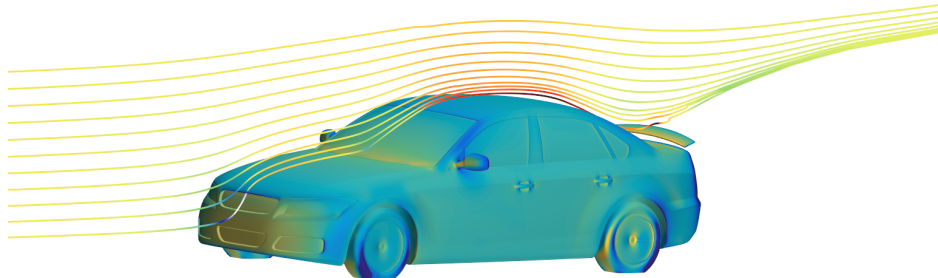




CHALMERS



Aerodynamiska krafter vid hård inbromsning

Numerisk beräkning av luftmotståndskoefficient på en personbil vid hård inbromsning med två olika accelerationsmodeller.

Kandidatarbete i Mekanik och Maritima Vetenskaper

DANIEL BENJAMINSSON
SANNA JARL
FILIP MILIKIC
NERMA SARKIS KRIKOR
SARA STRAND
ROBIN WAHID

Aerodynamiska krafter vid hård inbromsning

Numerisk beräkning av luftmotståndskoefficient på en personbil vid hård inbromsning med två olika accelerationsmodeller.

DANIEL BENJAMINSSON
SANNA JARL
FILIP MILIKIC
NERMA SARKIS KRIKOR
SARA STRAND
ROBIN WAHID



CHALMERS

Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Avdelningen för Fordonsteknik och Autonoma System

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2018

Aerodynamiska krafter vid hård inbromsning
Numerisk beräkning av luftmotståndskoefficient på en personbil vid hård inbromsning med två olika accelerationsmodeller.

DANIEL BENJAMINSSON
SANNA JARL
FILIP MILIKIC
NERMA SARKIS KRIKOR
SARA STRAND
ROBIN WAHID

© DANIEL BENJAMINSSON, SANNA JARL, NERMA SARKIS KRIKOR, SARA STRAND, FILIP MILIKIC, ROBIN WAHID, 2018.

Handledare: Magnus Urquhart, avdelningen för Fordonsteknik och Autonoma System

Examinator: Simone Sebben, avdelningen för Fordonsteknik och Autonoma System

Kandidatarbete 2018:04
Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Avdelningen för Fordonsteknik och Autonoma System
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Försättsblad: Strömlinje längs DrivAer med spoiler.

Typeset in L^AT_EX
Göteborg, Sverige, 2018

Sammandrag

Säkerhet är en faktor som idag prioriteras högt inom fordonsindustrin. En viktig del inom området är förståelsen för inbromsningsförlopp. Det är väsentligt att förstå på vilka sätt diverse faktorer påverkar ett inbromsningsförlopp. En av dessa faktorer är aerodynamiska krafter. Syftet med studien var att studera inverkan av aerodynamiska krafter på ett fordon vid hård inbromsning. Detta utfördes med hjälp av Computational Fluid Dynamics (CFD) och en DrivAer-modell för att ge approximativa numeriska resultat.

Simuleringarna visade att vid hård inbromsning påverkar vaken en personbil med en kraft i samma storleksordning som luftmotståndet på bilens framsida. Det visades även att vaken välter över fordonet efter att bilen fullständigt bromsat in. Ackumulerad c_D över bilens längd visade att främre delen av bilen gav ett negativt bidrag medan bakre delen av bilen gav ett positivt bidrag till c_D . Det konstaterades att en spoiler i de flesta fall ger ett högre värde på c_D . Vid 60-80 km/h visade sig ett jämviktsläge där resulterande c_D på bilen var noll för samtliga fall. Bromssträckan blev cirka 63 meter för fallet med spoiler, utan spoiler blev den 1 meter kortare. Sammanfattningsvis är spoilerns effekt på inbromsningen liten.

Abstract

Vehicle safety is currently highly prioritized in the automotive industry. An important part in the field is the understanding of the deceleration of a vehicle. It is essential to understand how various factors impact the braking process. One of these factors is the aerodynamic forces. The purpose of the study is to investigate the impact of aerodynamic forces acting on a vehicle during severe braking. This is done using Computational Fluid Dynamics (CFD) and a DrivAer model to obtain approximative numerical results.

The simulations showed that in case of severe braking, the wake exerts a force on the back of the vehicle in the same order of magnitude as the air resistance on the front of the vehicle. In addition it was shown that the wake at some point moved over the vehicle during the braking. Accumulated c_D along the car showed that the front of the car gave a negative contribution while the rear of the car gave a positive contribution to c_D . It was also found that in most cases a spoiler will result in a higher value of c_D . Around 60-80 km/h an equilibrium point where the resulting c_D on the vehicle was zero was found for all investigated cases. The breaking distance for the spoiler case was 63 meters and without the spoiler it became 1 meter shorter. Conclusively, the effect of the spoiler on the deceleration is relatively small.

Förord

Ett stort tack riktas till vår handledare Magnus Urquhart, doktorand i forskargruppen för fordonsaerodynamik, för handledning och hjälp under studiens gång. Genom sin gedigna kunskap, tillgänglighet och inte minst sitt genuina engagemang har Magnus varit en värdefull och uppskattad tillgång.

Vi vill tacka Simone Sebben, docent och avdelningschef för fordonsteknik och autonoma system, som tillät att denna studie genomfördes. Simone har även gett inspiration via föreläsningar och har tack vare sina erfarenheter kunnat ge oss mer vägledning i projektet.

Vi tackar Emil Ljungskog, doktorand i forskargruppen för fordonsaerodynamik, som genom sin kunskap inom bland annat STARCCM+ har varit behjälplig under arbetets gång.

Slutligen tackar vi Alik Berndtsson, Robin Hagvall, Erik Josefsson, Filip Ljungqvist, Mattias Persson och Love Roos som lät oss använda deras bearbetade DrivAer-modell från föregående år.

Författarna, Göteborg, maj 2018

Innehåll

Nomenklatur och förkortningar	xi
Figurer	xiii
Tabeller	xv
1 Inledning	1
1.1 Tidigare forskning	1
1.2 Syfte	2
1.3 Mål	2
1.4 Avgränsningar	2
2 Strömningsteori	3
2.1 Navier-Stokes ekvationer	3
2.2 Reynolds transportteorem	3
2.2.1 Masskonservering	4
2.2.2 Rörelsemängdskonservering	4
2.3 Reynoldstalet	4
2.4 Gränsskikt	4
2.5 Reynolds-Averaged Navier-Stokes ekvationer	5
2.6 Krafter till följd av aerodynamik	6
2.7 Kraftkoefficienter	6
3 CFD-teori	7
3.1 Finita volymmetoden	7
3.2 Turbulensmodell	7
3.3 Moving Reference Frames	8
3.4 Couranttal	8
4 Metod	9
4.1 Förbearbetning	9
4.1.1 DrivAer-modell	9
4.1.2 Spoiler	10
4.1.3 Vindtunnel	11
4.1.4 Framtagning av beräkningsnät	11
4.2 CFD-simulering	13
4.2.1 Randvillkor	13

4.2.2	Optimering av tidssteg	14
4.2.3	Acceleration	14
4.2.3.1	Experimentell acceleration	14
4.2.3.2	Stegformad acceleration	16
4.2.4	Styrning av simulering	16
4.2.5	Källterm	17
4.3	Efterbearbetning	17
5	Resultat	19
5.1	Jämförelse av accelerationsmodeller	19
5.2	Hastighetsfält	20
5.3	Resulterande kraftkoefficient på bilen	22
5.4	Kraftjämvikt	23
5.5	Kraftfördelning över bilen	24
5.6	Bromssträcka	27
6	Diskussion	29
6.1	Samhälleliga och etiska aspekter	29
6.2	Framtida forskning	30
6.2.1	Spoilerdesign	30
6.2.2	Båtar	30
6.2.3	Närmare verkligheten	30
7	Slutsats	33
	Litteraturförteckning	35
A	Y+ för DrivAer-modell med spoiler	I

Nomenklatur och förkortningar

Strömningsteori

RTT	Reynolds transportteorem
KV	Kontrollvolym
KY	Kontrollyta
B	Extensiv storhet
β	Intensiv storhet
ρ	Densitet [kg/m ³]
$\mathbf{V}_r$	Relativ hastighetsvektor [m/s]
m	Massa [kg]
Re	Reynoldstal
L_c	Karaktäristisk längd [m]
μ	Dynamisk viskositet [kg/s·m]
n	Normalvektor
F_D	Luftmotstånd [N]
F_L	Lyftkraft [N]
F_S	Sidokraft [N]
c_D	Luftmotståndskoefficient
c_L	Lyftkraftskoefficient
A_p	Projicerad area [m ²]
V_∞	Friströmshastighet [km/h]
τ	Skjuvspänning [N/m ²]
g	Tyngdaccelerationen [m/s ²]
p	Tryck [Pa]
ν	Kinematisk viskositet [m ² /s]
y^+	Dimensionslöst väggavstånd
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
URANS	Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes

CFD-teori

CFD	Computational Fluid Dynamics
STARCCM+	Programvara för CFD
MATLAB	Programvara för matematiska och tekniska beräkningar
k- ϵ	Turbulensmodell
FVM	Finita volymmetoden
MRF	Moving Reference Frame
CFL	Couranttal

Metod

ω	Vinkelhastighet [rpm]
R	Hjulradie [m]
ABS	Antiblockeringssystem
$\mathbf{a}$	Accelerationsvektor [m/s^2]
a_{xn}	Longitudiell konstant retardation [m/s^2]
a_{max}	Maximal acceleration [m/s^2]
t_3	Total retaradionstid [s]

Figurer

2.1	Gränsskikt längs en plan platta.	5
2.2	DrivAer-modellen och dess lokala koordinatsystem, samt de krafter och strömningshastigheter som verkar relativt koordinatsystemet. . . .	6
3.1	Elementtyper från vänster till höger: tetrahedral, hexahedral, polyhedral.	7
4.1	Flödesschema över arbetsgångens bestående av tre huvuddelar förbe- arbetning, CFD-simulering och efterbearbetning.	9
4.2	Bakhjulet på DrivAer-modellen med korresponderande hjulradie. . . .	10
4.3	Plan undersida på DrivAer-modellen.	10
4.4	Detaljerad undersida på DrivAer-modellen.	10
4.5	DrivAer-modell med spoiler.	11
4.6	Vindtunnel med DrivAer-modellen. Avstånden L_1 och L_2 är 20 re- spektive 25 billängder.	11
4.7	Indelningen av förfiningsområden sedd från sidan.	13
4.8	Indelningen av förfiningsområden sedd från underredet utan hjul. . .	13
4.9	Förenklad accelerationsfunktion för experimentellt inbromsningsför- lopp. t_1 , t_2 och t_3 är deltidet för de olika delarna i accelerationen. $a_x n$ har värdet 0.9 g.	15
5.1	Experimentell och stegformad acceleration, där den blå kurvan mot- svarar den experimentella modellen och den röda motsvarar stegfor- mad acceleration. Den streckade linjen är en ideal stegfunktion som referens.	20
5.2	Hastighetsfält vid specifika hastigheter för det experimentella inbroms- ningsförloppet. I figuren jämförs bil med respektive utan spoiler i det globala referenssystemet.	22
5.3	Total c_D på bilen under inbromsningsförloppet. Den blå kurvan mot- svarar fallet utan spoiler och den röda med spoiler. De två spikarna kommer från diskontinuiteter i accelerationen.	23
5.4	Ackumulerad c_D utan spoiler för 14 tidpunkter längs med bilen. c_D för första tidpunkt är röd och för sista är blå, däremellan är det en kontinuerlig färgövergång.	25
5.5	Ackumulerad c_D med och utan spoiler vid körning i 120 km/h innan inbromsning.	26

5.6	Akkumulerad c_D med och utan spoiler vid hastigheten 112 km/h, där accelerationerna skiljer sig som mest.	27
A.1	$y+$ över DrivAer-modell med spoiler.	I

Tabeller

4.1	Beräkningsnätets förfiningar i olika områden.	13
4.2	Randvillkor för samtliga ränder i beräkningsdomönen.	14
4.3	Tidsindelning av retardationsförloppet, där t_3 är den totala inbromsningstiden.	15
5.1	Tidpunkt och hastighet när jämviktsläget för c_D inträffade i fyra olika fall.	24
5.2	Bromssträckan för fyra olika fall.	27

1

Inledning

Vid utveckling av personbilar ställs allt högre krav på säkerhet, där nollvisionen eftersträvas. Nollvisionen är en svensk vision som innebär att ingen ska omkomma eller skadas allvarligt i vägtrafiken [1]. Att säkra inbromsningsförlopp, och därmed korta ner inbromsningssträcka, är ett viktigt förbättringsområde.

Fordon i rörelse påverkar den omgivande luften och orsakar turbulens. Fordonet drar med sig en luftmassa som bildar en vak där höga hastigheter förekommer, vilket försvårar inbromsningen. Inbromsning innebär acceleration motriktad fordonets rörelseriktning, även kallad retardation. Luftens hastighet förändras, där kraftväxelverkan med fordonet beskrivs av Newtons kraftlagar. Under inbromsningen är det intressant att undersöka storlek och fördelning av samtliga krafter som verkar på fordonet. Detta i syfte att erhålla en ökad förståelse för inbromsningsförloppet och därmed utveckla säkrare fordon med effektivare bromsförmåga.

Under utvecklingsprocessen av fordon, där syftet är att förbättra aerodynamiska egenskaper, genomförs både fysiska och numeriska tester. De fysiska testerna består främst av experiment i vindtunnlar med den huvudsakliga begränsningen att de ofta endast kan återskapa konstanta körförhållanden. En fördelen med numeriska beräkningar är att det är möjligt att variera körsituationen så att exempelvis inbromsning kan simuleras. Ytterligare en fördel är att man inte behöver bygga en fysisk modell. Detta möjliggör en billigare och snabbare utvärdering av olika teorier jämfört med fysiska experiment vilket även kan ge tidigare resultat i projekt. Ett exempel på en specifik komponent som kan undersökas är en så kallad spoiler. Inverkan av en spoiler på inbromsningsförloppet kan kartläggas genom att jämföra simuleringar med respektive utan spoiler.

1.1 Tidigare forskning

Tidigare forskning över accelerationsförlopp har bland annat genomförts av Lewis et.al. vilket har underlättat förståelsen för inbromsningprocessen [2]. Studien jämför olika metoder att simulera ett inbromsningsförlopp med CFD. Resultatet visade att två metoder var tillämpbara, deformation av beräkningsnätet eller ett tidsvarierande inlopp med en pålagd källterm, se Avsnitt 4.2.5 för källtermen. Lewis et.al. genomförde simuleringar på en kub vilket begränsar användning av de resultat studien resulterade i. Ytterligare har J. Katz gjort CFD-simuleringar på fordon i rörelse, däremot inte för accelererad rörelse [3]. Det finns flera studier med CFD-simuleringar

genomförda på personbilar, men inga publicerade som undersöker inbromsningsförlopp i CFD.

1.2 Syfte

Studien syftar till att beskriva hur aerodynamiska effekter påverkar ett fordon vid hård inbromsning. Mer specifikt önskas tidsutvecklingen av flödet runt, samt krafterna på, bilen att beskrivas. Det totala kraftbidraget, såväl som kraftfördelningen över bilens yta, undersöks vid flera tidpunkter. Två accelerationsmodeller jämförs samt inverkan av spoiler studeras.

1.3 Mål

Studien förväntades resultera i färdiga simuleringar av inbromsningsförloppet som skulle bidra till en ökad förståelse för hur strömningen inverkar på en bil vid hård inbromsning. Ytterligare ett mål var att avgöra om en spoiler påverkar inbromsningsningens effektivitet.

1.4 Avgränsningar

Samtliga simuleringar avgränsades till rakställda hjul på fordon som färdas rakt. Avgränsningarna var nödvändiga eftersom beräkningskapaciteten var begränsad. Flera förenklingar ansattes på DrivAer-modellen för att spara ytterligare beräkningskapacitet, för detaljerad information se Avsnitt 4.1. Samtliga termodynamiska effekter försumrades, eftersom de förväntades ha en försumbar inverkan. Fluiden som betraktades var luft och turbulensmodellen som användes var $k-\epsilon$. Turbulensmodellen möjliggjorde ett grövre beräkningsnät nära ytor jämfört med andra modeller, vilket sparade beräkningskapacitet.

Simuleringarna genomfördes på en bil under inbromsning. Ingen hänsyn togs till specifika egenskaper hos bromsarna. Dessutom antogs det verka konstant friktion på däckens under hela inbromsningsförloppet. Slutligen togs ingen hänsyn till pitchningen på bilen.

Projektet var tidsbegränsat till våren 2018 med cirka 20 timmar per gruppmedlem per vecka. Dessutom begränsades beräkningskapaciteten till 5000 coretimmar per månad på Chalmersklustret Hebbe.

2

Strömningsteori

I följande avsnitt presenteras grundläggande strömningsteori som används i de CFD-simuleringar som genomförts. Om inget annat anges refereras teorin till *Fluid Mechanics* [4].

2.1 Navier-Stokes ekvationer

Navier-Stokes ekvationer (NS) beskriver flödet av en Newtonsk, inkompressibel fluid. Ekvationerna beskrivs enligt

$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \rho \mathbf{g}, \quad (2.1)$$

där $\mathbf{g}$ är vektorn för tyngdaccelerationen, ρ är fluidens densitet, μ fluidens viskositet, $\mathbf{V}$ är hastighetsvektorn och p är trycket.

2.2 Reynolds transportteorem

Reynolds transportteorem (RTT) är ett analytiskt verktyg som applicerar konserveringslagar på ett system genom att se det som en kontrollvolym. RTT beskrivs enligt

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{B}_{sys}) = \frac{d}{dt} \left(\int_{KV} \beta \rho dV \right) + \int_{KY} \beta \rho (\mathbf{V}_r \cdot \mathbf{n}) dA, \quad (2.2)$$

där $\mathbf{V}_r$ är den relativa hastighetsvektorn, $\mathbf{n}$ normalvektorn, $\mathbf{B}_{sys}$ en extensiv storhet som representerar antingen massa, energi, krafter eller moment och β motsvarande intensiva storhet som ges av massdifferentialen

$$\beta = \frac{d\mathbf{B}_{sys}}{dm}. \quad (2.3)$$

2.2.1 Masskonservering

Masskonservering är ett specialfall av RTT som erhålls genom att $\mathbf{B}$ i ekvation (2.2) ansätts till massa m vilket med ekvation (2.3) ger $\beta = 1$. Det resulterande sambandet blir därmed

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{sys} = \frac{d}{dt} \left(\int_{KV} \rho dV \right) + \int_{KY} \rho (\mathbf{V}_r \cdot \mathbf{n}) dA = 0. \quad (2.4)$$

2.2.2 Rörelsemängdskonservering

Rörelsemängdskonservering är ytterligare ett fall av RTT där $\mathbf{B}$ ansätts till rörelsemängd $m\mathbf{V}$ i ekvation (2.2) vilket enligt ekvation (2.3) ger $\beta = \mathbf{V}$. Rörelsemängdskonservering beskrivs därmed enligt

$$\frac{d}{dt}(m\mathbf{V})_{sys} = \sum \mathbf{F}_{sys} = \frac{d}{dt} \left(\int_{KV} \rho \mathbf{V} dV \right) + \int_{KY} \rho \mathbf{V} (\mathbf{V}_r \cdot \mathbf{n}) dA. \quad (2.5)$$

2.3 Reynoldstalet

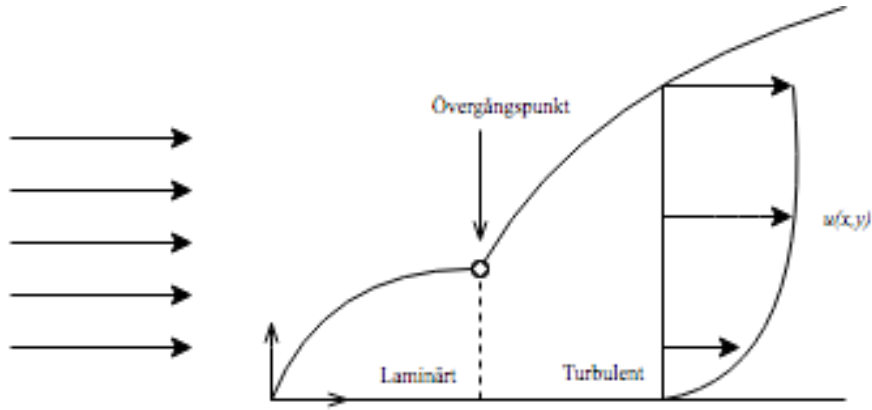
Reynoldstalet (Re) är ett dimensionslöst tal som anger förhållandet mellan de viskösa krafterna och tröghetskrafterna i en fluid. Re specificerar även strömningens karaktär. Strömningen klassas som laminär vid låga Re och turbulent vid högre Re . Re definieras enligt

$$Re = \frac{\rho V L_c}{\mu}, \quad (2.6)$$

där L_c är en karaktäristisk längd och μ är fluidens dynamiska viskositet.

2.4 Gränsskikt

När en fluid strömmar över en yta med en friströmshastighet U_∞ skapas ett gränsskikt nära ytan till följd av friktionen mellan fluiden och ytan. Gränsskiktet definieras av att fluidens hastighet u är mindre än 99% av U_∞ . Gränsskiktet kan i sin tur delas upp i ett laminärt och ett turbulent område, se Figur 2.1. Omslagspunkten mellan dessa sker vid Re_x som definierar övergången mellan områdena. För en plan platta ligger omslagspunkten vid $5 \cdot 10^5$.



Figur 2.1: Gränsskikt längs en plan platta.

Det turbulenta gränsskiktet vid en vägg delas upp i tre skikt: det viskösa underskiktet, buffertsiktet och det fullt turbulenta skiktet. Närmast väggen, $0 < y^+ < 5$, verkar det viskösa underskiktet där den kinematiska viskositeten ν dominerar. Mellan det viskösa underskiktet och det fullt turbulenta skiktet verkar buffertsiktet, där både kinematisk viskositet och turbulent viskositet inverkar. Ytterst ligger det fullt turbulenta skiktet som även kallas för loglagret, där den turbulenta viskositeten ν_t dominerar. Lagret går från $30 < y^+$ och har en övre gräns som beror på strömningen och geometrin. Oftast räknas loglagrets övre gräns ligga kring 300 - 1000. I skiktet gäller loglagen som beskrivs av

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \underbrace{\frac{yu^*}{\nu}}_{y^+} + B, \quad (2.7)$$

där $\kappa \approx 0.41$, $B \approx 5$, u är friströmshastigheten, y är avståndet till ytan, ν är den kinematiska viskositeten och u^* beskrivs av

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_{wall}}{\rho}}. \quad (2.8)$$

2.5 Reynolds-Averaged Navier-Stokes ekvationer

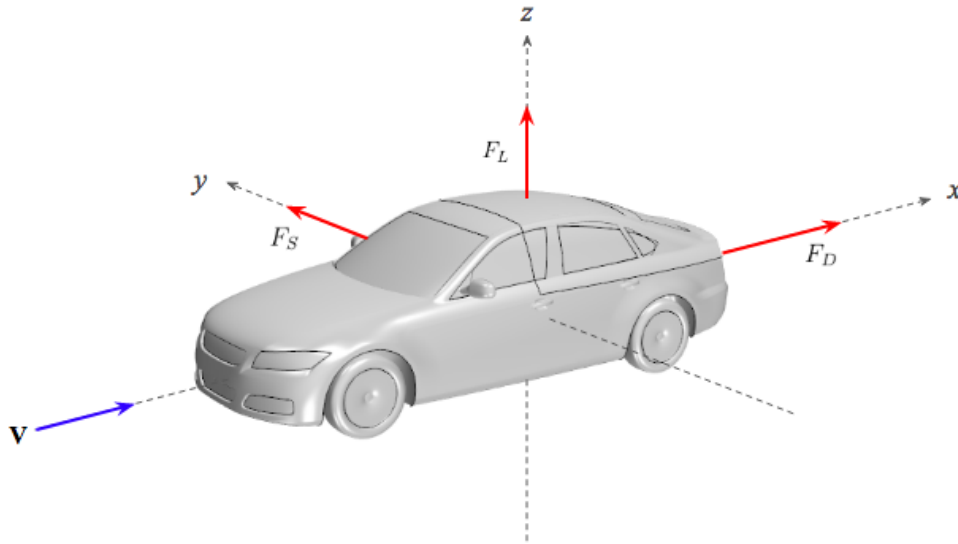
Vid turbulent strömning kan strömning variera mycket i både tid och rum. Reynolds-Averaged Navier-Stokes ekvationer (RANS) innebär en förenkling av NS och möjliggör beräkning för turbulent strömning. Detta görs genom att kombinera hastighets-, tryck- och skjuvkoeficienter i NS till tidsmedelvärderade och fluktuerande termer. Med kartesiska koordinater blir RANS i x-riktning

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \overline{(u'u')}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{(u'v')}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{(u'w')}}{\partial z} \right). \quad (2.9)$$

Eftersom denna studie behandlade instationära flöden användes Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes ekvationer (URANS). URANS är en variant av RANS som tillåter transienta förlopp.

2.6 Krafter till följd av aerodynamik

Aerodynamiska krafter som verkar på en kropp i rörelse delas ofta in i tre komponenter. De tre komponenterna är luftmotstånd F_D , sidkraft F_S och lyftkraft F_L , som verkar i positiv x-, y- respektive z-riktning. Hastigheten $\mathbf{V}$ verkar i positiv x-riktning. Bilens lokala koordinatsystem samt riktningarna på krafterna illustreras i Figur 2.2.



Figur 2.2: DrivAer-modellen och dess lokala koordinatsystem, samt de krafter och strömningshastigheter som verkar relativt koordinatsystemet.

2.7 Kraftkoefficienter

Mellan fordon och omgivande luft uppstår en relativ hastighet V_∞ som genererar ett luftmotstånd och en lyftkraft på bilens projicerade area A_p ortogonalt mot färdriktningen. Från krafterna kan de normaliserade, dimensionslösa luftmotstånds- och lyftkraftskoefficienterna c_D och c_L beräknas enligt

$$c_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 A_p} \quad (2.10)$$

$$c_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 A_p}. \quad (2.11)$$

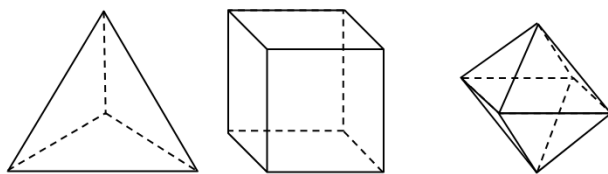
3

CFD-teori

Computational Fluid Dynamics (CFD) är en numerisk metod för att lösa strömningsrelaterade problem. I följande avsnitt presenteras de grundläggande modeller och koncept som tillämpades.

3.1 Finita volymmetoden

Finita volymmetoden (FVM) används vid diskretisering av en beräkningsdomän genom att domänen delas upp i volymselement i form av finita kontrollvolymmer [5]. Olika typer av kontrollvolymmer är tetra-, hexa-, och polyhedralceller, se Figur 3.1. Därutöver finns även så kallade prismor, som är en undergrupp av polyhedralceller. Prismorna ligger närmast modellens yta för att kunna lösa upp geometrin för att erhålla en jämn övergång från ytan till cellerna samt mellan cellerna.



Figur 3.1: Elementtyper från vänster till höger: tetrahedral, hexahedral, polyhedral.

I varje enskild kontrollvolym används URANS för att få fram numeriska lösningar. Lösningarna ger randvärden till intilliggande celler som används för att lösa URANS i dessa. På detta sätt transporteras information runt i beräkningsnätet tills det har konvergerat.

3.2 Turbulensmodell

En vanlig turbulensmodell som används inom CFD för att simulera med hjälp av URANS är k - ϵ . Turbulensmodellen använder variablerna k och ϵ , vilka representerar den turbulenta kinetiska energin respektive dissipationstakten för den kinetiska energin. Med hjälp av dessa variabler beräknas numeriska lösningar till URANS i varje enskild cell. Generellt används modellen för simuleringar nära friströmning. Modellen har fördelarna att ge relativt snabb konvergens med lägre krav på arbetsminnet än andra modeller [6]. För att erhålla tillförlitliga resultat från turbulensmodellen

k- ϵ måste modellen som beräkningarna utförs på befinna sig i det turbulenta gränsskiktet. För att garantera detta ska y^+ anta värden inom intervallet $30 < y^+ < 200$, se Avsnitt 2.4. Detta anpassas genom justeringar av beräkningsnätet, se Avsnitt 4.1.4.

3.3 Moving Reference Frames

Moving Reference Frames (MRF) används för att simulera rörelse vid användning av stationära beräkningsnät. Genom att tilldela ett beräkningsdomän en hastighet sätts det lokala referenssystemet i rörelse [7]. Detta genererar en relativ hastighet mellan objekt och beräkningsdomän, trots att objektet har hastigheten noll. Alltså tilldelas objektet en hastighet i det globala referenssystemet, medan i det lokala referenssystemet står objektet still medan fluiden rör sig.

3.4 Couranttal

Couranttal (CFL) är ett dimensionslöst tal som beskriver hur en cell med längden Δl förflyttas under ett tidssteg Δt enligt

$$CFL = \bar{v} \frac{\Delta t}{\Delta l}, \quad (3.1)$$

där $\bar{v}$ är medelhastigheten för cellen vid den aktuella tidpunkten [8]. Fördelen med att använda CFL är att risken för informationsförlust, som följd av ett för stort tidssteg, minskar. Tidssteget anpassas efter cellstorleken och fluidhastigheten så att alla celler inkluderas. CFL används i Lösingsmodellen *Convective CFL Time-Step Control* för att erhålla ett adaptivt tidssteg.

4

Metod

Projektets metod bestod av tre huvuddelar: förbearbetning, CFD-simulering och efterbearbetning. En grov översikt av samtliga processer illustreras av flödesschemat i Figur 4.1.



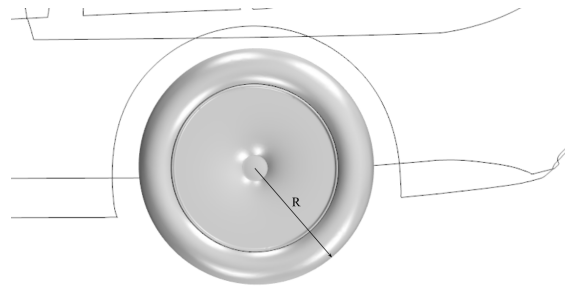
Figur 4.1: Flödesschema över arbetsgångens bestående av tre huvuddelar förbearbetning, CFD-simulering och efterbearbetning.

4.1 Förbearbetning

Först genomfördes en geometribearbetning av DrivAer-modellen. Därefter konstruerades en beräkningsdomän och vindtunnel, där dimensionerna baserades på DrivAer-modellens mått. Sedan integrerades bilmodellen i beräkningsdomänen och det tilldelades randvillkor. Slutligen implementerades MRF på beräkningsdomänen och en beräkningsnätstudie genomfördes.

4.1.1 DrivAer-modell

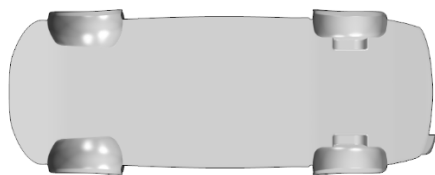
Simuleringarna genomfördes på en DrivAer-modell, vilket är en generaliserad fordonmodell framtagen av TU München i samarbete med Audi och BMW [9]. Eftersom sidokrafter ansågs ha försumbar inverkan på resultatet relativt krafterna i färdriktningen fylldes hjulen och fälgarna slätades ut, se Figur 4.2. Detta gjordes för att bespara beräkningskapacitet.



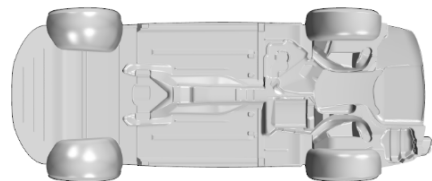
Figur 4.2: Bakhjulet på DrivAer-modellen med korresponderande hjulradie.

Genom att skapa lokala koordinatsystem i hjulens rotationscentrum konstruerades en verklighetstrogen rotation. Två separata cylindriska koordinatsystem med axlarna (r, θ, z) skapades vid fram- respektive bakhjulen. Utifrån hjulradien 0,305 meter i Figur 4.2 erhöles rotationshastigheten från Ekvation (4.6).

För att bespara beräkningskapacitet valdes en plan undersida som illustreras i Figur 4.3, istället för en detaljerad undersida som visas i Figur 4.4, vilket reducerade underredets inverkan på omgivande luftflöde. Dessutom studerades enbart halva fordonsmodellen eftersom strömningen antogs vara symmetrisk kring DrivAer-modellens symmetriplan.



Figur 4.3: Plan undersida på DrivAer-modellen.



Figur 4.4: Detaljerad undersida på DrivAer-modellen.

Minskad detaljnivå kan vara en risk för bortfall av data men besparad beräkningskapacitet prioriterades högre än eventuell detaljförlust. Bortfallet antogs dessutom vara tillräckligt litet för att inte förhindra studiens mål.

4.1.2 Spoiler

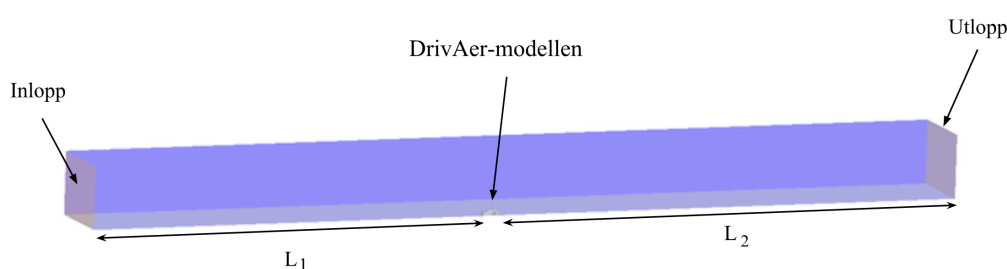
För att undersöka effekten av en luftbroms monterades en spoiler på DrivAer-modellen, se Figur 4.5. Spoilerns geometri skapades med hjälp av programvaran Catia V5. Utgångspunkten vid design av spoilern var en redan existerande spoiler från en Audi A7.



Figur 4.5: DrivAer-modell med spoiler.

4.1.3 Vindtunnel

Vindtunneln är ett rätblock som utgör beräkningsnätets yttre gränser. Vindtunnelns dimensioner baserades på DrivAer-modellens mått. DrivAer-modellens frontalarea utgjorde mindre än 1% av vindtunnelns tvärsnittsarea. Avståndet från inloppet till modellen var 20 billängder medan avståndet från modellen till utloppet var 25 billängder. Detta avstånd är större eftersom att vaken existerar bakom bilen och är därför viktigare att undersöka. I Figur 4.6 visas dessa två avstånd som L_1 och L_2 .



Figur 4.6: Vindtunnel med DrivAer-modellen. Avstånden L_1 och L_2 är 20 respektive 25 billängder.

4.1.4 Framtagning av beräkningsnät

Vid framtagning av beräkningsnät krävdes en kompromiss mellan önskad detaljnivå och tillgänglig beräkningskapacitet. Detta ledde till en variation av cellstorlekar inom beräkningsområdet eftersom det önskades mer information nära fordonet än

långt ifrån. Därför genomfördes en beräkningsnätstudie.

Inledningsvis identifierades områden där större gradienter förväntades i strömningen och dessa fick ett finare nät för att kunna fånga upp fler detaljer. Dessa områden var vid bilens yta samt i vaken. Det antogs att vaken till viss del skulle falla över bilen när den retarderade. Därför sträckte sig det volymförfiningen kring DrivAer-modellen både framför och bakom bilen.

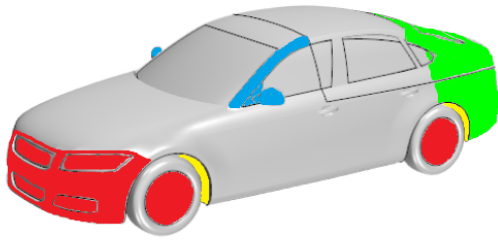
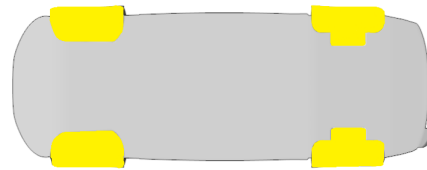
Under den första delen av beräkningsnätstudien anpassades det innersta prismalagrets tjocklek så att samtliga ytor på modellen fick ett y^+ inom intervallet 30-200, se Avsnitt 3.2. Detta gav tjockleken på de innersta prismalagren enligt Tabell 4.1 vilket illustreras i Figur 4.7 och Figur 4.8. De resulterade y^+ -värdena redovisas i Appendix A. Vissa områden hade värden på y^+ som ligger utanför intervallet 30-200. Dessa områden var däremot relativt små och var placerade där flödesinverkan antogs vara försumbart liten. Ett av dessa områden var stagnationspunkten där hastigheten är noll vilket gör det omöjligt att erhålla ett y^+ inom det önskade intervallet om beräkningar görs vid bilens yta. Utöver stagnationspunkten låg de avvikande områdena framförallt inuti hjulhusen. De stora värdena på y^+ bedömdes där vara en följd av ökad turbulens på grund av hjulens rotation. Eftersom det var strömningen kring bilen som studerades hade de vertikala sidorna störst inverkan på flöde. Avvikelsen av y^+ för områdena inne i hjulhusen ansågs vara försumbara. Avvikelsen hade troligen en inverkan men för att kunna avgöra hur stor denna var hade det krävts en separat studie, vilket hamnar utanför detta projekts ramar och avvikelserna antogs vara försumbara.

Efter undersökning av y^+ förfinades cellstorlek tills konvergens uppnåddes. Konvergens ansågs uppnådd när c_D respektive c_L varierade med mindre än 1% mellan två förfiningsnivåer, enligt S. Sebben (personlig kommunikation, 16 januari 2018). Det gjordes även en visuell bedömning huruvida vakens struktur varierade mellan två förfiningsnivåer. De förfiningar som valdes att studera var grundcellstorlek i vindtunneln, grundcellstorlek för volymförfining kring bilen, basstorlek för prismorna vid bilens yta samt antalet prismalager som sträckte sig ut från bilens yta.

Resultatet av beräkningsnätstudien var en vindtunnel med 58 miljoner celler. Grundcellstorleken i vindtunneln sattes till 500 millimeter och grundcellstorleken på volymförfiningen till 20 millimeter. Måtten för förfiningen av bilens yta presenteras i Tabell 4.1.

Tabell 4.1: Beräkningsnätets förfiningar i olika områden.

Förfiningsområde	Tjocklek på innersta prismalager [mm]	Antal prismalager	Total tjocklek på prismalagren [mm]
Gul	2,7	8	44,5
Röd	2,0	8	33,0
Grå	1,5	9	31,2
Grön	1,4	9	30,0
Blå	1,1	9	22,9

**Figur 4.7:** Indelningen av förfiningsområden sedd från sidan.**Figur 4.8:** Indelningen av förfiningsområden sedd från underrecket utan hjul.

Trots förfiningarna konvergerade inte basstorleken för prismorna till helt under 1 % för varken c_D eller c_L , men övriga förfiningar konvergerade. Med begränsad beräkningskapacitet gjordes inte ytterligare förfiningar. Precis som med approximationen för y^+ går det inte att avgöra hur detta inverkar på resultatet utan att utföra ytterligare studier.

4.2 CFD-simulering

Det andra huvudsteget i metoden var simulering i programvaran STARCCM+. Randvillkor sattes på beräkningsnätet och önskade lösningsmodeller valdes. Därefter skrevs ett Javascript i syfte att modellera retardation. Två retardationsfall jämfördes, ett experimentellt och ett som baserades på en stegfunktion samt de krafter som verkade på DrivAer-modellen.

4.2.1 Randvillkor

Vid simuleringarna ansattes randvillkor enligt Tabell 4.2. Samtliga ränder hade den lokala referensramen *Rotating and Translating* vilket medförde att de följde MRF:en för beräkningsdomänen. MRF:en rörde sig över domänen i negativ x-riktning vilket resulterade i en positiv relativ hastighet på DrivAer-modellen. Starthastigheten var 120 km/h varefter hastigheten reducerades till noll under en kraftig inbromsning med hjälp av Javascriptet, se Avsnitt 4.2.4. Även hjulens rotation följde inbromsningen för att erhålla en så verklighetsnära simulering som möjligt.

Tabell 4.2: Randvillkor för samtliga ränder i beräkningsdomänen.

Rand	Randvillkor	Värden
Golv	Vägg	Från $[120, 0, 0]$ km/h till $[0, 0, 0]$ km/h
Tak	Symmetri	-
Inlopp	Hastighetsinlopp	$[0, 0, 0]$ km/h
Utlopp	Tryckutlopp	0.0 Pa
Symmetriplan	Symmetri	-
Vägg	Symmetri	-
Kaross	Vägg	$[0, 0, 0]$ km/h
Hjul och fälgar	Vägg, roterande kring hjulaxel	Från 1043,7 rpm till 0 rpm

4.2.2 Optimering av tidssteg

En tidsstegsstudie gjordes för att optimeras tidssteget i syfte att bespara beräkningskapacitet utan att förlora kontinuitet. Under tidsstegsstudien jämfördes tidssteg från 0,05 till 0,00625 sekunder. Därefter jämfördes c_D och c_L för de olika tidsstegen. Värdena på c_D respektive c_L varierade marginellt för de valda tidsstegen. Det finaste tidssteget krävde inte mycket mer beräkningskapacitet än det grövsta och därför valdes tidssteget till 0,00625 sekunder.

Utöver val av tidssteg användes modellen *Convective CFL Time-Step Control*, se Avsnitt ??, som anpassar tidssteget med hjälp av CFL, se Avsnitt 3.4. Genom att använda *Convective CFL Time-Step Control* erhålls ett adaptivt tidssteg. Det är därmed möjligt att trots ett grövre tidssteg fånga upp all relevant information. Implementering av adaptivt tidssteg resulterade sammanfattningsvis i ett mindre tidssteg under inbromsningens början som sedan blev större senare under inbromsningen enligt Ekvation (3.1).

4.2.3 Acceleration

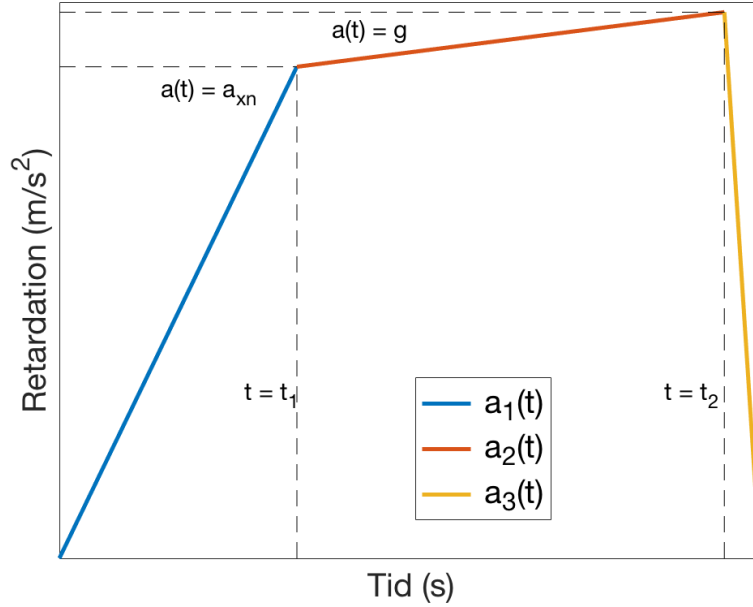
Idealt hade accelerationen varit en stegfunktion. På grund av yttre faktorer som omgivande fluid, friktion mot underlag och ett fordon's bromssystem blir en sådan acceleration omöjlig i verkligheten.

Simuleringar genomfördes på två typer av accelerationsförlopp; acceleration baserad på experimentell data respektive stegformad acceleration med hänsyn till aerodynamiska krafter. Den experimentella accelerationen tog hänsyn till alla omgivande faktorer med nackdelen att det inte gick att avgöra det exakta bidraget från den omgivande luften. Den stegformade inbromsningen användes för att isolera luftens inverkan på den totala accelerationen.

4.2.3.1 Experimentell acceleration

Den första accelerationsmodellen för inbromsningen baserades på en experimentell studie som genomförts på tio personbilar med ABS-bromsar som färdats på torr

asfalt [10]. Det experimentella resultatet förenklades till en acceleration bestående av tre linjära funktioner enligt Figur 4.9 och Tabell 4.3.



Figur 4.9: Förenklad accelerationsfunktion för experimentellt inbromsningsförlopp. t_1 , t_2 och t_3 är deltiderna för de olika delarna i accelerationen. a_{xn} har värdet 0.9 g.

Tabell 4.3: Tidsindelning av retardationsförloppet, där t_3 är den totala inbromsningstiden.

t_1	$t_2 - t_1$	$t_3 - t_2$
$t_3 \frac{10}{87}$	$t_3 \frac{72.5}{87}$	$t_3 \frac{4.5}{87}$

Den maximala accelerationen, a_{max} , låg enligt den experimentella datan mellan 100% och 120% av g, där g är 9,82 m/s² [10]. Baserat på dessa värden ansattes a_{max} och den longitudiella konstanta retardationen a_{xn} till g respektive 0,9g, se Figur 4.9. Med acceleration enligt Figur 4.9 och tidsintervall för respektive accelerationkurva enligt Tabell 4.3 beräknades den totala inbromsningstiden t_3 enligt

$$v_0 - \int_0^{t_1} a_1(t, t_3) dt - \int_{t_1}^{t_2} a_2(t, t_3) dt - \int_{t_2}^{t_3} a_3(t, t_3) dt = 0, \quad (4.1)$$

där t_3 beräknades till 3,90 sekunder. Utifrån de framtagna accelerationsfunktionerna, begynnelsehastighet 33,3 m/s samt att hastigheten var kontinuerlig bestämdes via sambandet

$$v(t) = \int_{\Delta t} a(t) dt \quad (4.2)$$

de motsvarande hastighetsfunktionerna till

$$v_1(t) = 33.3 - 150 \cdot t^2 \quad (4.3)$$

$$v_2(t) = -0.151 \cdot t^2 - 8.70 \cdot t + 0.860 \quad (4.4)$$

$$v_3(t) = 94.9 \cdot t^2 - 190 \cdot t + 331 \quad (4.5)$$

Motsvarande rotationshastighet på hjulen kopplades till bilens hastighet enligt

$$\omega = \frac{v}{R} \quad (4.6)$$

vilket även användes för det andra fallet i Avsnitt 4.2.3.2.

4.2.3.2 Stegformad acceleration

Den stegformade accelerationen utgick från en stegfunktion som motsvarade bromskraften från hjulen. I varje iteration exporterades värdet på kraftkoefficienten c_D varefter F_D beräknades enligt Ekvation (2.10). Accelerationen i nästkommande iteration gavs på så vis av Newtons andra kraftlag. Accelerationen integrerades på samma sätt som i första fallet, se Avsnitt 4.2.3.1, vilket gav hastighetsfunktionen

$$v_{i+1} = v_i - \left(\frac{c_D \rho v_i^2}{m} + a_{xn} \right) \cdot \Delta t, \quad (4.7)$$

där Δt är tidssteget som användes i simuleringarna. Förenklingen innebär att endast luftmassans inverkan betraktades.

4.2.4 Styrning av simulering

I syfte att simulera en verklighetstrogen inbromsning skrevs en Javakod som bland annat uppdaterade hastighet efter varje iteration. Det exporterades även data vid förvalda tidpunkter under inbromsningsförloppet. Tidpunkterna valdes jämnt utspridda för att minimera risken att missa viktiga resultat.

Första delen av koden var en startkörning med syfte att ta fram begynnelsevärden för simuleringen. Detta åstadkoms genom att först köra 2000 iterationer med stationärt flöde. Därefter kördes simulering med instationärt flöde i konstant hastighet på 120 km/h under 2 sekunder för att flödet skulle stabiliseras i hela vindtunneln.

Efter starkörningen påbörjades inbromsningsförloppet. Koden varierade beroende på fall, se Avsnitt 4.2.3.1 och 4.2.3.2. Hastigheterna i STARCCM+ uppdaterades efter varje tidssteg enligt respektive hastighetsfunktion som angivet i Avsnitt 4.2.3.1 och 4.2.3.2. Slutligen när bilen stannat kördes simuleringen i ytterligare 2 sekunder. Detta gjordes för att undersöka hur luften strömmade kring bilen efter att fordonet stannat.

4.2.5 Källterm

För att fortplanta information från tidigare iterationer implementerades en källterm som gav ett bidrag till accelerationen enligt

$$\mathbf{k\ddot{a}llterm} = -\rho \frac{dv}{dt}. \quad (4.8)$$

Källtermen kompenserade för det arbete som fluiden utförde som följd av bilens acceleration. En konsekvens av källtermen är att trycket i vindtunneln ökar. Eftersom trycket anpassas så att det är noll vid utloppet ger detta en tryckgradient över tunneln vilket kan påverka resultatet.

4.3 Efterbearbetning

Scener som exporterades direkt från STARCCM+ som visualiserade hastigheten i symmetriplanet. Hastigheter exporterades både för det lokala och globala referenssystemet. Dessutom sparades data i form av tabeller från STARCCM+ vilka efterbearbetades i MATLAB för att visualisera resultatet. Detta gällde för ackumulerad kraft, hastigheter samt c_D .

Från simuleringarna sparades data för den totalt verkande kraften i varje tidssteg samt den ackumulerade kraften längs bilen. I x-riktning sparades kraften F_D . Från denna beräknades den normaliserade kraftkoefficienten c_D med hjälp av ekvation (2.10).

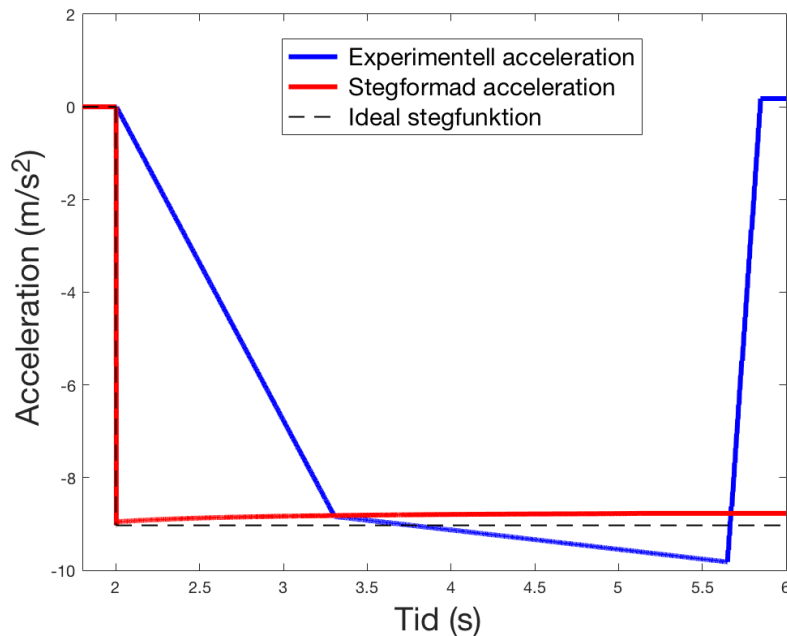
5

Resultat

I följande kapitel redovisas resultat från simuleringarna. Huvudsakligen visualiseras hastigheter, krafter och kraftkoefficienter som verkar på en personbil vid kraftig inbromsning. Jämförelse av jämviktsläge för c_D och bromssträcka för olika fall presenteras. De fall som behandlades var experimentell respektive stegformad inbromsning med och utan spoiler.

5.1 Jämförelse av accelerationsmodeller

I Figur 5.1 visas accelerationerna för experimentell respektive stegformad inbromsning. Det kan noteras från Figur 5.1 att den stegformade inbromsningens avviker från en ideal stegfunktion. Utan luftens inverkan hade det första värdet på cirka $-9,03 \text{ m/s}^2$ bestått under hela inbromsningen, se streckad linje i Figur 5.1. Eftersom simuleringen tar hänsyn till krafterna som verkar på bilen blir accelerationen lite mindre. Maximalt skiljer sig den erhållna accelerationen från en stegfunktion med cirka $0,3 \text{ m/s}^2$ vilket motsvarar en procentuell avvikelse på ungefär 3 %. Luftens inverkan på den resulterande accelerationen bedöms därför vara liten, men ej försumbar, för ett fordon som retarderar kraftigt.



Figur 5.1: Experimentell och stegformad acceleration, där den blå kurvan motsvarar den experimentella modellen och den röda motsvarar stegformad acceleration. Den streckade linjen är en ideal stegfunktion som referens.

Fram till två sekunder är den stegformade accelerationen identisk med den ideala stegfunktionen. Även om det till en början kan verka felaktigt är det rimligt att kurvan ser ut som den gör. I verkligheten är det svårt att uppnå, men det är fortfarande möjligt att bromsa med ett steg. Resultatet från simuleringen med stegformad acceleration ger en uppfattning om luftens procentuella inverkan på accelerationen. Den experimentella accelerationen används för övriga jämförelser med motivationen att den tar hänsyn till fler inverkanse faktorer.

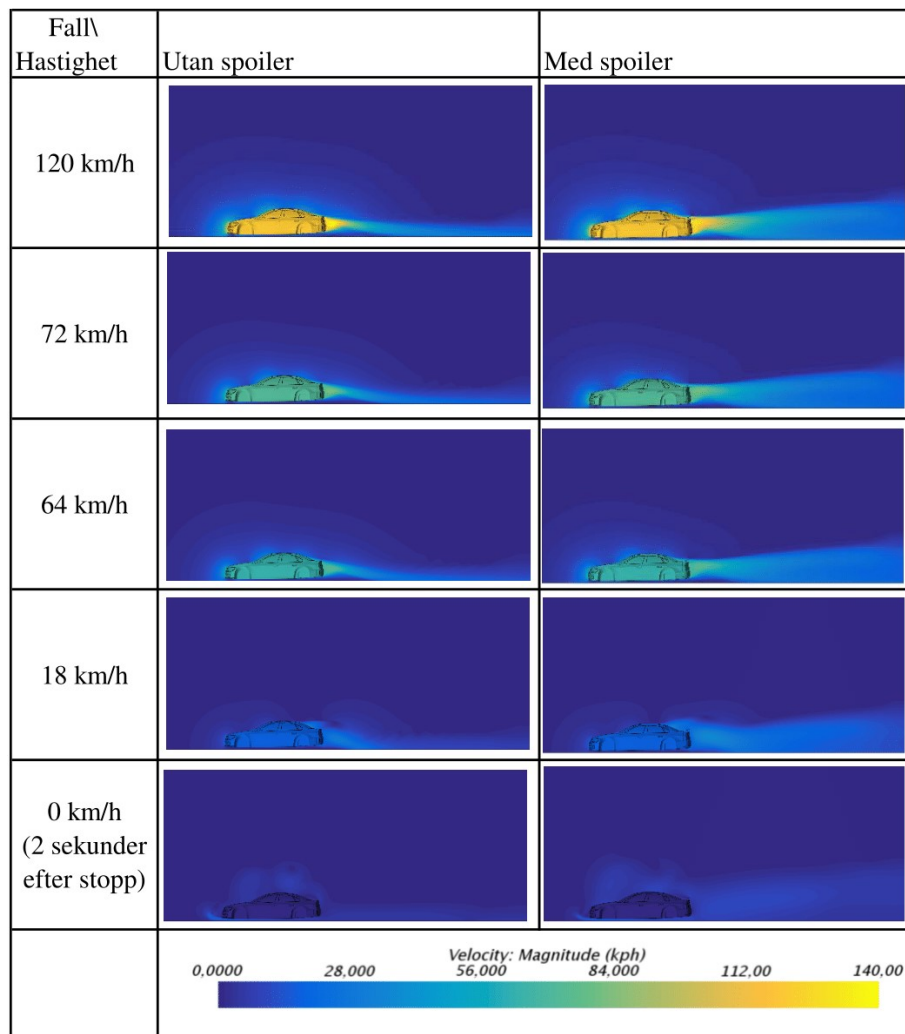
Ingen hänsyn har tagits till lyftkraften. Det hade varit möjligt genom att lägga till en term som är proportionell mot lyftkraftskoefficienten c_L i den stegformade accelerationsmodellen. Beaktning av c_L förväntas ge större avvikelse från den ideala stegfunktionen.

5.2 Hastighetsfält

I Figur 5.2 visas hastighetsfält vid olika hastigheter för det experimentella inbromsningsförloppet för symmetriplanet. I figuren jämförs bil med respektive utan spoiler i det globala referenssystemet. I båda fallen inträffar jämviktsläget för c_D mellan 64 och 72 km/h, se Avsnitt 5.4. Fallet med spoiler har generellt en större vak under hela inbromsningen jämfört med fallet utan spoiler. Detta beror på att luft sugas in under spoilern vilket ger större negativt F_L , se Avsnitt 4.1.2.

Gemensamt för de båda fallen är att när bilen stått stilla i 2 sekunder har vaken

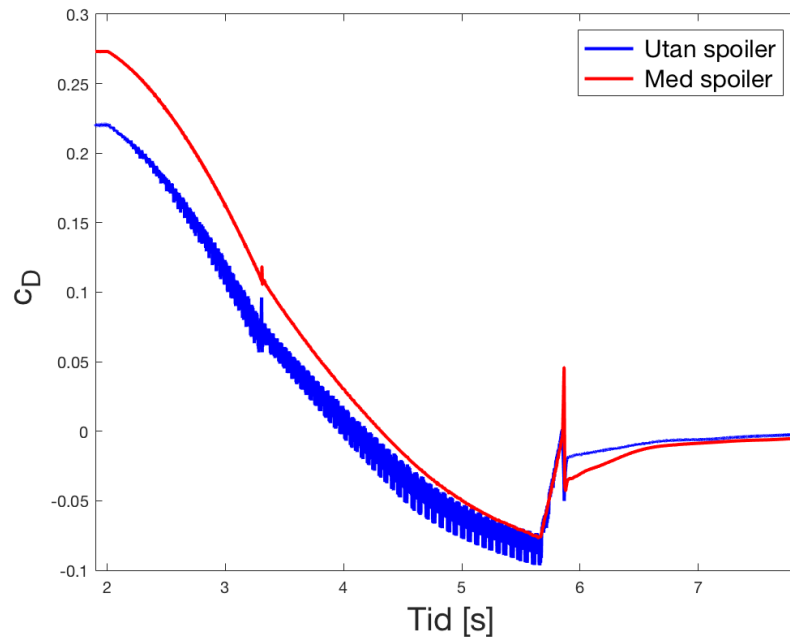
hunnit ifatt och vält över bilen. Detta beror på att luftströmmen bakom bilen inte retarderar lika snabbt som bilen och fortsätter att röra sig framåt även efter att bilen har stannat.



Figur 5.2: Hastighetsfält vid specifika hastigheter för det experimentella inbromsningsförloppet. I figuren jämförs bil med respektive utan spoiler i det globala referenssystemet.

5.3 Resultaterande kraftkoefficient på bilen

Genom att observera hur resulterande c_D utvecklas med tiden kan en överblick av den omgivande fluidens nettoinverkan på bilen erhållas. I Figur 5.3 visas c_D för fallen med respektive utan spoiler. De två spikarna runt 3,2 samt 5,9 sekunder för båda fallen är ett resultat av diskontinuiteten vid övergången mellan de linjära funktionerna för accelerationen, se Figur 4.9. Dessa diskontinuiteter bortses därför från vid analys. Karaktäristiken för utvecklingen av c_D stämmer överens med den som erhöles i studien utförd av Lewis et.al vilket förstärker resultatets tillförlitlighet [2].



Figur 5.3: Total c_D på bilen under inbromsningsförloppet. Den blå kurvan motsvarar fallet utan spoiler och den röda med spoiler. De två spikarna kommer från diskontinuiteter i accelerationen.

Till en början är c_D positiv men övergår till negativ vid 4,4 sekunder. Detta innebär att den omgivande luftens nettokraft är motriktad färdriktningen innan 4,4 sekunder varefter nettokraften är riktad i färdriktningen. För fallet utan spoiler har c_D en flukturerande graf. Detta är troligtvis en följd av olika inställningar mellan fallen med respektive utan spoiler i STARCCM+. Trots det bedöms graferna vara jämförbara för analys. Resultatet c_D skiljer sig som mest vid början av inbromsningen då spoilern genererar ett cirka 22 procent större luftmotstånd. Enligt Figur 5.3 ger spoilern under hela inbromsningsförloppet, fram till 6 s vilket är tidpunkten då bilen stannat, ett positivt bidrag till resulterande c_D . Med andra ord underlättar spoilern inbromsningen.

5.4 Kraftjämvikt

Eftersom c_D går från positiv till negativ under inbromsningsförloppet, se Figur 5.3, finns en jämviktspunkt däremellan. Innan inbromsningsförloppets början är c_D positiv eftersom fordonets hastighet resulterar i ett luftmotstånd. När inbromsningen börjar minskar luftmotståndet på framsidan av fordonet och istället erhålls ett negativt bidrag från vaken. Detta resulterar i ett avtagande c_D . Vid tidpunkterna och motsvarande hastigheter som presenteras i Tabell 5.1 inträffade kraftjämvikt för de olika fallen.

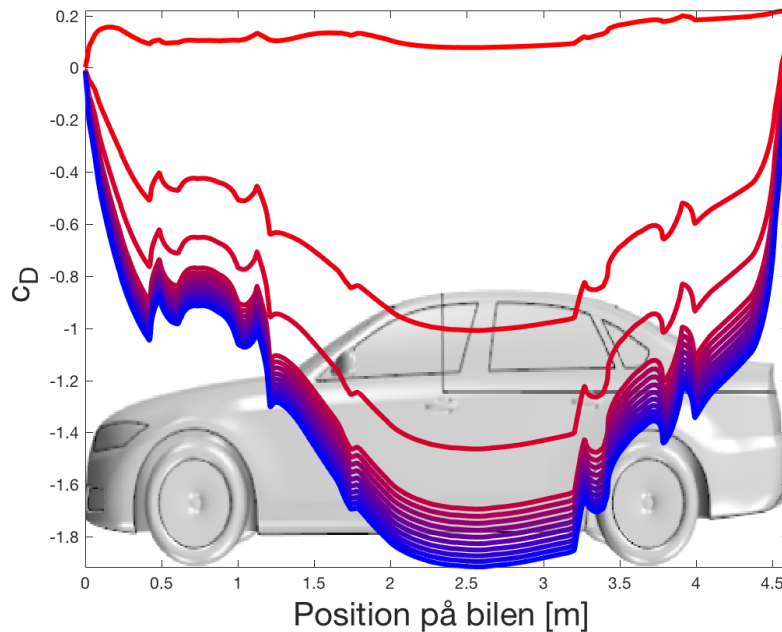
Tabell 5.1: Tidpunkt och hastighet när jämviktsläget för c_D inträffade i fyra olika fall.

Fall	Tid [s]	Bilens hastighet [km/h]
Experimentell inbromsning med spoiler	4,3	67
Experimentell inbromsning utan spoiler	4,4	63
Stegformad inbromsning med spoiler	3,1	66
Stegformad inbromsning utan spoiler	2,8	77

De två experimentella fallens jämviktsläge inträffade vid ungefär samma tidpunkt. Även de två stegformade fallen inträffade vid ungefär samma tidpunkt, men skiljde sig från de experimentella fallen. Skillnaden mellan accelerationsförloppen beror på att den stegformade inbromsningen är kraftigare och verkar direkt, vilket syns i Figur 5.1. Kraftjämvikten uppnås något tidigare med spoiler jämfört med utan spoiler för de experimentella accelerationen medan det är tvärtom för den stegformade accelerationen. Motsägelsen kan bero på mätfel eller inställningsfel. Vid analys av spoilerens inverkan för de två fallen med experimentell acceleration sker dessa nästan vid samma tid. För fallet med spoiler inträffar däremot jämvikten vid högre hastighet. Detta beror på att med spoiler blir kraften som verkar på baksidan av bilen större eftersom spoilern ger upphov till större luftmotstånd. Denna kraft ser ut att ge ett större bidrag än kraften framifrån. Krafterna från vaken påverkar med andra ord aningen mer i fallet med spoiler jämfört med det utan spoiler.

5.5 Kraftfördelning över bilen

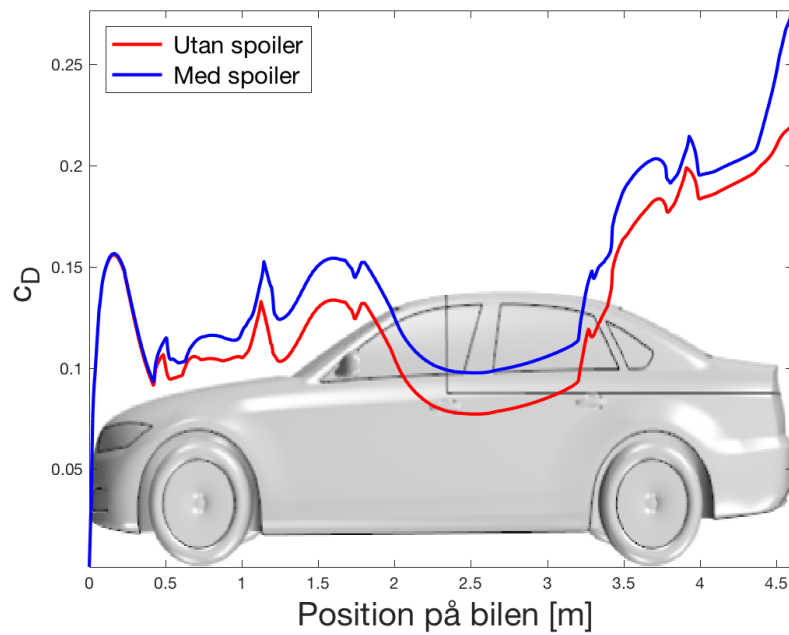
För att undersöka krafterna som verkar på bilen analyserades utvecklingen av den ackumulerade kraften under inbromsningsförloppet över bilens längd. I Figur 5.4 visas ackumulerad c_D för 14 hastigheter under inbromsningsförloppet för fallet med experimentellt inbromsningsförlopp, utan spoiler. Den översta röda kurvan motsvarar c_D precis innan inbromsningen påbörjas vid 120 km/h, varefter tidförloppet presenteras genom en kontinuerlig färgövergång till blått.



Figur 5.4: Ackumulerad c_D utan spoiler för 14 tidpunkter längs med bilen. c_D för första tidpunkt är röd och för sista är blå, däremellan är det en kontinuerlig färgövergång.

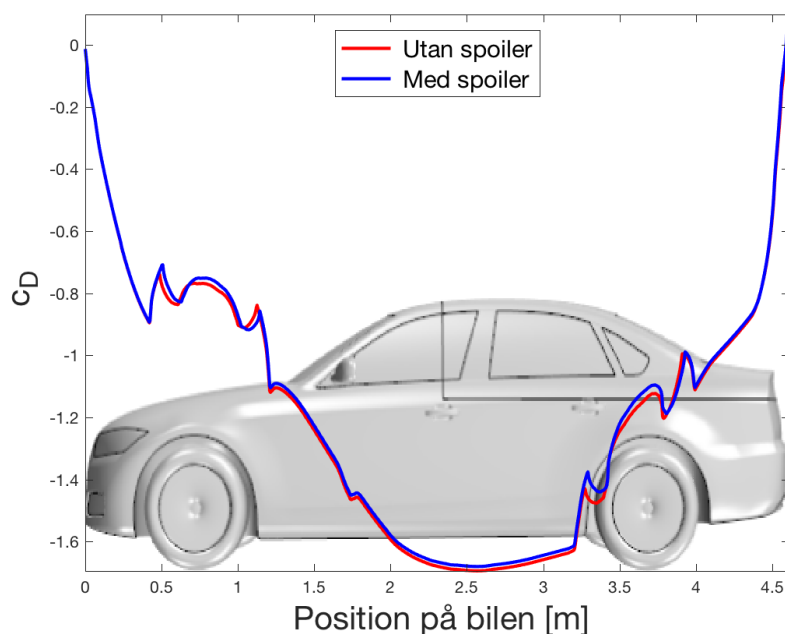
Det första som kan konstateras är att samtliga kurvor, förutom den översta röda kurvan som representerar fallet innan inbromsning, har liknande fördelning av c_D över bilens längd. Krafterna på främre delen av bilen bidrar med en negativ kraft medan bakdelen bidrar med en positiv kraft. Vidare noteras att kurvornas amplitud ökar med tiden, vilket innebär att bidraget från luften på fram- och baksidan ökar under inbromsningen. Bidragen från fram- och baksidan för den sista tidpunkten är i storleksordningen 1,6 till 1,8 för c_D vilket bedöms som mycket stort. Orsaken till de höga c_D ligger i källtermens inverkan vilket leder till ett missvisande resultat av amplitudökningen för de olika tidpunkterna. Trots detta är totalt c_D på bilen inom intervallet -0,1 och 0,3 för samtliga tidpunkter.

För att undersöka fördelningen av c_D med respektive utan spoiler illustreras den i Figur 5.6 vid hastigheten 112 km/h, en hastighet där spoilern har relativt stor inverkan. Denna jämförs med Figur 5.5 som visualiserar ackumulerad c_D utmed bilens längd vid hastigheten 120 km/h. Den röda kurvan representerar fallet utan spoiler och den blå representerar med spoiler. De två kurvorna är lika fram till bilens framhjul varefter den blå kurvan ökar mer men följer samma trend som den röda. Vid spoilerns position, cirka 4 meter från bilens framsida, ökar den blå kurvan kraftigt, vilket visar att spoilern ger ett ökat luftmotstånd och därav högre c_D . Spoilern ger 0,05 högre c_D jämfört med fallet utan spoiler. Skillnaden i c_D kommer troligen från spoilerns inverkan på luftflödet kring bilen, men även numerisk noggrannhet kan påverka resultatet.



Figur 5.5: Ackumulerad c_D med och utan spoiler vid körning i 120 km/h innan inbromsning.

I Figur 5.6 visas ackumulerad c_D vid hastigheten 112 km/h där kraften från vaken för fallen med respektive utan spoiler skilde sig som mest. De två fallen med respektive utan spoiler illustreras på samma sätt som i Figur 5.5. Båda kurvorna följer samma mönster och avviker inte anmärkningsvärt från varandra.



Figur 5.6: Ackumulerad c_D med och utan spoiler vid hastigheten 112 km/h, där accelerationerna skiljer sig som mest.

5.6 Bromssträcka

Resultatet för beräknad bromssträcka för de fyra olika fallen visas i Tabell 5.2. De experimentella fallen gav lika lång bromssträcka, 82 m, vilket var väntat eftersom accelerationen var förbestämd. Eftersom den stegutformade inbromsningen inte var förbestämd utan berodde på krafterna som verkar på DrivAer-modellen är denna av större intresse. Bromssträckan för fallet med spoiler (62 m) är cirka en meter kortare än den utan spoiler. Detta visar att en spoiler kan användas för att få en kortare bromssträcka.

Tabell 5.2: Bromssträckan för fyra olika fall.

Fall	Sträcka (m)
Experimentell inbromsning med spoiler	82
Experimentell inbromsning utan spoiler	82
Stegformad inbromsning med spoiler	62
Stegformad inbromsning utan spoiler	63

6

Diskussion

I detta avsnitt diskuteras dels de samhällliga och etiska aspekter som ligger inom ramarna för studien och hur dessa bidrar till en säkrare samt miljövänligare förhållningssätt inom fordonstekniken. Ytterligare något som behandlas i detta avsnitt är vad studien kan utvidgas till för framtida forskning för att kartlägga fenomenet på ett mer komplett sätt.

6.1 Samhällliga och etiska aspekter

Projektet syftar till att undersöka ett fenomen snarare än att ta fram en konkret tillämpning. Men eftersom studien berör bilar, med inriktning mot fordonssäkerhet, finns det tänkbara samhällliga och etiska följder.

Vid planeringsfasen beslutades att inga åtgärder skulle tas för att möta etiska och samhällliga aspekter gällande genomförandet av projektet. Beslutet grundades framförallt i ovissheten kring huruvida projektet skulle leda till användbara resultat. Istället sågs värdet i grundläggande forskning som låter nyfikenhet undersöka det utforskade. Detta med motiveringen att det sällan på förhand kan avgöras vilken forskning som kommer att tillämpas, och vidare var den tillämpningen kommer att ske i samhället. Själva genomförandet av studien hade, som det även ansågs under planeringsfasen, inga samhällliga eller etiska aspekter.

Även efter genomförd studie går det inte att avgöra om resultatet kommer att appliceras i samhället. Resultatet visade en relativt liten påverkan på den totala inbromsningen vid jämförelse med andra aspekter såsom förarens reaktionstid eller underlagets inverkan. Ovissheten om hur denna undersökande studie kommer, eller kan, påverka samhället kvarstår.

Studien kan ses som ett delsteg mot säkrare och miljövänligare personbilar. En ökad grundförståelse av aerodynamikens inverkan vid kraftig retardation kan effektivisera inbromsningförloppet. Positiva följder av kunskapen kan innebära sparade materialresurser vilket leder till miljövänligare lösningar. Kunskap erhållen kan även bidra till en framtida minimerad bromssträcka som i sin tur ger en ökad fordonssäkerhet. En ökad säkerhet skulle påverka allt liv som har kontakt med trafik och miljövänligare lösningar skulle påverka allt liv på vår planet. För att få en hållbar planet krävs en strävan efter högre medvetenhet gällande resursanvändning vilket denna typ av grundforskning bidrar till.

Sammanfattningsvis kan det komma etiska och samhällsliga konsekvenser från denna studie. De huvudsakliga effekterna tros vara små men om de märks antas de mestadels vara av positiv karaktär. Säkrare bilar är ur ren funktionell synpunkt en stor fördel eftersom det bör leda till färre olyckor.

6.2 Framtida forskning

I detta projekt undersöktes inbromsning för bilmodellen sedan med respektive utan spoiler. Det finns många fler intressanta fall och variationer som kan studeras i framtiden. Nedan presenteras förslag på framtida forskning inom området.

6.2.1 Spoilerdesign

Spoilern som konstruerades under förbearbetningen konstruerades utifrån en redan existerande aktiv spoiler på en Audi A7. Denna spoiler är mycket enkel och skiljer sig från många andra mer distinkta spoilers, exempelvis de som återfinns på racerbilar. Vid framtida forskning kan olika utformningar av spoiler undersökas för att se om och i så fall hur spoilerns geometri påverkar inbromsningsförloppet. En enkel geometriförändring som kan undersökas är olika anfallsvinklar på spoiler. Ytterligare hade det kunnat genomföras en studie med en aktiv spoiler som varierar vinkel beroende på vilka krafter som verkar på den eller i vilken hastighet bilen kör.

6.2.2 Båtar

Ett intressant område för framtida forskning skulle kunna vara liknande undersökning för båtar under inbromsning. Eftersom att underlaget istället för fast mark är vatten, en fluid, kommer friktion från andra källor än fluiden vara avsevärt mycket mindre. Detta skulle kunna innebära att luftens inverkan blir mer avgörande för bromssträcka. I stora drag uppfattas båtar ha en geometri så att större motstånd skulle ske på de karaktäristiska platta bakdelarna relativt den mer spetsiga framsidan.

6.2.3 Närmare verkligheten

I framtida studier hade inbromsningsförloppet kunnat simuleras mer verklighetstroget genom att ta hänsyn till beteenden som uppträder under en inbromsning. Ett sådant beteende kan bland annat vara att bilen "pitchar" vid kraftig inbromsning. Detta innebär att bakändan lyfts upp under inbromsningsförloppet så att bilen blir lätt framåtlutad.

Olika typer av fordon hade även kunnat undersökas utöver sedanmodellen som använts i detta projekt. Eftersom geometrin påverkar inbromsningsförloppet hade resultatet antagligen sett annorlunda ut för exempelvis en kombi.

Simuleringar skulle i framtiden kunna utföras för inbromsning i olika vindförhållanden. Detta skulle påverka luftens relativa inverkan på accelerationen och därmed även en spoilers inverkan på inbromsningsförmåga.

Sammanfattningsvis hade färre förenklingar gett noggrannare resultat och säkrare slutsatser hade kunnat dras. Därmed hade flera egenskaper kunnat undersökas, som till exempel inverkan av sidokrafter.

7

Slutsats

Syftet med kandidatarbetet var att undersöka aerodynamiska krafter vid hård inbromsning för två olika accelerationsmodeller. Resultaten visade att omgivande luft påverkade den totala accelerationen för en personbils inbromsning med cirka 3 procent. Studien bekräftade även att vaken som bildas bakom en bil i rörelse hinner ifatt och välter över bilen vid hård inbromsning, vilket initialt antogs. Vaken blev högre i fallet med spoiler än utan.

Vid jämförelse med och utan spoiler gav spoiler ett positivt bidrag till c_D under hela inbromsningsförloppet, det vill säga bidrar spoilern till en mer effektiv inbromsning. Inverkan var som störst i början av inbromsning då spoilern ökar resulterande c_D med cirka 22 procent och avtog sedan relativt jämnt tills att bilen stannat. Kraften som vaken verkar med på en personbil vid hård inbromsning var i samma storleksordning som luftmotståndet som verkar på bilens framsida. Under inbromsning går den resulterande kraften på bilen i x-led från positiv till negativ.

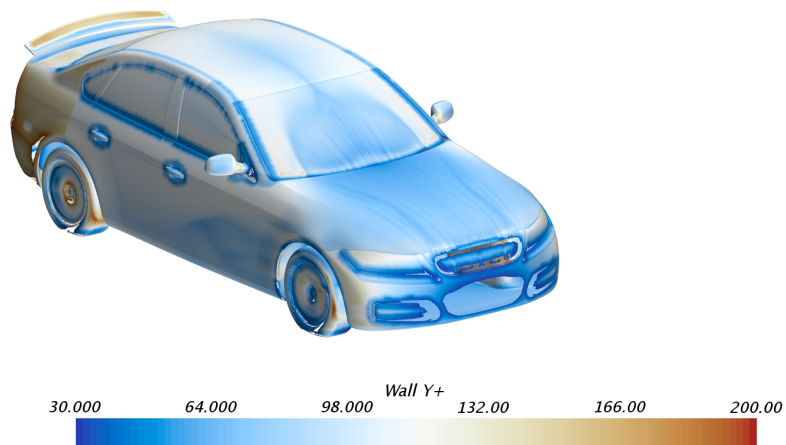
Sammanfattningsvis verkar vaken bakom en personbil vid hård inbromsning med en kraft i samma storleksordning som luftmotståndet bilen möter och en spoiler minskar vakens relativa inverkan.

Litteraturförteckning

- [1] Trafikverket: Nollvision. <https://www.trafikverket.se/om-oss/var-verksamhet/sa-har-jobbar-vi-med/Vart-trafiksakerhetsarbete/Trafiksakerhetsmal/Nollvisionen/> (Hämtad: 1 februari 2018)
- [2] R, Lewis et, D, Ludlow och F, Lendrum. (2016) Flow structure around an accelerating and decelerating vehicle. UK: TotalSim Ltd.
- [3] J. Katz, Race Car: Designing for Speed, Massachusetts: USA, 1995. [Online]. Tillgänglig: http://porsche-carshistory.com/wp-content/old/Books/Joseph%20Katz/Race_Car_Aerodynamics-Joseph%20Katz-1st%20Edition.pdf., (hämtad: 2018-02-09).
- [4] F. M. White, Fluid Mechanics, 7:e uppl. New York: McGraw-Hill Education, 2011.
- [5] Finite Volume Discretization. Star. [Online]. Tillgänglig: <https://stevedocs.cd-adapco.com> (Hämtad 2018-03-22).
- [6] K-Epsilon Turbulence. Star. [Online]. Tillgänglig: <https://stevedocs.cd-adapco.com> (Hämtad 2018-03-22).
- [7] Governing Equations in Moving Reference Frames. Star. [Online]. Tillgänglig: <https://stevedocs.cd-adapco.com> (Hämtad 2018-03-22).
- [8] Time-Step Control Models. Star. [Online]. Tillgänglig: <https://stevedocs.cd-adapco.com> (Hämtad 2018-04-17).
- [9] Chair of Aerodynamics and Fluid mechanics TUM Department of Mechanical Engineering Technical University of Munich. (2018) Drive Aer model. [Online]. Tillgänglig: <http://www.aer.mw.tum.de/en/research-groups/automotive/drivaer/>. (Hämtad 24 maj 2018).
- [10] Nerijus Kudarauskas (2007) Analysis of emergency braking of a vehicle, Transport, 22:3, 154-159 Tillgänglig: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/16484142.2007.9638118> (Hämtad 2018-04-09)

A

$Y+$ för DrivAer-modell med spoiler



Figur A.1: $y+$ över DrivAer-modell med spoiler.