vår handledare Dr. Alexey Vdovin för all hjälp under detta projekt. Utan din expertis inom ämnet och ditt engagemang hade detta arbete inte varit möjligt. Med den anledningen vill vi återigen rikta ett stort tack för att visa vår uppskattning för allt jobb du har lagt ner för att hjälpa oss.

Vi vill även rikta ett tack till Prof. Simone Sebben för givande föreläsningar och med sin erfarenhet gett betydelsefulla råd under arbetets gång.

Albin Ahlskog, Elin Fahlgren, Isak Lundgren och Emma-Liisa Mikkola
Göteborg, Maj, 2022

Lista med akronymer

Nedan finns listan med akronymer vilka har använts under rapportens gång listade i alfabetisk ordning:

0.8R	0.8 Ratio
A0.8R	Advanced 0.8 Ratio
AZSP	Advanced Zero Static Pressure
Breather slot	Ventileringshål
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
Count	En tusendels ändring i C_D , C_L
Mesh	Beräkningsnät
RANS	Reynolds-averaged Navier-Stokes
Steady state	Fortvarighetstillstånd
ZSP	Zero Static Pressure

Nomenklatur

Nedan följer en lista där den ingående nomenklaturen i texten förklaras.

Index

x, y, z	Riktningarna i det kartesiska koordinatsystemet
t	Index för tidssteg

Variabler

A	Karakteristisk area [m^2]
ρ	Fluidens densitet $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
V	Fluidens anströmningshastighet $\left[\frac{m}{s}\right]$
L	Karakteristisk längd [m]
μ	Dynamisk viskositet (hur snabbt fluiden deformeras under skjuvspänning) $\left[\frac{kg}{m * s}\right]$
ν	Kinematisk viskositet $\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \left[\frac{m^2}{s}\right]$
C_L	Lyftkraftskoefficient
C_D	Dragkraftskoefficient
F_L	Lyftkraft [N]
F_D	Luftmotstånd [N]
h	Höjd i z-led [m]
p_0	Stagnationstryck [Pa]
p_s	Statiskt tryck [Pa]
δ	Gränsskiktets tjocklek [m]

Innehållsförteckning

Lista med akronymer	ix
Nomenklatur	x
Figurlista	xv
Tabellista	xvii
1 Introduktion	1
1.1 Syfte	2
1.2 Frågeställningar	2
1.3 Avgränsningar	3
2 Teori	4
2.1 Vindtunnel	4
2.2 Dimensionslösa koefficienter	5
2.2.1 Reynoldstal	6
2.2.2 Dragkraftskoefficient	7
2.2.3 Lyftkraftskoefficient	8
2.3 Navier-Stokes ekvationer	8
2.4 Bernoullis ekvation	9
2.5 Pitot-rör	9
2.6 Gränsskikt	10
2.7 Turbulensmodellering	10
2.7.1 Reynolds-averaged Navier-Stokes	10
2.7.2 $k - \varepsilon$ modellen	11
2.7.3 $k - \omega$ modellen	12
2.7.4 $k - \omega$ SST modellen	12
2.8 CFD	12
2.8.1 Mesh	12
2.8.1.1 Hexaedra celler	13
2.8.1.2 Prisma celler	13
2.8.2 Prismalager och y^+	13
2.8.3 Konvergens	14
2.8.3.1 Global balans	14
2.8.3.2 Residualer	15
2.8.3.3 Fria parametrar	15

2.8.4	Väggfunktioner	15
2.9	Fysiska tester	16
2.9.1	Reynoldssvep	16
2.9.2	Blockeringseffekt	16
3	Metod	18
3.1	Hantering av CAD-modeller	18
3.1.1	Busmodell	18
3.1.2	Vindtunnelmodell	18
3.2	Meshing	19
3.3	Situationer vilka undersöks	21
3.4	Vindtunnel	22
3.4.1	Montering	22
3.4.2	Reynoldssvep	25
3.4.3	Repetitiva tester	25
3.4.4	Olika tester i vindtunneln	25
3.4.5	Breather slot	27
3.4.6	Visualisering a flödet	28
3.4.7	Mätningar av vågens angreppspunkt	29
3.4.8	Utmaningar	30
4	Resultat och Diskussion	34
4.1	Förfiningsstudie av mesh	34
4.2	Mätningar i vindtunnel	34
4.2.1	Momentarmsmätning	35
4.2.2	Reynoldssvep	35
4.2.3	Repetitiva tester	36
4.2.4	Koefficienter	38
4.3	Beräkningar i CFD	39
4.4	Tryckfördelning i tunnel och validering	41
4.5	Skillnader mellan höga och låga y^+	42
4.6	Påverkan av breather slot och taköppning	43
4.7	Kvarstående skillnader mellan beräkningar och mätningar	44
5	Slutsats	46
	Bibliografi	47
A	Appendix	II

Figurlista

2.1	CAD-modell av Chalmers vindtunnel med vågen i blått, travers systemet i turkost samt breather sloten i svart. Bild hämtad från STAR-CCM+.	4
2.2	Krafter och moment på komponentform.	6
2.3	Uppkomst av drag- och lyftkraft vid olika typer av kroppar.	8
2.4	Tvärsnitt av ett Pitot-rör. Hastigheten avstannar vid mynningen, och ger upphov till stagnationstrycket. Tryckskillnaden mäts mellan det statiska trycket, p_s i friströmmen och stagnationstrycket p_0 , vilket då tillsammans med friströmshastigheten V_0 kan ge hastigheten enligt (2.8).	9
2.5	Illustration av fluktuerande termer för hastighet.	11
2.6	Hexaedra och prismatiska celler.	13
2.7	Tvärsnitt av prisma lager. Prismalager, ovanför den röda linjen i bilden, läggs ortogonalt mot väggar. Den vanliga meshen, under den röda linjen i bilden, ligger parallellt med koordinataxlarna i detta fall. I denna figuren är första lagrets tjocklek $25 \mu m$ och lagrens totala tjocklek $7.5 mm$. Då totalt 14 lager används blir den geometriska skalningsfaktorn ungefär 1.37. Bild hämtad från STAR-CCM+.	14
3.1	Hårfin öppning i vindtunnelns inlopp på nära håll, där det är tydligt att det går att se tunnelns insida. Bild hämtad från STAR-CCM+.	19
3.2	Tvärsnitt av mesh från situationen 'Buss i vindtunnel med detaljer'. Tvärsnittet är taget på bussens sida sådant att däcken framgår. I bilden syns den totala meshen, samt första förfiningsblocket. Bild hämtad från STAR-CCM+.	20
3.3	Samma situation som i figur 3.2 zoomat in på bussen. I bilden syns första förfiningsblocket (topp), andra förfiningsblocket, förfining som följer bussen och förfining som följer däcken. Bild hämtad från STAR-CCM+.	20
3.4	Chalmers vindtunnels våg är placerad under vindtunnelns golv och mäter krafterna vilka uppstår på testobjektet.	23
3.5	Bussen monterad i en 0° vinkel mot flödet i vindtunneln.	24
3.6	Bussen monterad i en 90° vinkel mot flödet i vindtunneln.	24
3.7	Vindtunneln med tejp för hålet i taket.	26
3.8	Vindtunneln med tejpad breather slot under mätningarna i vindtunneln.	26

3.9	Användning av en tråd för att bestämma om vindtunnelns breather slot har ett in- eller utflöde av luft.	28
3.10	En visualisering av flödet med hjälp av garn som tejplats fast på bussen.	29
3.11	En visualisering av luftflödets hastighetsförändringar runt bussen. Rendering gjord i STAR-CCM+.	29
3.12	Figur på hur metallstativet ser ut samt hur angreppspunkten mättes upp. Figuren illustrerar också hur fjädern var spänd samt var den var placerad.	30
3.13	Bilderna illustrerar olika sätt att mäta vågens momentarm på.	31
3.14	Jämförelsebilder mellan de olika jiggarna som använts. En ny jigg behövde konstrueras för att kunna testa bussen med bredd sida mot vinden, då en gammal adapter försvunnit. Gångstängerna från den gamla jiggen har återanvänts.	32
3.15	Bild på den nuvarande lösningen för inspanning av bottenplattan/gradskivan som används vid vindtunneltester av den aktuella bussmodellen. Observera att en träbit saknas i det nedre-högra hörnet.	33
4.1	Reynoldssvep 0° för buss i vindtunnel. Bild hämtad från MATLAB.	36
4.2	Resultaten av de fem repetitiva testerna vilka gjordes för att säkerställa resultaten för dragkoefficienten. Bild hämtad från MATLAB.	37
4.3	Resultaten av de fem repetitiva testerna vilka gjordes för att säkerställa resultaten för lyftkoefficienten. Bild hämtad från MATLAB.	37
4.4	Dragkoefficienter vid fyra uppställningar och fyra olika fläktinställningar för vindtunneln. Vindriktning rakt mot bussens front. Bild hämtad från MATLAB.	38
4.5	Lyftkoefficienter vid fyra uppställningar och de fyra olika inställningarna för vindtunneln. Vindriktning rakt mot bussens front. Bild hämtad från MATLAB.	39
4.6	Drag- och lyftkoefficienter från beräkningar i CFD med turbulensmodellen $k - \varepsilon$. Se tabell 4.2 för numeriska värden. Bild hämtad från MATLAB.	40
4.7	Drag- och lyftkoefficienter från beräkningar i CFD med turbulensmodellen $k - \omega$. Se tabell 4.2 för numeriska värden. Bild hämtad från MATLAB.	40
4.8	Tryckfördelning i transparent volym nära bussen. I denna beräkning är medelvärdet av y^+ ca. 54.2, samt använder 5 300 000 celler totalt. I fältet illustreras tryck som är mindre än normaltrycket. Bild hämtad från STAR-CCM+.	42
4.9	Tryckfördelning i transparent volym nära bussen. I denna beräkning är medelvärdet av y^+ ca. 3.87, samt använder 26 800 000 celler totalt. I fältet illustreras tryck som är mindre än normaltrycket. Bild hämtad från STAR-CCM+.	43
4.10	C_D från mätningar och beräkningar med vindtunnelinställningen 0.8 ratio och vindriktning rakt mot bussens front. Bild hämtad från MATLAB.	44

Tabellista

3.1	Konvergenskriterierna som används i beräkningarna. För att stoppa beräkningen med en AND typ krävs att alla andra AND är uppfyllda, medan ett kriterium med OR typ kan stoppa beräkningen självt. I detta fall används OR typ för felsökning, då beräkningarna når orimliga resultat.	22
4.1	Resultat från förfiningsstudie av mesh. Dimensionslösa koefficienter anges med fyra värdesiffror och antalet celler anges avrundat till närmsta 100 000-tal.	34
4.2	De numeriska värdena tillhörande figur 4.6, 4.7. Deltabell ovan representerar beräkningar med $k - \varepsilon$ som turbulensmodell och deltabell nedan representerar beräkningar med $k - \omega$	41
A.1	Resultaterande drag- och lyftkoefficienter för buss i vindtunnel vid 0° och olika hastigheter (Reynoldssvep).	II
A.2	Dragkoefficienter för buss i vindtunnel vid 0° med alla tejpkonfigurationer.	II
A.3	Lyftkoefficienter för buss i vindtunnel vid 0° med alla tejpkonfigurationer.	II

1

Introduktion

Vid beräkning av aerodynamiska krafter använder sig ingenjörer av Computational Fluid Dynamics, eller CFD, vilket är en metod för att lösa strömningsmekaniska problem numeriskt med hjälp av en dator. Beroende på vilka antaganden som görs, vilken turbulensmodell som används och hur beräkningsnätet är konstruerat samt hur verklighetsanpassad en modell är, ger beräkningarna olika resultat. För att verifiera resultaten tas experimentell data fram, från exempelvis tester i vindtunnel. Den här studien ska undersöka de skillnader på aerodynamiska krafter vilka uppstår vid olika antaganden för datormodell och på ett problemorienterat sätt ta fram metoder som minskar skillnaden mellan simulering och vindtunnel.

I detta projekt kommer de datorbaserade beräkningarna att genomföras med hjälp av Siemens programvara STAR-CCM+ [14].

Projektet fokuserar främst på de aerodynamiska krafter som uppstår på en modell. Modellen som studeras i projektet är en nerskalad buss och de aerodynamiska krafterna uppkommer på denna genom anströmning av luft. För att kunna jämföra våra resultat med annan data översätts krafterna till dimensionslösa koefficienter. Nedan följer en kort introduktion till de koefficienter projektet har störst fokus på.

Inom strömningsläran är dragkoefficienten C_D en dimensionslös storhet vilken används för att mäta motståndet ett objekt med en specifik hastighet upplever i en fluid. Likaledes ges även lyftkoefficienten vilken har den dimensionslösa beteckningen C_L och relaterar till kraften som påverkar normalt mot strömningsriktningen.

Norges Vegvesen, trafiksäkerhetsverket i Norge, lade genom sitt forskningssamarbete tillsammans med institutionen Mekanik och Maritima Vetenskaper (M2) grunden för projektet år 2019, då de framförde ett projektarbete till masterprogrammet Automotive Engineering [8]. Projektet syftade till att undersöka hur fordon uppträdde under hård sidvind. I samband med detta konstruerades en buss vilken skulle testas både i en vindtunnel samt beräknas numeriskt. Det upptäcktes då att storleksordningen på de relevanta aerodynamiska koefficienterna från vindtunneltesterna avvek väsentligt från de numeriskt beräknade koefficienterna, även om trenderna var likartade. Testerna genomfördes med modellen i olika vinklar mot vindens riktning, från rak motvind, 0° , till rak sidvind, 90° , i steg om 5° . Skillnaden i C_D mellan beräkningarna och vindtunneldata uppgick till ~ 250 counts, eller $0.025 C_D$, under hela cykeln och $\Delta C_L \sim 100$ counts fram till 50° , för att sedan divergera mycket mer än det. En count motsvarar här då en tusendels förändring i de aerodynamiska koefficienterna.

På grund av de stora avvikelserna mellan de dimensionslösa koefficienterna skrevs ett kandidatarbete år 2021 [2], vilket syftade till att jämföra beräkningsdata med data från experimentella vindtunneltester mer noggrant. Detta projektet var också i samarbete med Norges Vegvesen för undersökning av krafter vilka uppkommer vid starka sidvindar. Resultatet uppvisade fortsatt att skillnaderna var stora för de dimensionslösa koefficienterna trots att det gjordes förfiningar hos vindtunnelmodellen, för att försöka efterlikna den fysiska vindtunneln så mycket som möjligt. Lärdomarna från det arbetet ledde således till detta kandidatarbete år 2022, vars explicita syfte är att undersöka orsakerna bakom de stora magnitudskillnaderna mellan krafter uppmätta i vindtunnel och beräknade i CFD.

Med ovannämnda orsaker kommer skillnaderna att studeras vidare under det här projektet. Den analyserade datan kommer bestå av beräkningar i CFD och mätningar i Chalmers vindtunnel. Specifikt kommer det att studeras huruvida vindtunnelns geometri påverkar resultatet. Projektet har dessutom fått tillgång till äldre CAD-modeller av vindtunneln samt bussmodellen, vilken är projektets testobjekt. CAD-modellerna kommer att uppdateras för att därefter kunna studera ifall mer precisa modeller förbättrar resultaten av drag- och lyftkraften.

1.1 Syfte

Projektet syftar till att jämföra numeriska beräkningar i CFD, där en modell av den fysiska vindtunneln är domänen, med experimentella mätningar i vindtunneln. Specifikt jämförs aerodynamiska koefficienter vid dessa mätningar. För datorberäkningarna skall den befintliga CAD-modellen uppdateras så att modellen efterliknar den fysiska vindtunneln, och bussmodellen kommer modelleras statistiskt, alltså utan rörlig mark eller rullande hjul, vilka kommer vara förhållandena under mätningar i den verkliga vindtunneln.

1.2 Frågeställningar

Med bakgrundsbeskrivning och syftesformulering till grund sammanställs här frågeställningar vilka ska besvaras under projektets gång.

- Vilka skillnader fås i dragkoefficienter mellan experimentell och numerisk data?
- Vilka skillnader fås i lyftkoefficienter mellan experimentell och numerisk data?
- Vad blir skillnaderna i drag- och lyftkraft med respektive utan ytterligare detaljer i CAD-modellen av vindtunneln och testobjektet, såsom hål och ytojämnheter?

1.3 Avgränsningar

De tester projektet ska genomföra avgränsas av olika faktorer. Främst består avgränsningarna av förenklingar vilka projektgruppen har bestämt för att kunna genomföra projektet på ett effektivt sätt samt de resurser gruppen har till förfogande. Dessa avgränsningar presenteras nedan:

Projektet kommer att använda ett testobjekt, en buss, vilket begränsar projektet på så vis att den insamlade och analyserade data inte kommer kunna appliceras på mer än specifikt detta testobjekt. Därmed kommer resultaten från detta projekt endast kunna jämföras med den data från de båda tidigare projekten, år 2019 och 2021, som samlats med samma bussmodell.

En annan avgränsning för projektet kommer vara att anströmningen av luft mot bussen kommer antas vara stationär och projektet kommer endast att använda tidsmedelvärderande metoder, det vill säga inga transienta metoder i beräkning med CFD. Dessa avgränsningar kan påverka resultatet men genomförs för att förenkla arbetet för projektgruppen. Avgränsningen medför att färre beräkningar behöver genomföras samt gör så att vissa matematiska modeller kan appliceras på projektet.

Vindtunneln för de experimentella testerna är vindtunneln vilken är lokaliserad på Chalmers, Johanneberg. Vindtunneln är utrustad med en våg, vilken mäter krafter och moment. Vågen kan dessutom roteras upp till 90 grader. Plattan, monterad ihop med prototypen, kan däremot inte användas med rörligt underlag. Anledningen till detta är att prototypens infästning i vågen sitter i bussens hjul. På grund av detta kommer de experimentella testerna vara begränsade till att vara statiska, alltså med stillastående underlag och hjul.

De aktuella anströmningsvinklarna för bussmodellen är endast två stycken, 0° och 90° , då projektgruppen endast kollar på rak anströmning och rent sidvindsförhållande. Vindastigheten för både beräkning och mätning är experimentellt framtagen och kommer vara bestämd till 30 m/s genom alla beräkningar och mätningar. Hastigheten bestämdes efter diskussion kring det genomförda experimentella testet.

2

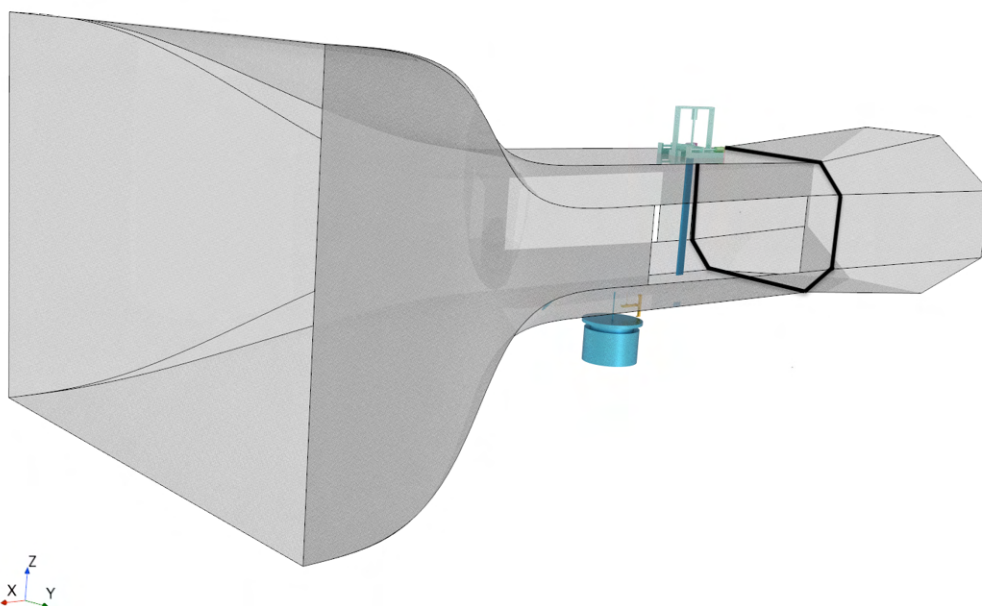
Teori

I följande avsnitt förklaras de teorier vilka används under olika delar i projektet för att ge vidare förståelse gällande projektets utförande arbetsgång. Inledningsvis introduceras vindtunneln och de olika berörda fysikaliska fenomenen och därefter förklaras teorin bakom flödessimuleringarna.

2.1 Vindtunnel

Vindtunneln är en essentiell del i projektet då den används både i de praktiska testerna samt matematiskt beräknas i CFD. Med den anledningen förklaras teorin bakom vindtunneln.

En vindtunnel drivs av en kraftfull fläkt vilken genererar ett luftflöde. Luftflödet styrs därefter genom tunneln mot en testsektion där det genomförs olika mätningar på ett placerat testobjekt. I figur 2.1 visas en bild på hur Chalmers vindtunnel är uppbyggd. Den strömmande luften demonstrerar på testobjektet hur olika aerodynamiska krafter och moment kommer att påverka objektet ute i praktiken, exempel på testobjekt kan vara fordon [6].



Figur 2.1: CAD-modell av Chalmers vindtunnel med vägen i blått, travers systemet i turkost samt breather sloten i svart. Bild hämtad från STAR-CCM+.

I detta projekt används Chalmers vindtunnel. Denna specifika vindtunnel är en halvsluten slingtunnel, byggd 1964, och har under åren utvecklats för att hålla jämna steg med nuvarande teknik [12]. Vindtunneln drivs av en 170 kilowatts motor vilken driver cirkulationsfläkten samt en 80 kilowatts fläkt vilken kontrollerar temperaturen i vindtunneln genom att fläkten styr kylflödet. Tunneln arbetar vid atmosfärstryck med en tryckåtervinning i form av ett breather slot, vilket är placerat nedströms relativt testsektionen. Tryckåtervinning är förhållandet mellan det genomsnittliga totala trycket vid inloppet jämfört med det totala trycket i den fria strömmen [11]. Höga värden för tryckåtervinning indikerar på bättre inloppsprestanda och det maximala beloppet vilket kan återvinnas är 1.0, det vill säga totalt atmosfärstryck.

Inte bara tryckskillnader ger upphov till skillnader mellan verklig och simulerad data, utan även turbulensnivåerna i vindtunneln kan orsaka differensen. Under normala tillstånd uppstår låga turbulensnivåer i vindtunneln och det går dessutom att installera ett galler vid inloppet till vindtunneln för att öka turbulensnivåerna [12]. Turbulensnivåerna kan fluktuera vilket leder till att ett medelvärde används för att förenkla beräkningarna. I just denna vindtunnel kan turbulensnivåerna variera mellan 0.1% och 4% [3]. Utöver att montera in ett galler för att öka turbulensnivåerna går det dessutom att installera ett rullgolv med gränsskiktssug i vindtunneln [12], vilket emellertid inte kommer användas under projektets gång. Gränsskiktssug är en gränsskiktsteknik där en luftpump används för att extrahera gränsskiktet [9]. Gränsskiktet, avsnitt 2.6, uppstår då en fluid med en viss hastighet anströmmar ett statiskt objekt eller en yta, men detta är inte fallet i verkligheten. I verkligheten är det fordonets rörelse framåt som ger upphov till luftmotståndet, men gränsskiktseffekterna behöver inte elimineras i detta fall då även datorberäkningarna sker i statiskt tillstånd. I vindtunnelns testsektionen finns flera monteringspunkter samt ett traverssystem för att kvarhålla geometrier och mätanordningar. Traverssystemet illustreras i bått i figur 2.1 och är placerad i taket ovanför testsektionen. Efter testsektionen finns ett breather slot vilket är en öppning runt vindtunnelns hölje för att utjämna trycket samt temperaturen i vindtunneln. Breather sloten är svartmarkerad i figur 2.1. Vågen vilken mäter alla krafter och moment i vindtunneln är också blåmarkerad men placerad under vindtunnelns golv i figur 2.1.

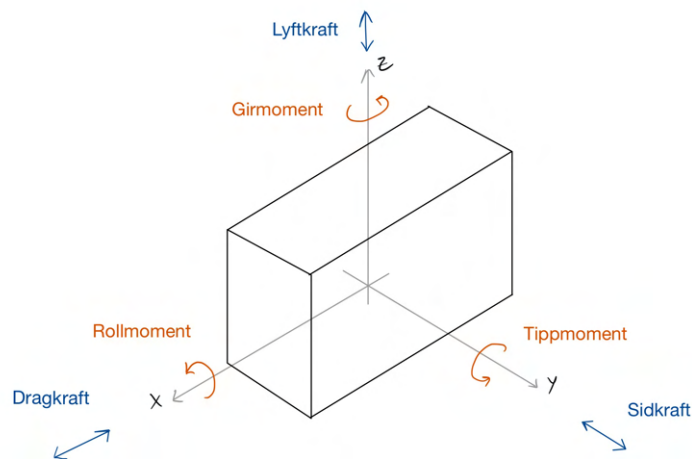
Enligt A. Vdovin (personlig kommunikation, 2022, 4 maj) har vindtunneln fyra olika inställningar. Dessa är: 0.8 ratio, zero static pressure, advanced 0.8 ratio samt advanced zero static pressure. Inställningarna styr mängden tillförd luft till vindtunneln utifrån samt mängden luft uttagen bakom vindtunnelns diffusor. Syftet med inställningarna är att kontrollera trycket i vindtunnelns testsektion samt kontroll över luftens temperatur.

2.2 Dimensionslösa koefficienter

Varje kropp, oavsett vilken form, upplever krafter och moment om de vistas i en anströmmande fluid. Om kroppen har godtycklig form och orientering kommer flödet att utöva krafter och moment vilka kan komposantuppdelas längs de tre koordinataxlarna x , y och z . Kraften längs x -axeln kallas luftmotstånd eller dragkraft och

momentet kring denna axel benämns rullande moment. Luftmotståndet är en flödesförlust för systemet och måste därmed övervinnas ifall kroppen ska förflyttas mot strömmen. Kraften längs y-axeln betecknas sidokraft och kraften längs z-axeln benämns lyftkraft. Sidokraften är varken en förlust eller vinst för systemet och momentet runt y-axeln kallas tipp. Lyftkraften betecknar den kraft vilken bär objektets vikt och momentet runt z-axeln namnges gir, se figur 2.2.

Koordinatsystemet är orienterat så att luftmotståndet verkar parallellt med föremålets rörelseriktning, sidokrafter verkar vinkelrätt mot kroppens rörelseriktning men parallellt med marken och lyftkraften verkar vinkelrätt mot rörelseriktningen och marken [21]. Detta projekt kommer fokusera på lyft och dragkraften, där dragkraften är riktad i negativt x-led i STAR-CCM+ och i positivt x-led vindtunneln. Gällande lyftkraften är den alltid riktad i positivt z-led.



Figur 2.2: Krafter och moment på komponentform.

Krafternas storlek beror på flera parametrar; geometri, vinkel mot flödet och flödesförhållanden. De ovannämnda parametrarna påverkar utöver krafterna också de dimensionslösa koefficienterna.

2.2.1 Reynoldstal

Reynoldstalet är ett dimensionslöst tal vilket används för att beskriva förhållandet mellan momentkrafter och viskösa krafter vilka uppstår i en fluid och vilka respektive beskriver olika strömningsfall [21]. Främst beräknas Reynoldstalet för att ta reda på ifall en fluid har laminärt eller turbulent flöde. Ett mycket lågt Reynoldstal innebär en trögflytande kryprörelse där tröghetseffekterna är försumbara. Låga Reynoldstal indikerar att ett flöde är strukturerat och ordnat, även kallat laminärt. Ett högt tal innebär att flödet är oförutsägbart och kaotiskt vilket också benämns turbulent. Geometrin, vilken strömningen sker kring, samt dess omgivning avgör

storleksordningen på Reynoldstalet. Utifrån storleksordningen kategoriseras flödet antingen laminärt eller turbulent. För strömning i rör går gränsen för turbulent strömning vid $Re \approx 2400$, medans den för öppna ytor går vid $Re \approx 10^6$.

Reynoldstalet beräknas enligt följande formel:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (2.1)$$

2.2.2 Dragkraftskoefficient

Inom strömningsläran är C_D en dimensionslös storhet vilken används för att mäta motståndet ett objekt med en viss hastighet upplever i en fluid [21]. C_D beräknas med hjälp av luftmotståndet, F_D , enligt ekvation (2.2).

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (2.2)$$

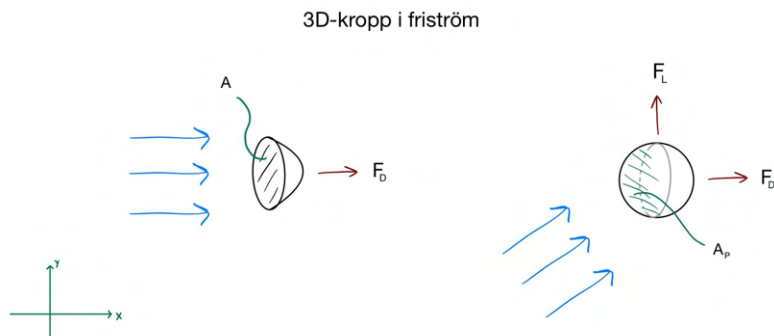
Dragkraftskoefficienten är en omskrivning av luftmotståndet och således representerar koefficienten förhållandet mellan luftmotståndet och kraften vilken alstras av det dynamiska trycket multiplicerat med referensarean [17]. Referensarean i dragkraftskoefficienten varierar beroende på vilken geometri mätobjektet har, se figur 2.3. Arean är normalt en av tre varianter; frontalarea, planformsarea eller arean vilken är i kontakt med fluiden [21].

Teorin bakom luftmotstånd försvåras av förekomsten av separation [21]. Gränsskiktsteori kan förutspå var separationen sker, men teorin kan inte korrekt uppskatta tryckfördelningen i separationsregionen. En skillnad i tryck inom regionen, ett högt tryck i den främre stagnationen och ett lågt tryck i den bakre delen av separationen, skapar ett stort bidrag till luftmotståndet. Bidraget, tryckmotstånd, adderat med friktionsmotståndet för objektet i fluiden kan också skapa luftmotstånd, se ekvation (2.3).

$$C_D = C_{D,press} + C_{D,fric} \quad (2.3)$$

Det relativa bidraget av friktions- och tryckmotstånd beror på föremålets geometri och tjocklek. Ett tunt föremål, exempelvis en plan platta, exponeras enbart för friktionsmotstånd.

Likt lyftkraftskoefficienten, avsnitt 2.2.3, kan dragkraftskoefficienten bestämmas experimentellt med hjälp av en vindtunnel [17]. I vindtunneln bestäms hastigheten och densiteten samt vilken area mätningarna ska genomföras på vilket leder till att luftmotståndet kan beräknas. Genom att därefter använda ekvation (2.2) bestäms dragkraftskoefficienten experimentellt. När koefficienten är beräknad går det därefter att förutspå luftmotståndet vilket kommer uppstå då en annan hastighet, densitet och area används.



Figur 2.3: Uppkomst av drag- och lyftkraft vid olika typer av kroppar.

2.2.3 Lyftkraftskoefficient

Lyftkraftskoefficienten betecknas C_L och är en aerodynamisk koefficient vilken relaterar lyftkraften till geometrin under påverkan av aerodynamiska krafter [21]. Lyftkoefficientens ekvation är en omskrivning av lyftkraften och därmed uttrycker koefficienten förhållandet mellan lyftkraften och kraften producerad av det dynamiska trycket multiplicerat med referensarean [18], se figur 2.3.

För att experimentellt bestämma ett värde på lyftkoefficienten används kontrollerade miljöer såsom en vindtunnel. I vindtunneln ställs hastighet och densitet in för att få exakta värden på de två variablerna. Sedan väljs ett testobjekt med känd area vilken den resulterande lyftkraften mäts på. Genom att därefter använda ekvation (2.4) bestäms lyftkoefficienten experimentellt. När lyftkoefficienten är beräknad går det att förutspå vilken lyftkraft som kommer uppstå då en annan hastighet, densitet och area används. Lyftkoefficienten beräknas enligt ekvation (2.4), där F_L är lyftkraften.

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (2.4)$$

2.3 Navier-Stokes ekvationer

Navier-Stokes ekvationer beskriver viskösa fluiders rörelse och används för att beskriva en vätskas hastighet och tryck [21]. Ekvationen används för en newtonsk, inkompressibel fluid och flödet beskrivs enligt ekvation (2.5).

$$\rho\left(\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla)\mathbf{V}\right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \rho \mathbf{g} \quad (2.5)$$

där \mathbf{g} är tyngdaccelerationen och ekvationen kan skrivas i x-, y- och z-led eftersom ekvationen är komponerad av ∇ . Ekvationen i x-led ges i ekvation (2.6).

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \quad (2.6)$$

2.4 Bernoullis ekvation

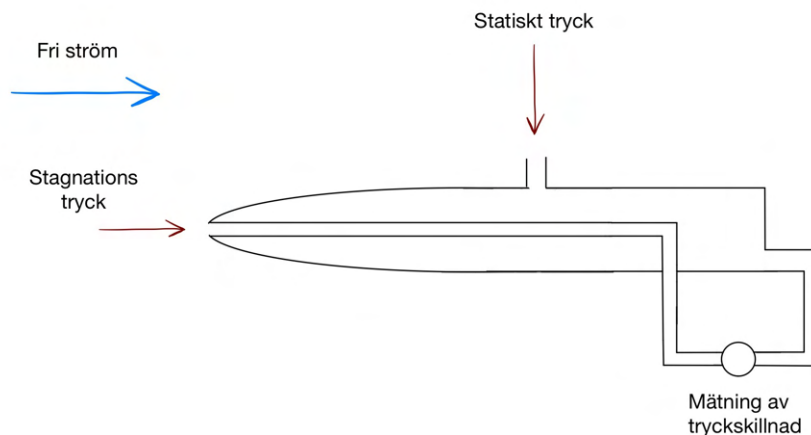
För en fluid med tidsberoende, friktionsfritt och inkompressibelt flöde vid en viss höjd kan tryck och hastighet beräknas med Bernoullis ekvation (2.7), vilket ges på grund av att energin inte förändras vid två olika punkter längs en strömningslinje [21]. Endast tryck, höjd eller hastighet förändras.

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gh_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gh_2 \quad (2.7)$$

2.5 Pitot-rör

Pitot-rör används vid beräkning av lokalt tryck, vilket innefattar mätning av stagnationstryck och statiskt tryck [21]. Stagnationstrycket p_0 ges för rörets sida mot strömriktningen och mäter trycket då fluiden strömmar mot röret och dess hastighet stannar av. Det statiska trycket p_s i fluiden mäts längs ett hål i sidan av röret. Vid antagande av inkompressibelt, stabilt och friktionsfritt flöde beräknas tryckskillnaden med Bernoullis ekvation (2.7) och ger upphov till ekvation (2.8).

$$p_0 = p_s + \frac{\rho V_0^2}{2} \iff V = \sqrt{\frac{2(p_0 - p_s)}{\rho}} \quad (2.8)$$



Figur 2.4: Tvärsnitt av ett Pitot-rör. Hastigheten avstannar vid mynningen, och ger upphov till stagnationstrycket. Tryckskillnaden mäts mellan det statiska trycket, p_s i friströmmen och stagnationstrycket p_0 , vilket då tillsammans med friströmshastigheten V_0 kan ge hastigheten enligt (2.8).

2.6 Gränsskikt

Inom strömningsmekanik är gränsskiktet ett tunt lager av fluid närmast en fast yta, alternativt en fluid med en annan densitet, i samband med strömning. Gränsskiktet uppstår eftersom fluidens hastighet avtar nära ytan för att precis vid ytan stå helt stilla, vilket kallas no-slip tillstånd. Skiktets tjocklek varierar beroende på det inträffande strömningsfallet; laminärt eller turbulent. För ett flöde längs en plan platta betecknas gränsskiktets tjocklek δ [21]. Övergången mellan laminärt och turbulent skikt inträffar vid $Re_x = 5 \cdot 10^5$. Tjockleken δ definieras av platsen för punkter där hastigheten parallellt med den plana plattan når 99% av hastigheten i den fria strömmen. I det laminära området kan gränsskiktets tjocklek bestämmas till:

$$\frac{\delta}{x} = \frac{5}{Re_x^{1/2}} \quad (2.9)$$

där Re_x kallas för det lokala Reynoldstalet av flödet där $x = L$, alltså Reynoldstalet vid en specifik punkt. Gränsvärdena för Reynoldstalet i det laminära fallet är $10^3 < Re_x < 10^6$ [21].

Gränsskiktets tjocklek för det turbulenta området bestäms till:

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0.16}{Re_x^{1/7}} \quad (2.10)$$

där gränsvärdena för Reynoldstalet är $10^6 < Re_x$.

2.7 Turbulensmodellering

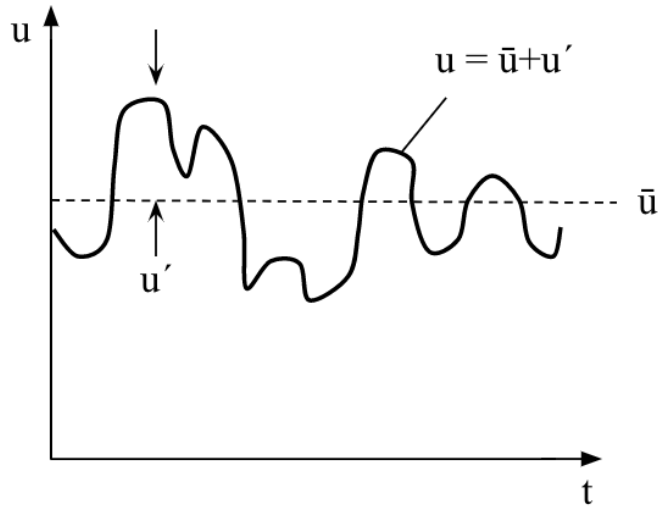
Turbulensmodellering är sammanställning och nyttjande av en matematisk modell för att förutsäga effekterna av turbulens. När Navier-Stokes ekvationer löses numeriskt kan modeller användas för att hantera turbulensen och de modeller vilka används i detta projekt presenteras nedan.

2.7.1 Reynolds-averaged Navier-Stokes

Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS, är en simplificering av Navier-Stokes ekvationer och är en metod för att modellera turbulent flöde. I turbulenta flöden varierar fluidens storheter snabbt och slumpmässigt i både tid och rum [7]. Det turbulenta flödet kan delas upp i tidsmedelvärderade och fluktuerande termer vilka betecknas \bar{u} respektive u' där u i detta fallet är momentan hastigheten. Andra storheter vilka också kan delas upp är: tryck, temperatur och densitet men i detta projekt kommer fortsättningsvis endast hastighet och tryck vara relevant. Den fluktuerande termen definieras av avvikelserna för momentan hastigheten från dess medelvärde och definieras enligt ekvation (2.11). Tidsmedelvärdet för en turbulent funktion definieras enligt ekvation (2.12) vilket också visas i figur 2.5 [21].

$$u' = u - \bar{u} \quad (2.11)$$

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt \quad (2.12)$$



Figur 2.5: Illustration av fluktuerande termer för hastighet.

där T är en medelvärdesperiod vilken anses vara längre än någon signifikant period av själva fluktuationerna. Genom att infoga samband (2.11) i ekvationen för Navier-Stokes (2.5) resulterar RANS-ekvationen i (2.13) då ekvationen implementeras i x -led.

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \overline{(u'u')}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{(u'v')}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{(u'w')}}{\partial z} \right) \quad (2.13)$$

Den sista termen i ekvation (2.13) presenterar den så kallade turbulenta spänningstensorn, vilken måste beräknas för att kunna lösa ekvationen [7]. Termen presenterar den fluktuerande delen av flödet och kan inte försummas då medelvärdet inte är tillräckligt för att beskriva flödet korrekt. För att approximera termen används istället turbulensmodeller, vilket förenklar beräkningar.

2.7.2 $k - \varepsilon$ modellen

Turbulensmodellen $k - \varepsilon$ är en av de mest använda turbulensmodellerna och bygger på RANS, ekvation (2.13). $k - \varepsilon$ modellen beräknas för två variabler, k och ε . k är den turbulenta kinetiska energin och ε är dissipationstakten för k [7]. k bestämmer därmed energin i turbulensen medan ε bestämmer storlekarna på virvlarna vilka bildas inom turbulens.

Fördelen med $k - \varepsilon$ modellen är att metoden har en bra konvergenshastighet, ett relativt lågt minneskrav samt fungerar bra för externa flödesproblem kring komplexa geometrier [20]. Nackdelarna med modellen är att beräkningarna i flödesfält vilka uppvisar ogynnsamma tryckgradienter eller stark krökning inte är särskilt noggranna. Modellen har därmed problem med att skildra beteendet hos flödet nära väggar.

2.7.3 $k - \omega$ modellen

Turbulensmodellen $k - \omega$ innefattar, likt $k - \varepsilon$, den kinetiska energin k . Utöver den kinetiska energin består modellen av termen ω , vilken beskriver specifik dissipation. $k - \omega$ modellen är mer tillförlitlig nära väggar jämfört med $k - \varepsilon$ modellen och modellen arbetar bra vid måttliga tryckgradienter men inte när separationen är tryckinducerad [7]. Nackdelen med $k - \omega$ är att modellen inte fungerar tillräckligt bra längre ut från väggen där flödet strömmar fritt vilket har resulterat i att en ny turbulensmodell har utvecklats, $k - \omega$ SST, vilken använder element från både $k - \varepsilon$ och $k - \omega$ metoderna.

2.7.4 $k - \omega$ SST modellen

$k - \omega$ SST (shear stress model) modellen är en kombination av $k - \varepsilon$ och $k - \omega$ i den fria strömmen respektive nära väggarna [20]. Beroende på avståndet till väggen beräknar modellen automatiskt ut vilken av $k - \varepsilon$ -och $k - \omega$ modellen vilken ska användas [7]. I gränsskiktet där modellerna möts används en tangenshyperbolicus-funktion vilken används för att få en smidig övergång mellan $k - \varepsilon$ och $k - \omega$. Utifrån hur $k - \omega$ SST angriper ekvationerna går det att förutspå var separationen kommer att inträffa. Nackdelen med $k - \omega$ SST är att modellen inte ger tillräckligt med information angående turbulensen eftersom modelleringen till stora delar består av fluktuationer.

2.8 CFD

För att numeriskt beräkna aerodynamiska krafter används Computational Fluid Dynamics, CFD [19], vilket syftar till att modellera verkligheten och beräkna ett fysisk utförande. Med CFD användes en 3D-modell vilken består av celler vilka separat numeriskt beräknas, alltså skapas en mesh över en modell. I detta projekt används Siemens program STAR-CCM+ vilket löser flödesproblem med hjälp av Navier-Stokes ekvationer i en definierad kontrollvolym.

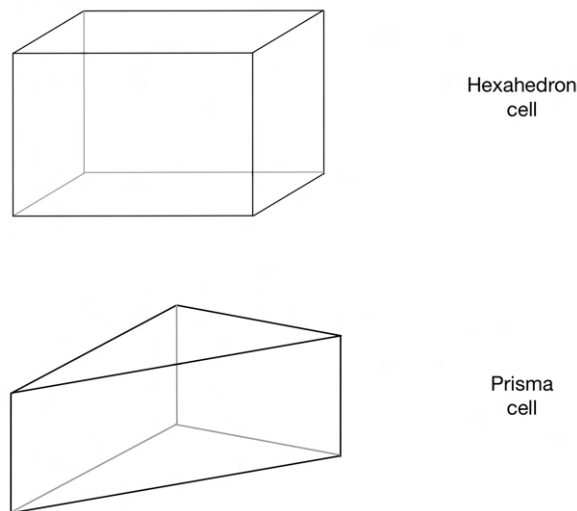
2.8.1 Mesh

En mesh består av flera celler vilka tillsammans utformar en modell. Desto fler celler en modell består av desto fler beräkningspunkter ges över modellen. Vid beräkning av strömningsproblem finns inte alltid en analytisk modell att tillgå, därför använder man sig av en numerisk modell. Den numeriska modellen struktureras med ett begränsat antal beräkningspunkter på grund av begränsad beräkningskraft och tid

[15]. Vid ett visst antal celler kan ett resultat anses vara godtyckligt för att modellera det studerade fysiska fenomenet genom att önskad noggrannhet uppnåtts, se avsnitt 2.8.3.

2.8.1.1 Hexaedra celler

I STAR-CCM+ finns alternativet att använda typerna tetraedriska, hexaedriska och polyedriska celler. Denna studie använder sig av hexaedra celler då dessa kan delas jämt utan att få problem med meshkvalité, samt har ytor som ligger parallellt med eller normalt mot flödesriktningen i beräkningsdomänen [4]. Figur 2.6 illustrerar en hexaedrisk cell.



Figur 2.6: Hexaedra och prismatiska celler.

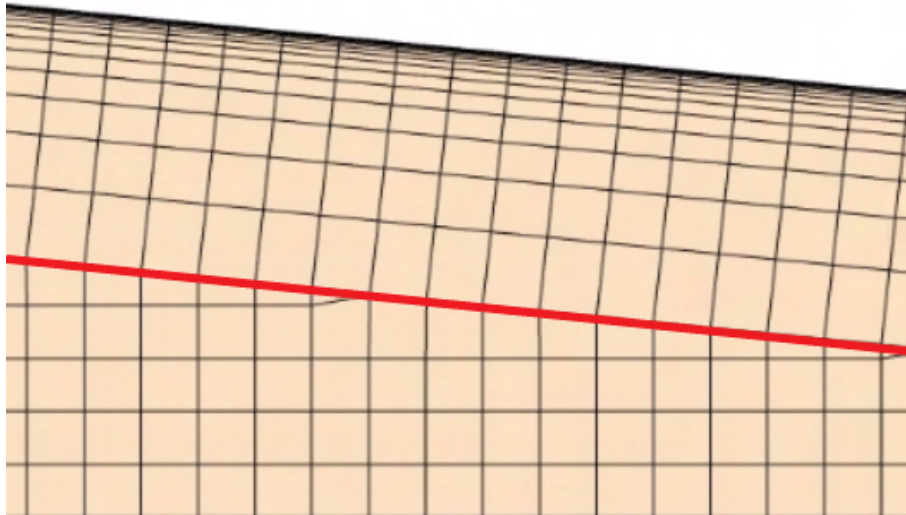
2.8.1.2 Prisma celler

Vid beräkningar krävs ofta lokal noggrannhet hos en mesh där det till exempel går runt ett hörn eller omfattar en krökt geometri. Vid dessa tillfällen blir mesh av rektangulär form ofta skeva och det är därför önskvärt att använda sig av en triangulär form på meshen [4], se figur 2.6.

2.8.2 Prismalager och y^+

För att korrekt beräkna effekterna av flöde vid en vägg i CFD används *prismalager*. Dessa syftar till att öka upplösningen i den hastighetsgradient vilken uppkommer mellan väggens *noslip*-tillstånd, alltså att hastigheten precis vid vägen är 0, och friströmshastigheten. Regionen med prismalager karaktäriseras av det första lagrets

tjocklek normalt mot väggen, antalet lager och den geometriska skalningen mellan lager. Den geometriska skalningen bestämmer förhållandet mellan höjden på ett lager och det nästkommande lagret, och är typiskt runt 1.2, alltså ökar höjden mellan moderna med 20% per lager. I figur 2.7 illustreras hur en region med prisma-layer typiskt kan se ut.



Figur 2.7: Tvärsnitt av prisma-layer. Prisma-layer, ovanför den röda linjen i bilden, läggs ortogonalt mot väggar. Den vanliga meshen, under den röda linjen i bilden, ligger parallellt med koordinataxlarna i detta fall. I denna figuren är första lagrets tjocklek $25 \mu\text{m}$ och lagrets totala tjocklek 7.5 mm . Då totalt 14 lager används blir den geometriska skalningsfaktorn ungefär 1.37. Bild hämtad från STAR-CCM+.

2.8.3 Konvergens

I detta projekt används tre olika metoder för att fastställa konvergens. Dessa metoder är följande; global obalans, residualer samt fria parametrar.

2.8.3.1 Global balans

För att säkerställa att systemet, vilket beräknas med hjälp av CFD, konvergerar används en metod vilken undersöker global balans. CFD beräknar kontinuitetsekvationen, vilken är ett uttryck för villkoret att massa varken kan skapas eller försvinna under ett strömningsförlopp. För att kontrollera att den slutliga lösningen bevarar villkoret för kontinuitetsekvationen beräknas systemets globala massbalans [1]. Den numeriska representationen vilken itereras fram kommer inte att resultera i ett värde av noll, däremot behöver resultatet vara tillräckligt nära noll för att lösningen ska anses vara konvergent.

2.8.3.2 Residualer

Residualen är ett av de mest grundläggande måtten på en iterativ lösnings konvergens eftersom metoden direkt kvantifierar felet i lösningen av ekvationssystemet. I en CFD-analys mäter residualen den lokala obalansen för en specifik variabel i varje kontrollvolym och därför kommer varje cell i modellen innefatta ett individuellt restvärde för varenda ekvation vilken löses. I en iterativ numerisk lösning kommer residualen inte att resultera i ett värde av noll men ett lägre värde resulterar i en mer numeriskt exakt lösning. För CFD anses lösningen vara konvergerad om residualerna är av magnitud 10^{-4} eller mindre [1], men nivåerna kan variera beroende på hur exakt lösningen önskas vara. De bestämda nivåerna kallas för stoppkriterier. Stoppkriterierna bestäms så att iterationerna inte fortsätter i all oändlighet, utan istället stannar programmet när förändringarna i residualerna uppnår stoppkriterierna och därmed har konvergerat.

2.8.3.3 Fria parametrar

Att uppnå konvergens i CFD med hjälp av kvantiteter av intresse innebär att lösningsfältet, under steady state-tillstånd, inte bör oscillera från iteration till iteration för att en analys ska anses vara konvergerad [1]. Genom att studera parametrarnas variation av medelvärdet under de senaste iterationerna går det att säkerställa om konvergens har uppnåtts då parametrarna periodvis kan oscillera. Om medelvärdet inte förändras under ett förbestämt antal iterationer går det att avgöra om konvergens har uppnåtts. Parametrarna vilka övervakas är integrerande storheter, kraft i detta projektet. En konvergerad lösning behöver däremot inte vara rätt om den är en biprodukt av felaktiga randvillkor och därmed måste alla modeller kontrolleras noggrant vilket inkluderar en fin mesh för modellen.

2.8.4 Väggfunktioner

I ett turbulent flöde nära en vägg består flödet av tre regioner [21]. Regionen närmast väggen domineras av viskösa skjuvspänningar, regionen i mitten består av både viskösa och turbulenta skjuvspänningar medan den yttre regionen domineras av turbulenta skjuvspänningar. Den mellersta regionen består därmed av ett överlapp och där kan hastigheter beräknas enligt log-lagen:

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y \cdot u^*}{\nu} \right) + B \quad (2.14)$$

där κ och B har approximativa värden av 0.41 respektive 5.0. Det dimensionslösa talet y^+ betecknar väggavståndet och beräknas enligt:

$$y^+ = \frac{y \cdot u^*}{\nu} \quad (2.15)$$

u^* , ekvation (2.16), benämns friktionshastighet och har storheten $[LT^{-1}]$, men egentligen är det ingen flödes hastighet. τ_w är skjuvspänningen vid väggen.

$$u^* = \left(\frac{\tau_w}{\rho} \right)^{1/2} \quad (2.16)$$

Log-lagen gäller i intervallet $30 < y^+ < 200$. Intervallet $y^+ < 5$ hänvisar till området där hastigheten u ges enligt:

$$\frac{u^*}{u} = \frac{y \cdot u^*}{\nu} = y^+ \quad (2.17)$$

Funktionen *All Y-plus treatment* i STAR-CCM+ är en hybridfunktion vilken försöker efterlikna höga värden av y^+ för grova mesh och låga värden av y^+ för fina mesh [16]. Denna funktion förenklar arbetet med att bestämma vilken turbulensmodell som kan användas för de olika y^+ värdena.

2.9 Fysiska tester

För att kunna jämföra koefficientresultat i CFD beräkningar med mätningar i den fysiska vindtunneln krävs vissa experimentella tester. Dessa tester används främst för att i slutändan kunna validera och jämföra resultaten mellan CFD och vindtunneltesterna.

2.9.1 Reynoldssvep

För att bestämma vilken vindhastighet testerna ska beräknas samt mätas med krävs ett Reynoldssvep. Metoden baseras på att experimentellt testa olika vindhastigheter när aerodynamiska koefficienter, luftmotståndskoefficienten i detta projektet, beräknas för att därefter analysera vid vilken hastighet C_D stabiliseras eller är oberoende av hastigheten [13].

2.9.2 Blockeringseffekt

Vid experimentella tester i en fysisk vindtunneln kan blockeringseffekten vara signifikant för testernas resultat [5]. Under tester i vindtunneln begränsar vindtunnelns väggar flödesfältet runt testobjektet vilket orsakar en lokal flödesacceleration, denna effekt kallas för fast blockering [10]. Effekten åstadkommer en symmetrisk tryckgradient och en ökning av det uppmätta luftmotståndet och dessutom påverkar den lokala flödesaccelerationen gränsskiktet runt objektet vilket resulterar i en ökning av gränsskiktets tjocklek kring bussens ytor. Vaken vilken utvecklas bakom bussen är trögflytande vilket bidrar till ytterligare en flödesacceleration och denna effekt benämns för vak-blockering. Effekten ger upphov till en asymmetrisk tryckgradient och en motsvarande ökning i luftmotstånd. För att undvika blockeringseffekten är det därmed essentiellt att dimensionera modellen vilken ska testas utifrån ett blockeringsförhållande [5]. För att försumma blockeringseffekten bör blockeringsförhållandet vara mindre än fem procent. Blockeringsförhållandet är förhållandet

mellan vindtunnelns- och modellens tvärsnittsarea vinkelrätt mot flödets riktning enligt följande:

$$Blockeringseffekt = \left(1 - \frac{A_{frontal}}{A_{tunnel}}\right)^{1.288} \quad (2.18)$$

3

Metod

I detta kapitel redogörs förbättringar av ärvda CAD-modeller, användningen av olika turbulensmodeller och slutligen appliceringen av kunskap från beräkningar till vindtunnelsimulationer.

3.1 Hantering av CAD-modeller

I projektet har två modeller från tidigare projekt använts: En bussmodell och en modell av Chalmers vindtunnel. Modellerna samt hur de har framtagits presenteras i följande stycken.

3.1.1 Bussmodell

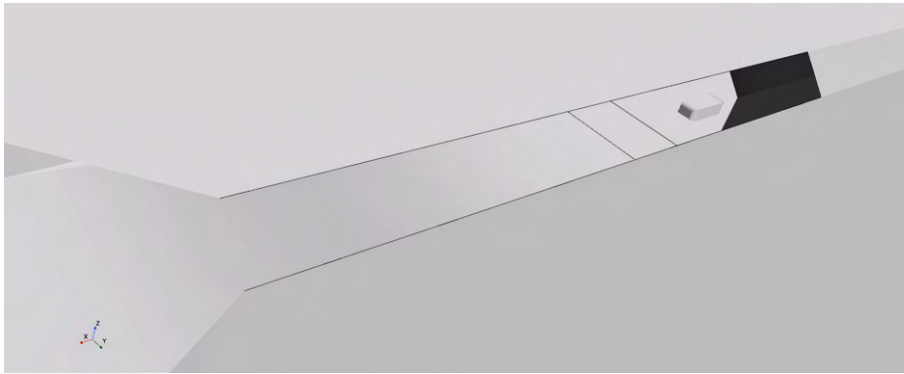
Bussmodellen framställdes 2019 i samband med ett projekt på dåvarande masterprogrammet Automotive Engineering, där fordon under höga sidovindar skulle undersökas. Modellen beskrivs mer ingående i refererad källa, men sammanfattningsvis tilldelades en modell som konstruerats utifrån olika modeller, vilken därefter simplificerades i CAD-programmet CATIA v5 [8].

Modellen hade efter projektet 2019 inträffat för någonting vilket är okänt för vårt projekt då bussmodellen hade små öppningar på somliga ställen. Öppningarna syntes initialt inte i CAD-programmet, men då modellen importerats in i STAR-CCM+ för att bli meshad uppkom diverse olika felmeddelanden. Därmed öppnades modellen upp i ett nytt program, Surface Repair-modul, vilket tydliggjorde att det fanns spetsfundiga öppningar i fronten av bussen, där modellen skulle delas upp för att 3D-printas. Problemet var inte enkelt att åtgärda, då sprickorna var så små att programmet hade svårt att upptäcka sprickorna, men med funktionerna 'Remove Gashes' och 'Merge Faces' kunde till sist en modell utan öppningar tas fram.

3.1.2 Vindtunnelmodell

Vindtunnelmodellens ursprung är inte känd för gruppen, men modellen togs fram år 2018. Modellen är troligen en förenklad modell av den riktiga vindtunneln då den saknar breather slot-avsnitt 2.1 och diverse hål. Den innehåller också testutrustning vilken inte används då bussen är där i dess ställe, så därmed fanns en del förbättringar att genomföra.

En mapp med diverse modeller från CAD-programmet Solidworks erhöles, dessa filtyper stöddes inte av STAR-CCM+, så först fick de konverteras till filformatet .STP för att kunna bearbetas. Efter det upptäcktes det att viss data gått förlorad då modellerna av den kompletta vindtunneln förbehandlats i ett ytterligare program, ANSA, och därför försvunnit i konverteringen till .STP formatet. Detta innebar än en gång att det fanns hårfina sprickor, se figur 3.1, vilka löpte längs tunnelns inlopp och testsektionens fönster. Dessa var dock lättare att åtgärda än bussmodellen, då en funktion 'Sew' kunde användas över hela modellen på en gång. Efter detta skulle alla stora hål täckas för, alltså inlopp (eng. *bellmouth*), diffusor och fönster. Detta gjordes i Surface Preparation-modulen, vilken används för att kontrollera tätheten på en modell.



Figur 3.1: Hårfin öppning i vindtunnelns inlopp på nära håll, där det är tydligt att det går att se tunnelns insida. Bild hämtad från STAR-CCM+.

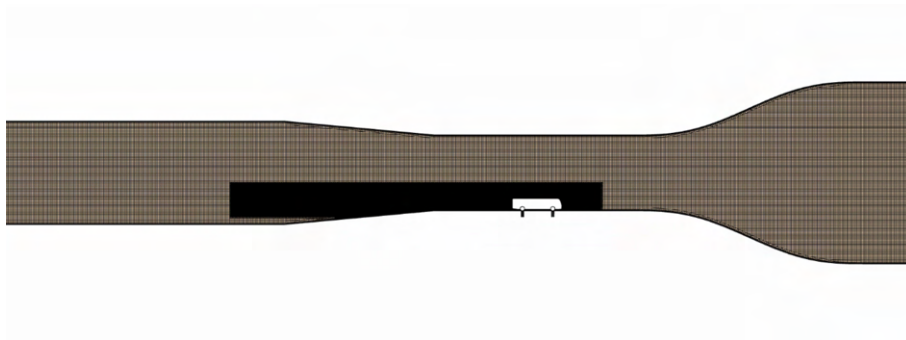
3.2 Meshing

Meshen byggs upp med inställningar i STAR-CCM+: *Surface remesher*, *trimmed cell mesh* och *prism layer* vilka används i kombination med områdesspecifika kontroller.

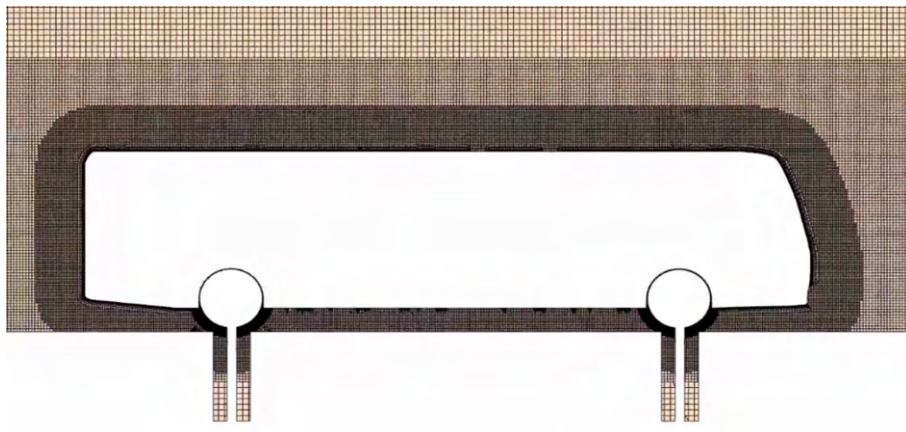
De områdesspecifika kontrollerna inkluderar volymkontroll, vilken hanterar cellstorleksminskning närmare intressanta objekt, och ytkontroll, vilken hanterar objekt-specifika prismalager och väggytans cellupplösning. Volymkontrollerna placeras utan större krav på precision i syfte att lägga högre upplösning på områden vilka tros ha större hastighetsgradienter. Detta sker i teorin bakom objektet vilket betraktas, där en separation uppstår, men också en bit före objektet, där inbromsning av fluiden sker. Ytkontrollerna används likt tidigare beskrivet för att uppnå gränsskiktinkludering, tjockleksförhållande och rätt y^+ , men dessa krav uppnås med olika parameterinställningar beroende på vilket del av objektet vilket betraktas.

För att uppnå jämn övergång av volym mellan celler används volymkontroller i utplacerade lådor. Fyra områden används i fallet beskrivet i figur 3.2, 3.3: Två lådor, en volym vilken följer bussens konturer och en volym vilken följer däckens konturer.

Prismalagren styrs med hjälp av första lagrets tjocklek ortogonalt mot väggen, lagrens sammanlagda tjocklek mot väggen och antalet lager vilket genereras. För att förhindra väldigt förvrängda celler modifieras dessutom väggytans cellupplösning till en mindre storlek. De tre inställningarna till prismalagren anpassas så att hela gränsskiktet vilket skapas vid väggen inkluderas, lagrens tjockleksförhållande till varandra hålls inom området $1.05 - 1.3$ och y^+ kontrolleras att vara inom sitt angivna område. I analyser där väggfunktioner används för att approximera skjuvkrafter på objekt bör y^+ hållas mellan 30 och 120, medan om dessa ej används bör y^+ hållas under 5. Även övergången från prismalagren till den hexaedra meshen kontrolleras i form av volymsrelation mellan generella meshen och den yttersta cellen på prismalagret. Anledningen för detta är att se till att gradienter representeras likartat utanför prismalagret som i det.



Figur 3.2: Tvärsnitt av mesh från situationen 'Buss i vindtunnel med detaljer'. Tvärsnittet är taget på bussens sida sådant att däckena framgår. I bilden syns den totala meshen, samt första förfiningsblocket. Bild hämtad från STAR-CCM+.



Figur 3.3: Samma situation som i figur 3.2 zoomat in på bussen. I bilden syns första förfiningsblocket (topp), andra förfiningsblocket, förfining som följer bussen och förfining som följer däckena. Bild hämtad från STAR-CCM+.

För att försäkra att resultatet är oberoende av meshen i resultatet kommer en *mesh refinement study* även genomföras, avsnitt 4.1, vilket innefattar en jämförelse av

resultat mellan samma mätvärden när cellstorleken i domänen varierar. Endast en situation väljs för denna analys och storleken varierar med en faktor $2^{\frac{1}{3}}$ för att ge en ungefärlig dubbling alternativt halvering av celler per förfiningssteg. Antalet celler vilka används anges i tabell 4.1.

3.3 Situationer vilka undersöks

För att modellera verkliga förhållanden med rimliga datorresurser sker beräkningar i tidsmedelvärderat tillstånd. Detta beräknas med RANS-ekvationer och turbulensmodellerna $k-\varepsilon$ och $k-\omega$ SST. Varje scenario beräknas med båda turbulensmodellerna för att analysera möjliga skillnader vilka kan uppkomma.

Då studien undersöker anledningar till skillnader mellan mätningar i vindtunnel och beräkningar i friström beräknas mellansteg i spektrat, vilka är:

- Tom vindtunnel
- Buss i friström
- Buss i vindtunnel
- Buss i vindtunnel med detaljer

Bussen beräknas med ankommande vind rakt framifrån i alla situationer. Detaljerna vilka innefattas är hål under bussens hjul, vilka förekommer i den verkliga vindtunneln i syfte att montera testobjektet på vägen.

För att hantera gränserna i beräkningen används gränsvillkoren *velocity inlet*, *pressure outlet*, *wall* och *symmetry plane* i till inlopp, utlopp, väggar och friströmsplan/symmetriplan respektive. Symmetriplanen används i synnerhet då situationen är horisontellt symmetrisk, vilket är fallet i alla situationer där vinden ankommer rakt framifrån. Anledningen till att en symmetrisk beräkning föredras är att tiden vilken krävs för att slutföra beräkningen i princip halveras då domänen halveras. Att göra situationen symmetrisk är godtyckligt likt den fulla situationen med de modeller för medelvärderad tid och turbulens vilken används.

I tidigare arbeten har beräkningar baserats på mesh med höga y^+ [2] och för att kontrollera dess innebörd beräknas fallet 'Buss i vindtunnel' både med höga och låga y^+ . Situationerna bedöms vara tillräckligt likartade för att kunna applicera slutsatserna i denna analys på resterande situationer.

I fallet där vindtunneln används kommer fluidhastigheten i inloppet inte vara densamma som fluidhastigheten i testregionen på grund av konvektiv acceleration. För att använda korrekta fluidhastigheter i testregionen på vindtunneln väljs då inflödeshastigheten efter masskonservering¹, enligt ekvation (3.1).

¹Antaganden som inkluderas i denna approximation är även inga skjuvkrafter och inkompressibel strömning.

$$v_{\text{in}} = v_{\text{test}} \cdot \frac{A_{\text{in}}}{A_{\text{test}}} \quad (3.1)$$

I ekvation (3.1) motsvaras v_{in} och A_{in} av fluidhastigheten och tvärsnittsarean vid inloppet respektive, medan v_{test} och A_{test} motsvarar samma storheter i testregionen.

Konvergenskriterier presenteras för samtliga beräkningar, tom vindtunnel exkluderad, i tabell 3.1. Kriterierna har olika tillvägagångssätt för att uppfyllas. Den första typen vilken används är *Asymptotic*, vilken innebär att kriteriet uppfylls då skillnaden mellan största och minsta värde inte överskrider det angivna värdet under ett bestämt antal iterationer bakåt från gällande iteration. *Minimum/Maximum* innebär att kriteriet uppfylls då det angivna värdet under- eller överskrids.

Tabell 3.1: Konvergenskriterierna som används i beräkningarna. För att stoppa beräkningen med en AND typ krävs att alla andra AND är uppfyllda, medan ett kriterium med OR typ kan stoppa beräkningen självt. I detta fall används OR typ för felsökning, då beräkningarna når orimliga resultat.

	AND/OR	Typ	Värde
Force coefficient	AND	Asymptotic	0.05 @300 iterationer
Global imbalance	AND	Asymptotic	0.05 kg/s @300 iterationer
Tdr/Sdr residual	AND	Minimum	0.001
Maximum steps	OR	-	2000
Tke residual	OR	Maximum	1000
Maximum domain velocity	OR	Maximum	200 m/s

3.4 Vindtunnel

Tillvägagångssättet för de experimentella testerna i den fysiska vindtunneln kommer nedan att presenteras. Projektgruppen utförde tester i Chalmers vindtunnel under tre dagar. Först gjordes ett Reynoldssvep och därefter utfördes ett antal olika mätningar med olika inställningar för vindtunneln med respektive utan vissa komponenter i vindtunneln. Allting presenteras nedan i kronologisk ordning.

3.4.1 Montering

Först monterades bussen vilken alla tester utfördes med. Initialt påträffades vissa utmaningar då en komponent för monteringsanordningen saknades, utmaningarna vilka påträffades under testerna samt hur de hanterades presenteras mer specifikt i sektion 3.4.8.

För att montera bussen i vindtunneln placerades först en jigg på vindtunnelns våg, vilken mäter krafter och moment. Figur 3.4 visar hur vågen ser ut. Adaptern är en platta, vilken monterades med hjälp av skruvar i vågen och i sin tur har jiggen fyra stycken gängstänger vilka sticker upp ovanför vindtunnelns golv. Bussen placerades

därefter så att däckena och stängerna korrelerar. Bussens hjul har spännskruvar vilka spändes åt så att bussen satt ordentligt fast i gängstängerna. Detta förhindrar att bussen flyger loss vid höga vindhastigheter. Figur 3.5 illustrerar hur bussen är monterad och redo för tester.



Figur 3.4: Chalmers vindtunnels våg är placerad under vindtunnelns golv och mäter krafterna vilka uppstår på testobjektet.

För att säkerställa att bussen är korrekt monterad och för att resultaten ska bli korrekta är det viktigt att de uppmätta krafterna endast kommer från luftflödets inverkan på modellen. Därmed är det essentiellt att bussens hjul inte vidrör vindtunnelns golv då det påverkar vågens kraftmätningar, främst den uppmätta lyftkraften. En fördel är om mellanrummet mellan hjulen och golvet är minimalt eftersom luftflödet då påverkas så lite som möjligt. För att justera bussen i höjdlid korrigeras vågen under vindtunnelns golv.

Vågen har ett förbestämt koordinatsystem samt markeringar för var koordinatsystemet är nollställt. Utgångsvinkeln specificerades därmed av markeringen där koordinatsystemet är kalibrerat till 0° med luftflödet anländandes rakt framifrån. I denna positionen är dessutom sidkrafterna lägst då vinden har minst träffyta på sidorna. För att placera bussen i en 90° vinkel roterades vågen under vindtunnelns golv. Figur 3.6 demonstrerar hur bussen var monterad i en 90° vinkel i vindtunneln.

Slutligen tejpades alla defekter i vindtunneln samt modulerna tillhörande monteringsanordningen för att föröka förhindra att luften flödar i utrymmen vilka påverkar resultatet på ett negativt vis. Det främsta utrymmet där luftflödet påverkar resultaten negativt är när vinden tränger ner mot vågen och påverkar mätningarna. I figur 3.5 visas hur modulen vilken är i anslutning till vindtunnelns golv är installerad samt tejpad för att förhindra luften från att nå vågen och därmed påverka mätningarna.

3. Metod



Figur 3.5: Bussen monterad i en 0° vinkel mot flödet i vindtunneln.



Figur 3.6: Bussen monterad i en 90° vinkel mot flödet i vindtunneln.

3.4.2 Reynoldssvep

När uppställningen var klar och säkerställd genomfördes Reynoldssvepet för när bussen var uppställd i riktning mot luftflödet. Resultaten av Reynoldssvepet för 0° går att se i figur 4.1. Tillvägagångsättet för hur reynoldssvepet gick till var att hastigheten mättes för hastigheter mellan 5-55 m/s i intervall om 5 m/s, där 55 m/s är vindtunnelns maxhastighet. Därefter analyserades koefficienterna C_D och C_L för att kunna dra en slutsats om hastigheten angiven i projektbeskrivningen är giltig i sammanhanget. Resultaten för Reynoldssvepet och diskussion om vald hastighet ges i avsnitt 4.2.2. För bussen placerad i en 90° vinkel utfördes inget Reynoldssvep.

3.4.3 Repetitiva tester

Efter Reynoldssvepet genomfördes ett flertal repetitiva tester med den bestämda hastigheten, 30 m/s. Detta gjordes för att kontrollera så att de dimensionslösa koefficienterna C_D och C_L inte varierar för mycket i de olika körningarna. Därmed ökas resultatens tillförlitlighet genom att upprepa samma typ av test flera gånger. Fallet vilket upprepades var när bussen stod i en 0° graders vinkel och vindens anströmningshastighet i testsektionen var 30 m/s. Proceduren upprepades fem gånger och tillvägagångsättet var följande:

1. Verifiera så att vågen är nollställd samt att vindhastigheten är noll.
2. Starta vindtunneln och reglera hastigheten till 30 m/s.
3. Kontrollera så att bussens hjul inte vidrör vindtunnelns golv.
4. Vänta tills mätningarna har konvergerat och därefter spara data.
5. Stänga av vindtunneln och lyfta upp och montera om bussen.
6. Upprepa steg 1-5.

Efter alla mätningar av lyft- och dragkrafterna konstruerades en MATLAB-kod, vilken sparade all data och samtidigt omvandlade krafterna till dimensionslösa koefficienter enligt ekvation (2.4) och (2.2).

3.4.4 Olika tester i vindtunneln

Chalmers vindtunnel, se figur 2.1, har fyra möjliga inställningar för tryckfördelning inuti tunneln. Dessa är: 0.8 ratio, zero static pressure, advanced 0.8 ratio och advanced zero static pressure. Alla olika scenarion genomfördes med de fyra olika inställningarna. Testade scenarion var: vindtunneln med tejpat tak samt breather slot, vindtunneln med tejpat tak, vindtunneln med tejpat breather slot samt vindtunneln utan någonting förtejpat. Dessa scenarion hänvisar till vilka komponenter som kan försummas för det specifika fallet då de var förtejpad.

Först mättes bussen rakt mot flödet av luft med både breather slot och tak tejpat med alla ovannämnda inställningar av vindtunneln. Samtidigt sparades all data och

efter det stängdes vindtunneln av för att göra det möjligt att avlägsna tejp i taket. Se figur 3.7 för en illustration över hur taket var tejpats under mätningen.



Figur 3.7: Vindtunneln med tejp för hålet i taket.

Därefter gjordes mätningarna på bussen igen, vilken fortfarande var placerad rakt mot flödet, men bara med förtejpats breather slot denna gång. De fyra olika inställningarna mättes och återigen sparades alla data. Efter det stängdes vindtunneln av för att ta bort tejpens för breather sloten så att vindtunneln kunde mätas utan någonting förtejpats. Se figur 3.8 för en illustration över hur breather slotet var tejpats under mätningarna.



Figur 3.8: Vindtunneln med tejpats breather slot under mätningarna i vindtunneln.

Därefter gjordes mätningar med vindtunneln tom från tejp och med bussen riktad mot vinden. All data sparades och därefter stängdes vindtunneln av för att göra

det möjligt att klättra in i vindtunneln och tejpa för taket igen. Återigen startades vindtunneln och alla inställningar kördes igenom samtidigt som all data sparades ned. På så sätt har alla scenarion samt inställningar simulerats för när bussen har varit placerad med vindrutan mot luftflödet. För att säkerställa resultaten har alla mätningar med alla scenarion och inställningar gjorts ytterligare en gång.

För testerna med bussen vinklad 90° användes samma tillvägagångssätt som när bussen var vinklad 0° . Alla vindtunnelns fyra inställningar användes för varje ovan-nämmt scenario även här.

3.4.5 Breather slot

Under de experimentella testerna i vindtunneln när bussen var vinklad 0° och utan någon tejp testades vindtunnelns breather slot. Figur 2.1 visar var breather sloten är placerad i Chalmers vindtunnel. Inför projektet fanns det ingen information om huruvida breather slotet hade ett inflöde, alternativt ett utflöde, av luft vilket ledde till att det undersöktes för att bättre kunna beräkna vindtunneln i CFD. Testerna av breather slotet gjordes endast under en vindhastighet samt under scenariot då ingenting hade tejpats för i vindtunneln, vilket kan leda till en diskussion om att resultatet av detta specifika experimentellt inte är helt tillförlitligt. Däremot genomfördes testerna två gånger vilket ökar tillförlitligheten för att resultaten är pålitliga för detta specifika scenario.

Testerna gick till på så sätt att en tråd placerades vid breather slotets inlopp och därefter analyserades hur tråden uppträdde. Trådens placering vid inloppet illustreras i figur 3.9. Experimentet utfördes på vindtunnelns samtliga inställningar, och påvisade ett inflöde under alla dessa.



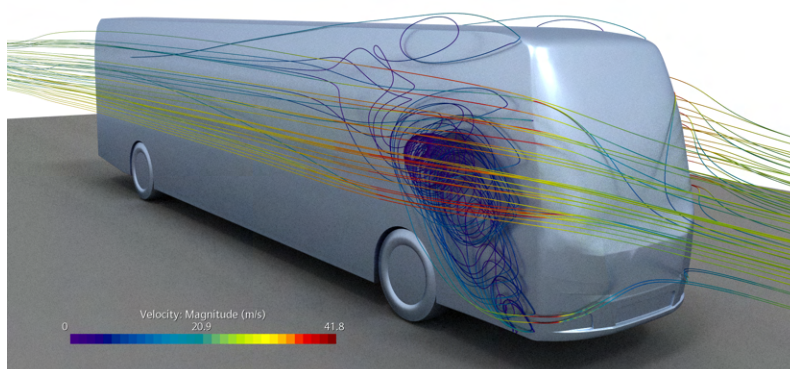
Figur 3.9: Användning av en tråd för att bestämma om vindtunnelns breather slot har ett in- eller utflöde av luft.

3.4.6 Visualisering a flödet

När de experimentella testerna i den fysiska vindtunneln på Chalmers genomfördes var rökmaskinen ur funktion. Rökmaskinens syfte är att visualisera flödesbilden runt testobjektet. Istället fick korta längder garn tejpas fast på bussen för att försöka visualisera flödet runt bussens yta. Garnbitarna illustrerar hur flödet är riktat samt om flödet separerar eller inte. Om garnbitarna började virvla och inte längre var utsträckta längs bussen antydde det på separation i flödet. I figur 3.10 visas hur garnet uppträdde under testerna för när bussen var riktad rakt mot flödet, och i figur 3.11 visas validering av detta från STAR-CCM+.



Figur 3.10: En visualisering av flödet med hjälp av garn som tejpats fast på bussen.



Figur 3.11: En visualisering av luftflödets hastighetsförändringar runt bussen. Rendering gjord i STAR-CCM+.

3.4.7 Mätningar av vågens angreppspunkt

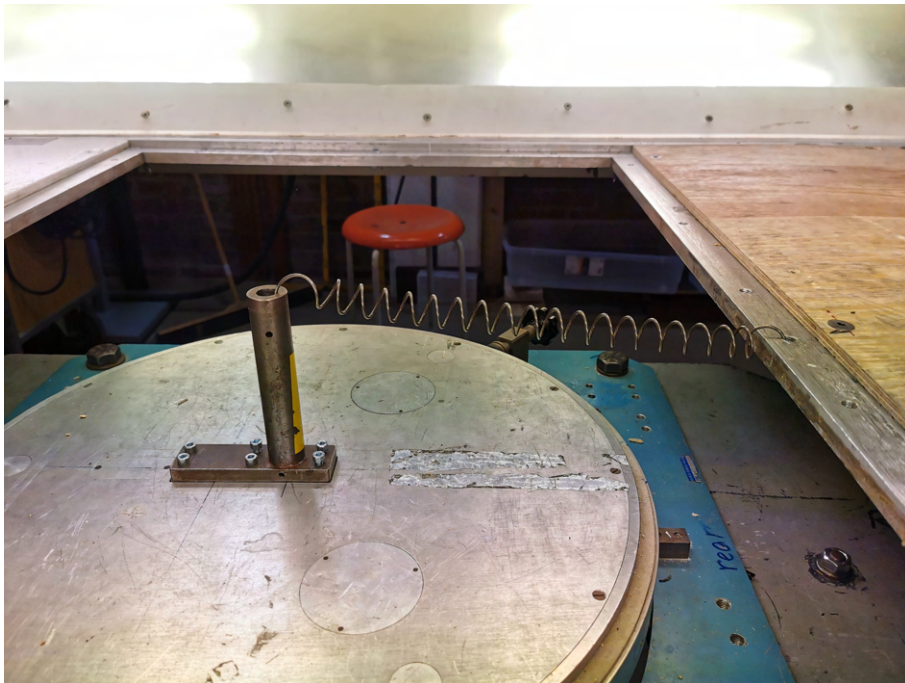
För att beräkna de korrekta krafterna i detta projekt krävs information om var angreppspunkten för vindtunnelns våg är belägen. Initialt uppstod problem då den första anordningen för att hitta angreppspunkten var felaktig, mer om detta i avsnitt 3.4.8.

För att hitta angreppspunkten monterades ett metallstativ med ett rör på vågen, vilket gjorde att en fjäder kunde fästas. Fjäders hade en krok i vardera ände vilket gjorde att fjädern kunde fästas i metallstativet och i ett befintligt skruvhål i vindtunnelns golv. En figur på uppställningen presenteras i 3.12. Fjäders sträcktes ut ortogonalt och kraften mättes med hjälp av vindtunnelns våg samt kontrollerades

med en dynamometer. Testet genomfördes i både x- och y-riktning. Därefter mättes höjden av metallstativet från vindtunnelns våg vilket resulterade att data från dessa tester kunde användas för att beräkna vågens momentarm.

För att få den teoretiska momentarmen dividerades momentets xy-komposant med kraftens xy-komposant, enligt ekvation (3.2). En ytterligare metod vilken kan användas är att sätta upp momentens definition med kryssprodukt, men detta är en ekvation som inte lyckades lösas med MATLAB kommandot *fsolve* och därav övergavs.

$$r = \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}} \quad (3.2)$$

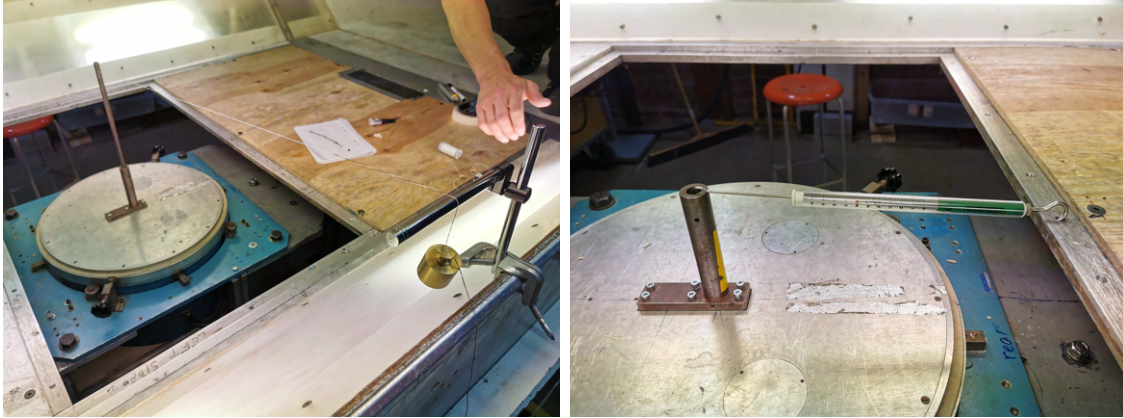


Figur 3.12: Figur på hur metallstativet ser ut samt hur angreppspunkten mäts upp. Figuren illustrerar också hur fjädern var spänd samt var den var placerad.

3.4.8 Utmaningar

På den första dagen för vindtunneltester skulle momentarmen för vindtunnelns våg hittas. Detta gjordes först genom att använda en adapter med en enkelt mätbar höjd över vågen och en precis vikt vilken hängdes i rät vinkel utanför tunneln enligt figur 3.13a. Förväntningarna var att detta skulle ge ett bra resultat, men så var ej fallet. Problemet utreddes och det uppstod misstankar om att vågen mätte fel. Istället testades då en fjäder vilken hade en minimal kontaktpunkt och vilken kunde fästas på en väldefinierat position på metallstativet. Fjädern sträcktes ut ortogonalt och fästas i ett skruvhål. Detta gav då förväntade resultat, och resultaten verifierades

med en dynamometer, figur 3.13b. Då den faktiska kraften var känd, liksom adaptrens höjd över vågen och momentet var rent i endera riktningen kunde data från dessa experiment sedan användas för att räkna fram momentarmen för vågen.

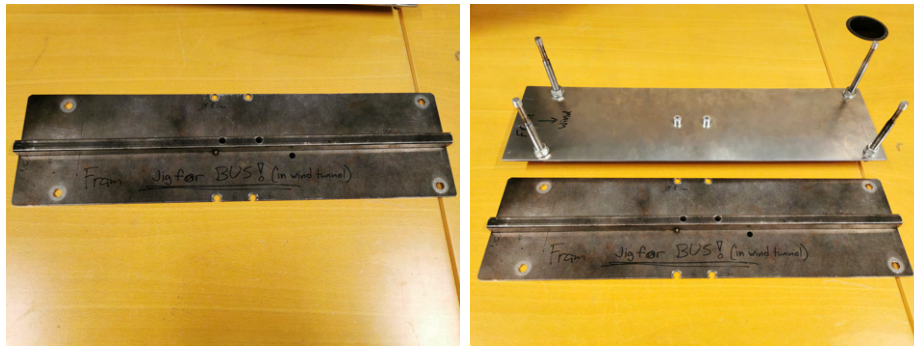


(a) Initiala lösning för att försöka mäta vågens momentarm. (b) Det slutgiltiga sättet momentarmen mättes på.

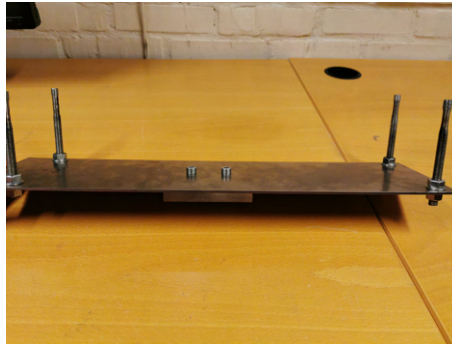
Figur 3.13: Bilderna illustrerar olika sätt att mäta vågens momentarm på.

Nästa problem var att vissa tidigare använda monteringsanordningar saknades. Resultatet blev att nya hål fick borraras i den befintliga jiggen, figur 3.14a, för att acceptera en annan adapter från labbet. När bussen senare på dagen skulle testas med breddsidan mot vinden visade det sig dock att eftersom jiggen inte var symmetrisk och vågens infästning inte var centrerad blev modellen, och med den, hela bottenplattan förskjutet ca. 10 millimeter i y-led. Detta kunde därmed inte korrigeras på grund av vindtunnelns och vågens installation, och en ny jigg behövde därför konstrueras, vilken även i framtiden kan användas utan att leta speciallösningar och som har rotationscentrum kring vågens centrum.

Denna nya jigg vilken konstruerades kan ses i figur 3.14c. Hål mättes och borrades upp i relation till vågens centrum. Utöver hålen behölls samma dimensioner som på den tidigare jiggen.



(a) Jigg från tidigare projekt som behövde ersättas. (b) Jämförelsebild mellan ny och gammal jigg.



(c) Ny jigg med adapterplattan som fästs på vågen monterad.

Figur 3.14: Jämförelsebilder mellan de olika jiggarna som använts. En ny jigg behövde konstrueras för att kunna testa bussen med bredsida mot vinden, då en gammal adapter försvunnit. Gångstängerna från den gamla jiggen har återanvänts.

Utöver dessa nämnda problem visade det sig också så fort testerna påbörjats att bottenplattan inte var tillräckligt åtsittande mot golvet i testsektionen, så den började lyfta och rörde bussens hjul vid vindhastigheter över 20m/s. Detta behövde korrigeras, då plattans interferens med hjulen annars producerade en lyftkraft. En mer elegant lösning än den befintliga inspänningen, vilken med hjälp av träbitar 'låser' plattan mot undersidan av vindtunneln, söktes men tiden saknades och det slutade med att två ytterligare klossar monterades enligt figur 3.15 och alla dessa kilades sedan på plats med plastbrickor efter återmontering för att sitta så spänt som möjligt. När Reynoldssvepet utfördes på nytt efter denna åtgärd lyfte inte plattan avsevärt, inte ens vid vindhastigheter på 55m/s.



Figur 3.15: Bild på den nuvarande lösningen för inspänning av bottenplattan/gradskivan som används vid vindtunneltester av den aktuella bussmodellen. Observera att en träbit saknas i det nedre-högra hörnet.

4

Resultat och Diskussion

Följande kapitel redogör för projektets resultat samt en diskussion om vad resultaten visar. Resultaten inkluderar grafer och tabeller på mätvärden från både mätningar i vindtunneln samt beräkningar i CFD. Dessutom analyseras vilka komponenter av vindtunneln som påverkar resultaten mest. Slutligen presenteras en analys om vad de kvarstående skillnaderna mellan mätningarna och beräkningarna beror på.

4.1 Förfiningsstudie av mesh

Förfiningsstudien, vilken genomförts på 'Buss i vindtunnel'-fallet, med turbulensmodell $k-\omega$ SST, visar tecken på att de relevanta siffrorna är stabila under förändring av mesh i tabell 4.1. C_D , vilken är i synnerhet viktig, avviker bara runt 2 counts mellan olika mesh; C_L avviker mer, men tenderar mot 0 med ytterligare förfining och är inte av stor vikt i denna studie. Resultatet indikerar på att den vanliga meshen kommer att ge relevanta svar till resultat i andra situationer, men det ger ingen garanti eftersom de andra inte genomgår en förfiningsstudie.

Tabell 4.1: Resultat från förfiningsstudie av mesh. Dimensionslösa koefficienter anges med fyra värdesiffror och antalet celler anges avrundat till närmsta 100 000-tal.

	Antal Celler	C_D	C_L
Grov 2	7 500 000	0.404	-0.119
Grov 1	14 000 000	0.404	-0.104
Vanlig	26 800 000	0.405	-0.074
Fin 1	50 600 000	0.407	-0.082
Fin 2	100 600 000	0.402	-0.047

4.2 Mätningar i vindtunnel

I detta avsnitt presenteras och valideras den data projektet bygger på. En diskussion förs om hur vindhastigheten för projektet valdes samt en analys över resultatet för de repetitiva testerna. Nedan följer resultaten vilka producerats från mätningarna i vindtunneln.

4.2.1 Momentarmsmätning

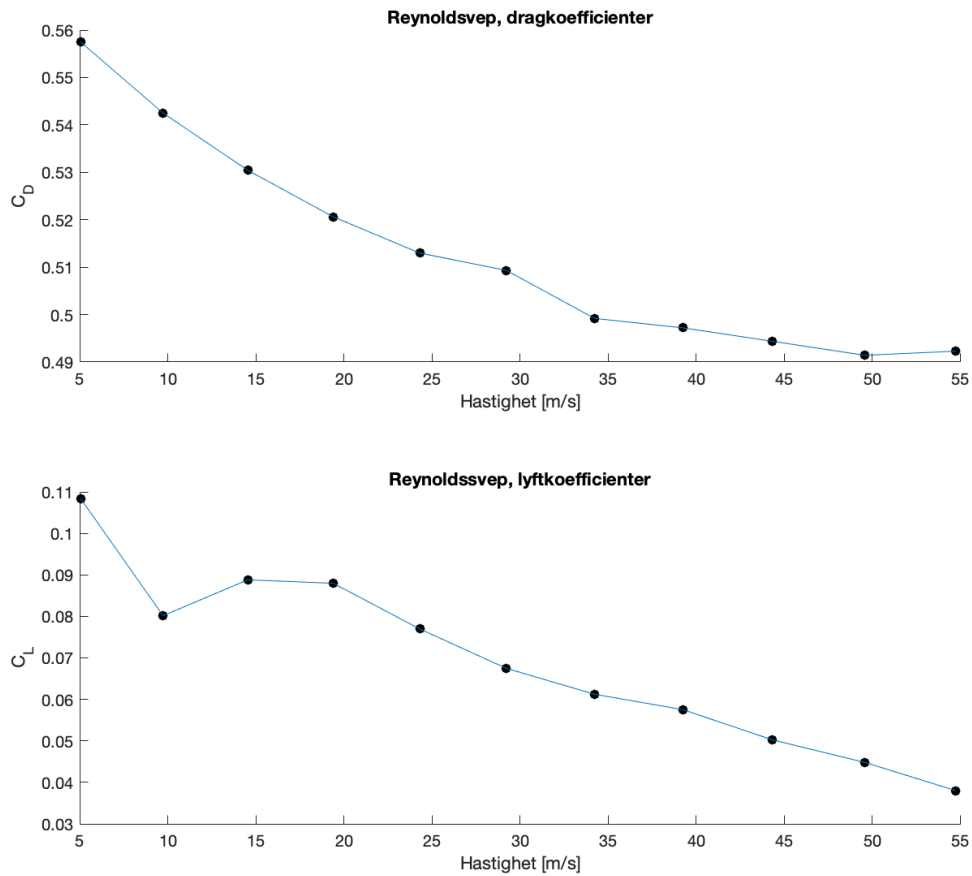
Momentarmens angreppspunkt för vågen hittades i fyra separata mätningar till att ligga 5.4, 5.5, 3.4 och 3.4 millimeter över vågens mitt. Det bör tilläggas att dessa värden inte vidare används i denna studie, men kan vara användbara för framtida studier.

4.2.2 Reynoldssvep

Vid Reynoldssvep över bussen i vindtunneln vid 0° gavs resultat för drag- och lyftkoefficienter enligt figur 4.1 och tabell A.1. Genom att analysera resultaten går det att se att det dimensionslösa talet C_D är förhållandevis oberoende av vindhastigheten vid 50 m/s. C_L är relativt oberoende av vindhastigheten vid 15-20 m/s. Denna typ av analys går att göra då dessa intervall medför den minsta variationen i graferna för C_D och C_L .

Då projektgruppen fokuserade mer på dragkoefficienten användes främst den övre grafen i figur 4.1 för att bestämma hastigheten. En högre hastighet förmedlar ett bättre resultat vilket figur 4.1 påvisar för C_D . Utifrån resultaten från Reynoldssvepet skulle hastigheten för projektet valts till 50 m/s men ljudnivån i vindtunneln vid denna hastighet hade gjort det svårt för projektgruppen att arbeta under en längre period och hade dessutom försvårat kommunikationen mellan gruppmedlemmarna. Utöver ljudnivån är vindtunneln mer energikrävande när den arbetar i högre hastigheter så det var också en bidragande faktor till varför 50 m/s inte valdes.

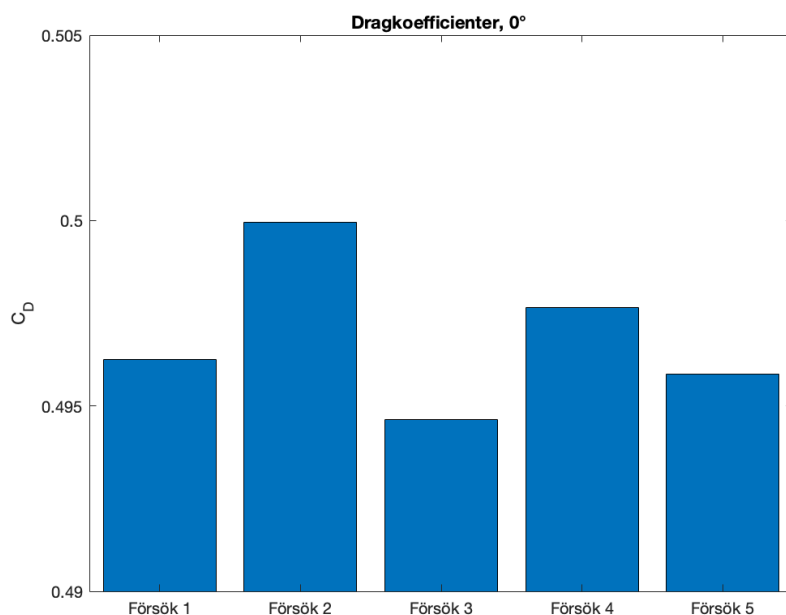
Av ovannämnda anledningar, samt för att beräkningarna i CFD gjordes innan de experimentella testerna med denna hastighet, valdes istället hastigheten 30 m/s. Utöver dessa argumentet går det att se i grafen för C_D 4.1 att tangenten för lutningen är relativt liten för intervallet då hastigheten är mellan 25-30 m/s jämfört med alla lägre intervall.



Figur 4.1: Reynoldssvep 0° för buss i vindtunnel. Bild hämtad från MATLAB.

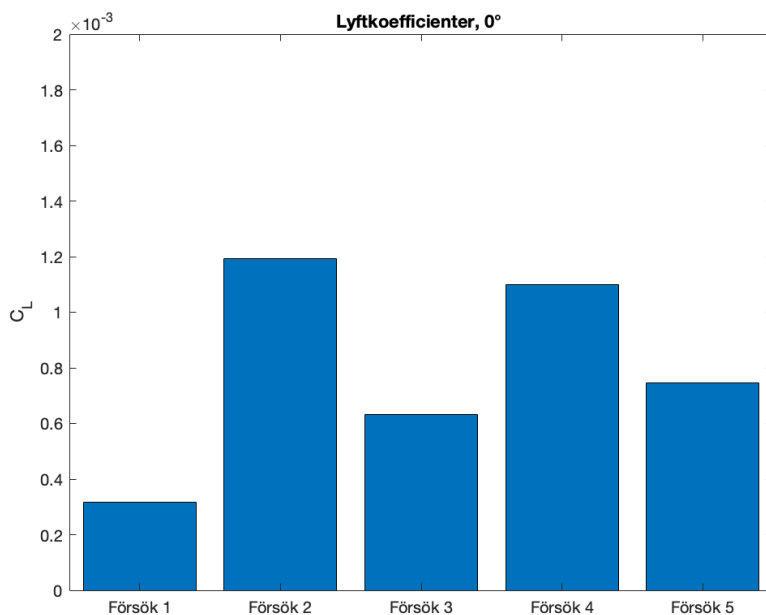
4.2.3 Repetitiva tester

De repetitiva testerna genomfördes för att validera resultaten och samtidigt minimera felkällorna. Resultaten för de repetitiva testerna över dragkoefficienten går att se i figur 4.2. Slutsatsen som kan dras från figuren är att differensen mellan de fem olika försöken är relativt liten. Att resultaten varierar är normalt då utomstående faktorer samt möjliga felkällor har betydelse. Testernas medelvärde var 0.497 och troliga felkällor för resultaten kan vara att vågen inte har kalibrerats med liknande omständigheter inför varje test samt att vindhastigheten inte var identisk för varje test, vilket den nästintill aldrig är.



Figur 4.2: Resultaten av de fem repetitiva testerna vilka gjordes för att säkerställa resultaten för dragkoefficienten. Bild hämtad från MATLAB.

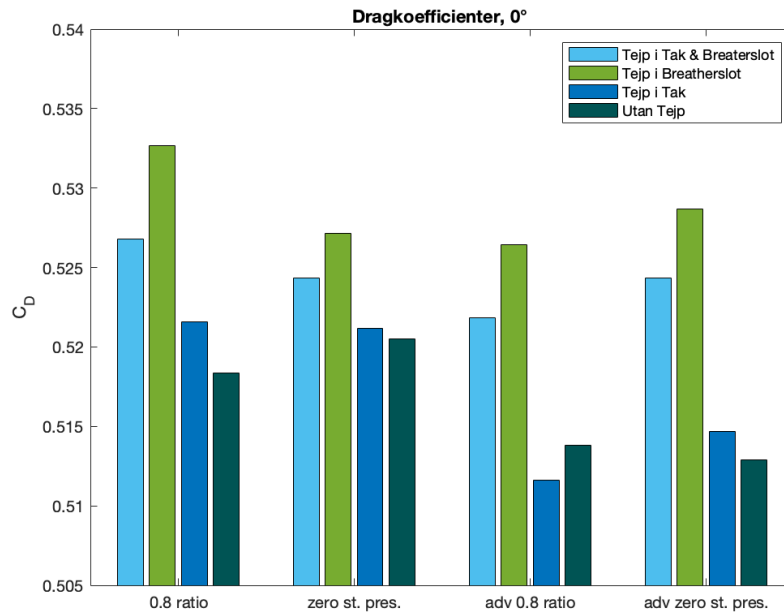
Medelvärdet för lyftkoefficienten för de fem testerna var: $7.974 \cdot 10^{-4}$ vilket återigen är relativt litet. Felkällor för detta resultat kan återigen vara att vågen inte var kalibrerad med liknande omständigheter inför varje test samt att bussen placerades lite olika vid varje montering.



Figur 4.3: Resultaten av de fem repetitiva testerna vilka gjordes för att säkerställa resultaten för lyftkoefficienten. Bild hämtad från MATLAB.

4.2.4 Koefficienter

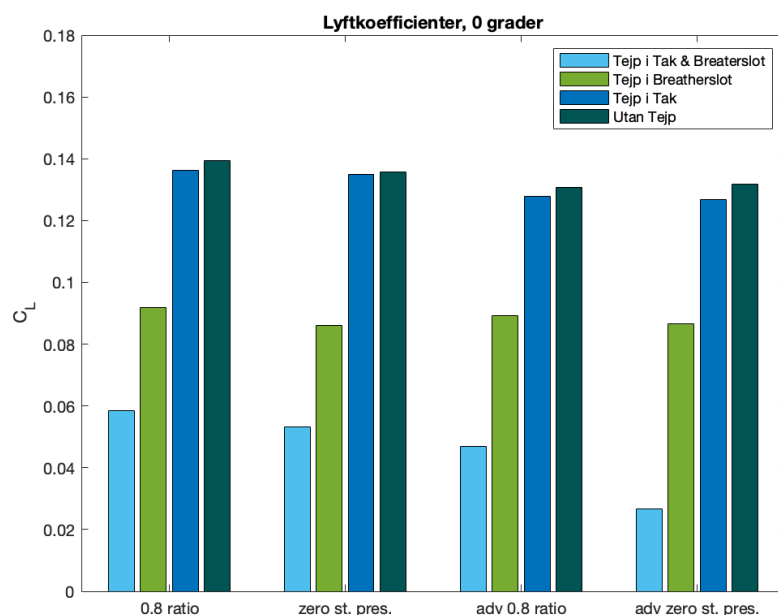
I detta stycke presenteras resultaten samt förs en diskussion kring drag- och lyftkoefficienterna C_D och C_L . Vid anströmning av luft vid 0° beräknades dragkoefficienter enligt ekvation (2.2). Data för respektive uppställning i vindtunneln, med de fyra olika inställningarna, ges i tabell A.2, se även figur 4.4. Referensarean för alla koefficienter är 0.025 m^2 , vilket motsvarar bussmodellens frontalarea.



Figur 4.4: Dragkoefficienter vid fyra uppställningar och fyra olika fläktinställningar för vindtunneln. Vindriktning rakt mot bussens front. Bild hämtad från MATLAB.

Det som tydligt kan utläsas i data från vindtunneln är att dragkoefficienterna är störst då endast tunnelns breather slot är tejpbat, oberoende av uppställning och inställning. Vid endast förtejpbat tak och helt utan tejp ges varierande resultat, men vid tejpbat tak så ges en trend av något större dragkoefficient.

Vidare gavs data för lyftkoefficienter enligt figur 4.5 och data för respektive inställning och uppställning i vindtunneln ges i tabell A.3.

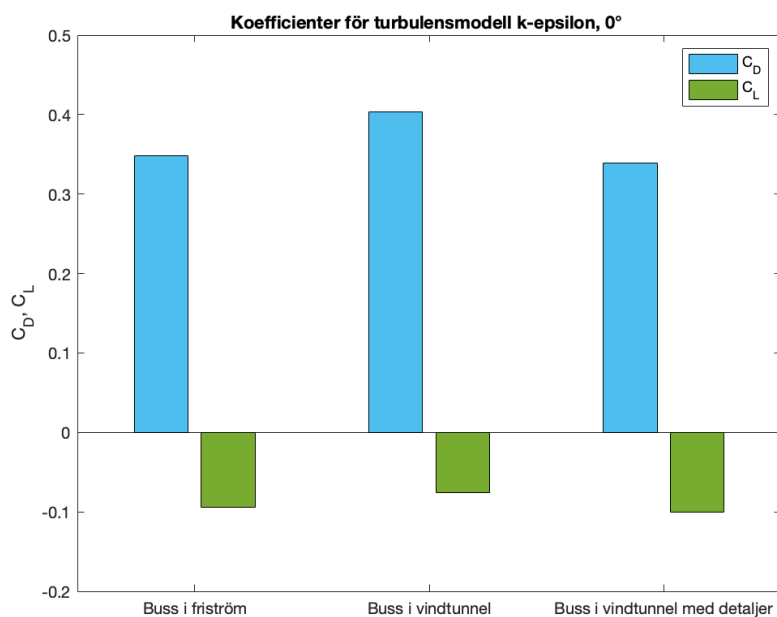


Figur 4.5: Lyftkoefficienter vid fyra uppställningar och de fyra olika inställningarna för vindtunneln. Vindriktning rakt mot bussens front. Bild hämtad från MATLAB.

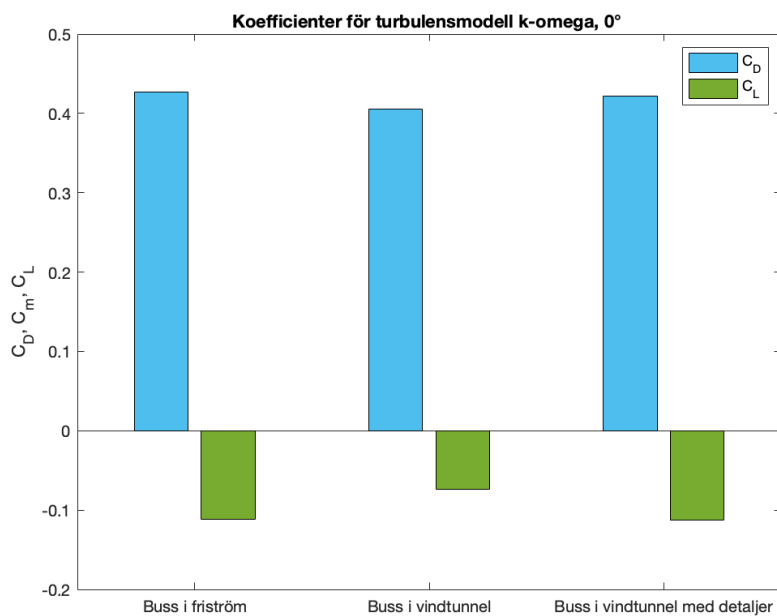
För lyftkoefficienterna så varierade data tvärtemot från hur dragkoefficienterna blev. Vid förtejpat tak och breather slot samt förtejpat breather slot, är lyftkoefficienterna lägre och det ges höga värden för endast tejpat tak samt ingen tejp. Resultaten vid beräkning av drag- och lyftkoefficienterna tyder på att vid förtejpad breather slot så påverkas trycket i vindtunneln och påverkar därför drag- och lyftkoefficienter. Se även avsnitt 4.4.

4.3 Beräkningar i CFD

Resultaten för drag- och lyftkoefficienter vid beräkningar i CFD ges enligt figurer 4.6, 4.7 och tabell 4.2. Vid beräkning av buss utan vindtunnel i CFD tas beräkning av blockerings-effekten med, och koefficienterna för drag och lyft justeras genom att dela med blockerings-effekten, se avsnitt 2.9.2. Att koefficienterna delas med ger jämförbart resultat för alla koefficienter vilka beräknas med eller utan vindtunnel.



Figur 4.6: Drag- och lyftkoefficienter från beräkningar i CFD med turbulensmodellen $k - \epsilon$. Se tabell 4.2 för numeriska värden. Bild hämtad från MATLAB.



Figur 4.7: Drag- och lyftkoefficienter från beräkningar i CFD med turbulensmodellen $k - \omega$. Se tabell 4.2 för numeriska värden. Bild hämtad från MATLAB.

Tabell 4.2: De numeriska värdena tillhörande figur 4.6, 4.7. Deltabell ovan representerar beräkningar med $k - \varepsilon$ som turbulensmodell och deltabell nedan representerar beräkningar med $k - \omega$.

$k - \varepsilon$	C_D	C_L
Buss i friström	0.348	-0.093
Buss i vindtunnel	0.404	-0.076
Buss i vindtunnel med detaljer	0.339	-0.100
$k - \omega$	C_D	C_L
Buss i friström	0.427	-0.110
Buss i vindtunnel	0.405	-0.074
Buss i vindtunnel med detaljer	0.421	-0.112

En betydande observation direkt från CFD-beräkningar är den skillnad vilken uppkommer vid byte av turbulensmodell. $k - \varepsilon$ påvisar betydligt lägre C_D än $k - \omega$ i 'Buss i friström' och 'Buss i vindtunnel', medan C_L visar i stor sett jämförbara värden mellan modellerna, se tabell 4.2. Vidare kan det iakttas att inkluderingen av vindtunnelgeometrin inte har en större påverkan på C_D för $k - \omega$, där differensen ligger runt 10 counts mellan konfigurationerna. Detta kan jämföras med värdena framtagna i vindtunnel, tabell A.2, där skillnaderna ligger i storleksordningen 100 counts. Ytterligare verkar inte inkluderingen av detaljer göra större skillnad, vilket diskuteras vidare i avsnitt 4.7.

När det kommer till lyftkoefficienter påvisas negativa värden, vilket motsäger data från vindtunneln i tabell A.3. Trenden i avsnitt 4.1, att lyftkoefficienterna går mot 0 då mesh ytterligare förfinas, bör tas i åtanke när dessa värden observeras. Frågan bör då handla mer om varför större positiva värden observeras i vindtunneln från början. Det kan handla om det insug som hittas vid bussdetaljerna, se avsnitt 4.7, men också om bussens horisontella vinkel mot flödet. Om objektet inte är exakt positionerat som datormodellen, i synnerhet då det förväntade värdet är 0, kan skillnader vilka medför teckenbyte uppstå.

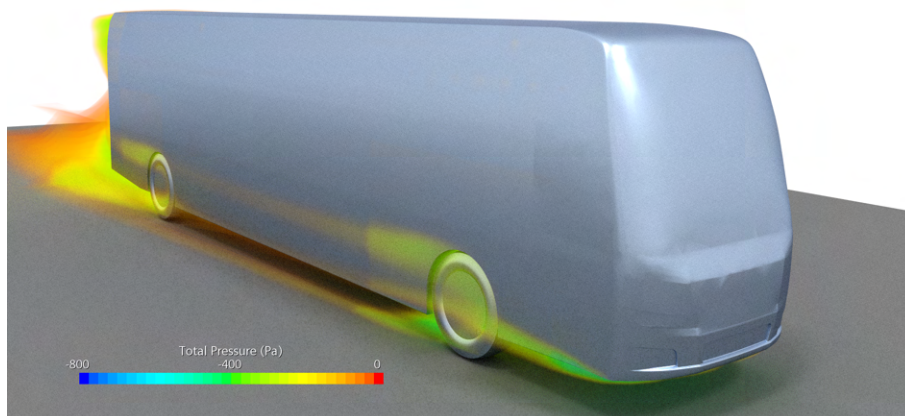
4.4 Tryckfördelning i tunnel och validering

På grund av att vindtunneln är så gammal är det svårt att få fram information om tunneln, som säkerligen fanns från konstruktionskriterier och installation med mera. Det verkar heller inte, efter mycket efterforskning, som att någon på senare år tagit fram denna information gällande gränsskiktets tjocklek, tryckfördelningen i tunneln eller dylikt vilket hade varit av intresse för projektet. Det är därmed inte möjligt att validera att gränsskiktet ser ut som datormodellen förutspår, och det är heller inte säkert att det antagna trycket vilket använts i studien och som används av professorer på avdelningen Vehicle Engineering and Autonomous Systems (VEAS) är korrekt. Med andra ord skulle det krävas mer ingående studier av själva vindtunneln vilken skapade en dokumentation där all nödvändig information samlades till kommande arbeten där beräkningar ska valideras mot mätningar i Chalmers vindtunnel.

4.5 Skillnader mellan höga och låga y^+

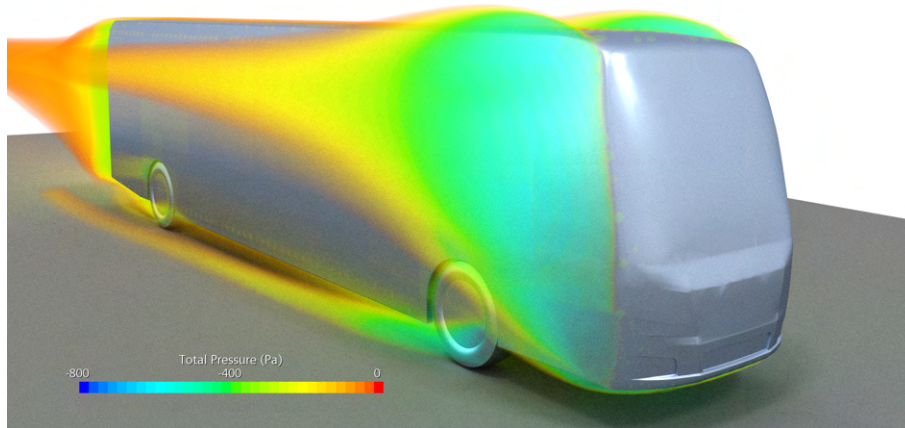
Inverkan av skillnader mellan höga och låga y^+ illustreras i figur 4.8, respektive figur 4.9. Från figurerna framgår det att tryckfördelningen vid bussens övre sidor påverkas avsevärt, där låga y^+ ger ett mycket större område med negativt tryck i jämförelse med referensen. Detta innebär även hög vorticitet i detta område, vilket gör det enkelt att validera i vindtunnel. Från figur 3.10 syns det att de utplacerade garnbitarna på modellen pekar i motsatt håll jämfört med flödesriktningen, vilket indikerar på vorticitet och implicerar slutsatsen att låga y^+ ger en mycket mer verklighetsförankrad beräkning för denna modell.¹

Analyserar man dragkoefficienten vid höga y^+ fås $C_D = 0.305$ för $k - \omega$ SST och 0.285 för $k - \varepsilon$, vilket är betydligt lägre än koefficienter både uppmätta i vindtunnel och beräknade med låga y^+ , tabell 4.2, och stärker ytterligare argumentet att låga y^+ är lämpligare. En annan observation är skillnaden på $k - \omega$ SST och $k - \varepsilon$ för höga y^+ : ca. 20 counts, i kontrast till ca. 1 counts för låga y^+ . Denna låga differens uppstod endast vid beräkning av 'Buss i vindtunnel' och skulle möjligtvis behöva undersökas i de andra fallen också.



Figur 4.8: Tryckfördelning i transparent volym nära bussen. I denna beräkning är medelvärdet av y^+ ca. 54.2, samt använder 5 300 000 celler totalt. I fältet illustreras tryck som är mindre än normaltrycket. Bild hämtad från STAR-CCM+.

¹Det bör nämnas att detta testats på en buss i modellstorlek. Det är inte säkert att samma fenomen sker för beräkning på en buss i fullstorlek.



Figur 4.9: Tryckfördelning i transparent volym nära bussen. I denna beräkning är medelvärdet av y^+ ca. 3.87, samt använder 26 800 000 celler totalt. I fältet illustreras tryck som är mindre än normaltrycket. Bild hämtad från STAR-CCM+.

4.6 Påverkan av breather slot och taköppning

Det är svårt att på ett bra sätt beräkna öppningar i en geometri i STAR-CCM+ då det krävs information om vilken typ av randvillkor vilka ska användas, hur dessa påverkar trycket i tunneln och så vidare. Det pågår forskning kring detta, men det finns inga definitiva svar än så länge. Eftersom det också var mycket problematiskt att få till ett breather slot i den ärvda CAD-modellen, se avsnitt 3.1.2, och projektet började komma närmare sin deadline, uteblev det till slut från beräkningarna. Således var det av stort intresse att tejpa för alla öppningar till vindtunneln, se avsnitt 3.4.1, för att efterlikna dessa 'vattentäta' förhållanden som i beräkningarna.

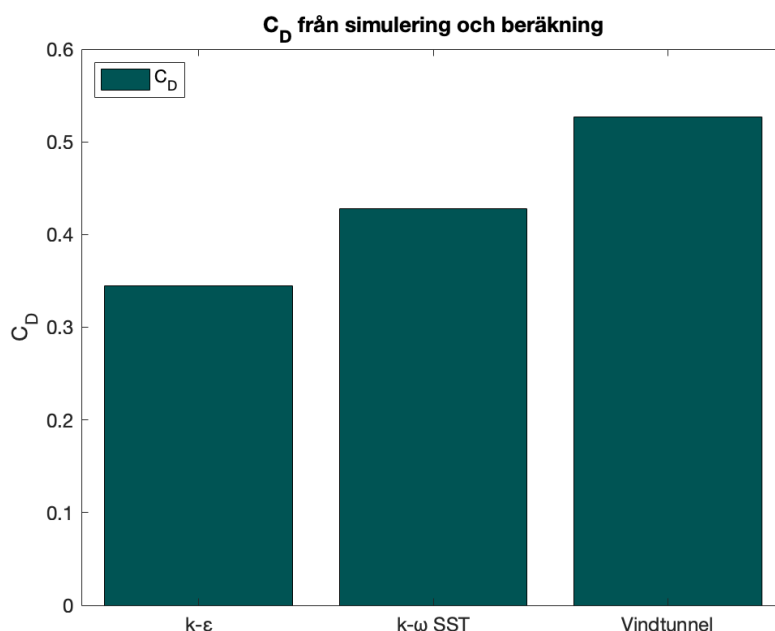
Logiskt nog visade också vindtunneltesterna, se figur 4.4, att en vindtunnel med både breather slot och taköppning övertejpade gav det bästa resultatet: runt 50 counts högre. Med andra ord gav detta det resultat vilket var närmast de beräknade koefficienterna. Lite intressant var det att då endast breather slotet var övertejpat gav detta det största felet av alla mätningar: runt 70 counts högre. Om endast taket var förtejpat gav detta resultat som var nära jämförbart med om båda öppningar var utan tejp.

Under de experimentella testerna undersöktes dessutom specifikt vindtunnelns breather slot för att bättre kunna beräkna vindtunneln i CFD. Inför projektet fanns det ingen information om huruvida breather slotet till- eller bortförde luft, men efter genomförda tester kunde det fastslås att det agerade som ett insug. Med den informationen kan därmed korrekta randvillkor appliceras på modellen i CFD. Det går att argumentera för att resultatet inte är helt tillförlitligt då testerna genomfördes med endast en vindhastighet samt under scenariot då ingenting var förtejpat i vindtunneln, men å andra sidan gick det inte att genomföra experimentet då breather

slotet var tejpat, vilket borde leda diskussionen till att scenario vilket mättes inte borde ha någon betydelse i detta fall. Resultaten för exakt detta experimentet bör vara tillförlitliga då testerna genomfördes två gånger och båda gångerna var resultatet att breather slotet hade ett insug, ifall resultaten kvarstår under andra vindhastigheter bör dock undersökas mer noggrant.

4.7 Kvarstående skillnader mellan beräkningar och mätningar

Trots många genomförda optimeringar under studien kvarstår skillnader mellan resultaten från beräkningarna i CFD och resultat från mätningarna i vindtunneln. C_D skiljer fortfarande runt 100 counts vilket kräver ytterligare förklaring och kan uppföljas i en senare studie., se figur 4.10.



Figur 4.10: C_D från mätningar och beräkningar med vindtunnelinställningen 0.8 ratio och vindriktning rakt mot bussens front. Bild hämtad från MATLAB.

En uppföljande studie skulle kunna utvärdera hur detaljerna behandlas i beräkningarna. Detaljerna, alltså hålen under hjulen, beskrivs endast med vägg-gränsförhållanden och bidrar således inte med något bruttoflöde till domänen. Detta motsäger dock både intuition och simpla tester i vindtunneln, då dessa hål i själva verket är öppningar till omgivningen. I vindtunneln finns en strömmande fluid, vilket implicerar ett tryckfall och därav en tryckgradient till omgivningen. Tryckgradienten driver således ett flöde, vilket motsäger beräkningsvillkoren. På plats validerades detta med en bit garn, som sugts in i öppningen om den hålls i dess närhet. Rimligtvis bör detta medföra en större lyftkoefficient, då ett flöde drivs uppåt mot undersidan av bussen,

men det är oklart hur det påverkar dragkoefficienten.

Problemet med att välja randvillkor kommer från att vi varken vet hastighetsfälten i hålen eller tryckfördelningen i hela vindtunneln. Det går inte att anta att flödet i hålen kommer strömma rakt uppåt, då hålen är så korta att flödesfältet i tunneln påverkar hålinloppen. En möjlighet skulle finnas i att införa ett ytterligare tomrum utanför hålen, men då är det fortfarande en fråga om hur flödet förhindras att riktas med gränsvillkoren. Givet att problematiken med att korrigera flödesriktningen kvarstår dock den okända tryckfördelningen som diskuteras i avsnitt 4.4, vilket implicerar att inflödets storlek inte kan bestämmas.

Även om det kan korrigeras för i vindtunneln, uppstår samma problem som för bottenplattans hål när breather slot och taköppning skall introduceras. Dessa, vilka enligt figur 4.4 har en förhållandevis stor inverkan på resultatet, är också svåra att bestämma randvillkor för som skulle lösa problemet verklighetstroget.

En annan kvarstående skillnad i projektet mellan mätningarna och beräkningarna är vingprofilen vilken är upphängd i vindtunnelns tak. På grund av tidsbrist samt brist på information kring vingprofilen så har den därmed inte modellerats upp i något CAD-program och därmed uteslutits ur projektet.

5

Slutsats

Alla skiljaktigheter i projektet hittades inte, då betydande skillnader kvarstår mellan de beräknade resultaten och de experimentella resultaten, men resultaten jämfört med tidigare projekt förbättrades avsevärt då differensen mellan beräknad och simulerad data i princip halverades. Dessutom framfördes betydliga observationer vilka kan hjälpa att förstå situationen och bygga vidare på projektet.

Gällande de olika inställningarna på vindtunneln påvisades variation i storleksordningen 10 counts för både dragkoefficienten och lyftkoefficienten. Trenden verkar vara ökning av C_D då breather slotet exkluderas och minskning då taköppningen exkluderas; för C_L framstår ökning av båda exkluderingar. Beräkningar i CFD visade störst skillnad mellan de olika turbulensmodellerna, där $k - \omega$ SST ger C_D ca. 100 counts högre än $k - \varepsilon$ i 'Buss i friström' och 'Buss i vindtunnel utan detaljer'. Däremot visade båda modeller mycket liknande resultat i fallet 'Buss i vindtunnel med detaljer'. Även skillnaden mellan höga och låga y^+ observerades, där låga y^+ gav resultat vilka speglade vindtunnelns data bättre, i synnerhet hanteringen av vorticitet på bussens sidor.

Dessvärre skiljer dragkoefficienten fortfarande runt 100 counts mellan beräkningar och vindtunnelsimulationer, vilket pekar på att verkligheten inte speglas korrekt i CFD. Möjliga korrigeringar är bättre hantering av randvillkor på detaljerna i vindtunnel, där signifikant inflöde observerats, och inkludering av taköppning och breather slot i beräkningar.

En annan slutsats att dra från projektet är att den nya jiggen, sektionen 3.4.8, kommer kunna användas i framtida projekt beträffande Chalmers vindtunnel. Det samma gäller för de modifierande CAD-modellerna, vilket gör att nya projekt kan ta vid där detta projekt har slutat.

Litteratur

- [1] *3 criteria for assessing CFD convergence by staff*. URL: <https://www.engineering.com/story/3-criteria-for-assessing-cfd-convergence>.
- [2] David Andersson m. fl. *Aerodynamik hos Fordon under Starka Sidvindar: En jämförande studie mellan vindtunnel och CFD-Beräkningar*. Jan. 1970. URL: <https://hdl.handle.net/20.500.12380/302387>.
- [3] *Basics of Turbulent Flow*. URL: <https://www.mit.edu/course/1/1.061/OldFiles/www/dream/SEVEN/SEVENTHEORY.PDF>.
- [4] Rupak Biswas och Roger C. Strawn. *Tetrahedral and hexahedral mesh adaptation for CFD Problems*. Febr. 2002. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016892749700092>.
- [5] Chang-Koon Choi och Dae-Kun Kwon. "Wind tunnel blockage effects on aerodynamic behavior of bluff body". I: *Wind Struct Int J* 1.4 (1998), s. 351–364.
- [6] Brian Dunbar. *What are wind tunnels?* Maj 2015. URL: <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-are-wind-tunnels-58.html>.
- [7] Johan Erlandsson och Patrik Berg. *Analys av turbulensmodeller för CFD*. 2011.
- [8] Oskar Hellsten m. fl. Jan. 1970. URL: <https://hdl.handle.net/20.500.12380/301635>.
- [9] Luana Huang m. fl. "Numerical Study of Blowing and Suction Control Mechanism on NACA0012 Airfoil". I: *Journal of Aircraft - J AIRCRAFT* 41 (sept. 2004), s. 1005–1013. DOI: 10.2514/1.2255.
- [10] Ann Hyvärinen. *Investigation of blockage correction methods for full-scale wind tunnel testing of trucks*. 2015.
- [11] *Inlet performance model*. URL: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunmodinlt.html>.
- [12] *Large-scale low turbulence subsonic wind tunnel*. URL: <https://www.chalmers.se/en/departments/m2/simulator-labs/labs/chalmerswindtunnels/facility/Pages/Large-Scale-Low-Turbulence-Subsonic-wind-Tunnel.aspx>.
- [13] Shuhaimi Mansor. *Wind tunnel measurement of aerodynamic ... - myiem.org.my*. URL: <https://www.myiem.org.my/assets/download/Feature-Wind.pdf>.

- [14] *Multiphysics Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation Software: Siemens Software*. URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/simcenter/STAR-CCM.html>.
- [15] Niels Ottosen och Hans Petersson. *Introduction to the finite element method*. Prentice Hall, 1992.
- [16] Siemens. *Simcenter STARCCM+: Tutorial guide*. München, 2022.
- [17] *The drag coefficient*. URL: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/dragco.html>.
- [18] *The lift coefficient*. URL: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/liftco.html>.
- [19] *What is Computational Fluid Dynamics (CFD)?: Simscale*. Sept. 2021. URL: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/what-is-cfd-computational-fluid-dynamics/>.
- [20] *Which turbulence model should I choose for my CFD application?* URL: <https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>.
- [21] Frank M. White. *Fluid mechanics*. McGraw-Hill, 2016.

A

Appendix

Tabell A.1: Resultterande drag- och lyftkoefficienter för buss i vindtunnel vid 0° och olika hastigheter (Reynoldssvep).

Hastighet [m/s]	C_D	C_L
5.049	0.588	0.020
9.734	0.543	0.015
14.545	0.530	0.017
19.399	0.521	0.016
24.318	0.513	0.014
29.233	0.509	0.013
34.242	0.499	0.011
39.263	0.497	0.011
44.332	0.494	0.009
49.586	0.491	0.008
54.75	0.492	0.007

Tabell A.2: Dragkoefficienter för buss i vindtunnel vid 0° med alla tejpkonfigurationer.

C_D	0.8R	ZSP	A0.8R	AZSP
Tejp i tak och breather slot	0.527	0.524	0.522	0.524
Tejp i breather slot	0.533	0.527	0.526	0.529
Tejp i tak	0.522	0.521	0.512	0.515
Ingen tejp	0.518	0.521	0.514	0.513

Tabell A.3: Lyftkoefficienter för buss i vindtunnel vid 0° med alla tejpkonfigurationer.

C_L	0.8R	ZSP	A0.8R	AZSP
Tejp i tak och breather slot	0.059	0.053	0.047	0.027
Tejp i breather slot	0.092	0.086	0.089	0.087
Tejp i tak	0.136	0.135	0.128	0.127
Ingen tejp	0.139	0.136	0.131	0.132

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2022
www.chalmers.se



CHALMERS