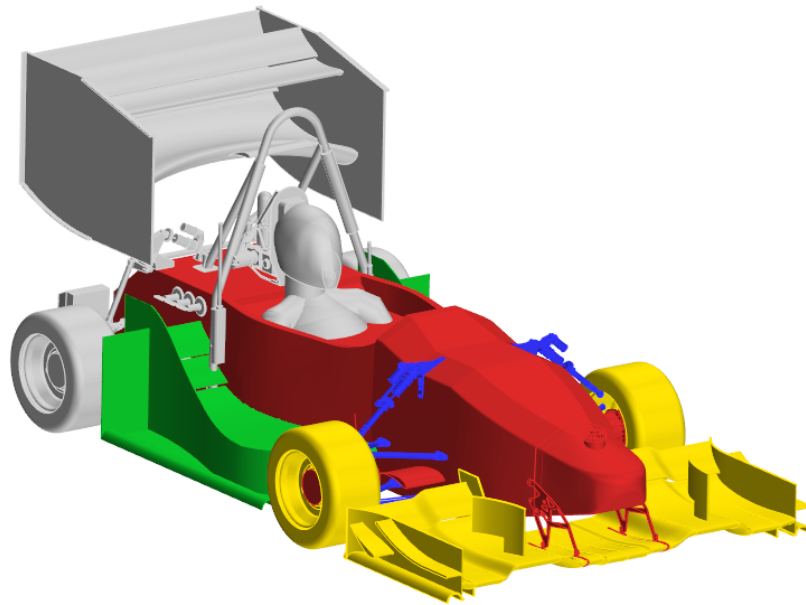




**CHALMERS**



# Geometrisk förenklingar vid numerisk modellering av framvingens aerodynamik för formelbil

Kandidatarbete inom Mekanik och Maritima Vetenskaper

Olle Lyth Andersson  
Andreas Erlandsson  
Gustav Rönn  
Viktor Sundström  
Stefan Zoric

**INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER**

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2023  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



KANDIDATARBETE 2023

**Geometrisk förenklingar vid numerisk  
modellering av framvingens  
aerodynamik för formelbil**

OLLE LYTH ANDERSSON  
ANDREAS ERLANDSSON  
GUSTAV RÖNN  
VIKTOR SUNDSTRÖM  
STEFAN ZORIC



**CHALMERS**

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper  
*Avdelningen för fordonsteknik och autonoma system*  
Forskningsgruppen för fordonsaerodynamik  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2023

Geometriska förenklingar vid numerisk modellering av framvingens aerodynamik för formelbil

© OLLE LYTH ANDERSSON, ANDREAS ERLANDSSON, GUSTAV RÖNN, VIKTOR SUNDSTRÖM, STEFAN ZORIC 2023.

Handledare: Erik Josefsson, Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper  
Examinator: Simone Sebben, Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper

Kandidatarbete 2023  
Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper  
Avdelningen för fordonsteknik och autonoma system  
Forskningsgruppen för fordonsaerodynamik  
Chalmers Tekniska Högskola  
SE-412 96 Göteborg  
Telefon +46 31 772 1000

Omslag: Visualisering av de geometrier undersöks, baserat på Chalmers Formula Student senaste bildesign vid projektets start (januari 2023).

Typsatt i L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X  
Göteborg, Sverige 2023

Geometric simplifications in aerodynamic simulations of a formula car's front wing  
OLLE LYTH ANDERSSON, ANDREAS ERLANDSSON, GUSTAV RÖNN, VIKTOR SUNDSTRÖM, STEFAN ZORIC

Department of Mechanics and Maritime Sciences  
Chalmers University of Technology

## Abstract

Aerodynamic research is essential within motorsport today as it gives insight into significant forces such as drag and downforce. To complement wind tunnel and track testing, Computational Fluid Dynamics (CFD) is used to simulate the aerodynamic properties of a car design. Due to the high computational costs of CFD, aerodynamicists are interested in various simplifications to be able to evaluate more design options with the limited resources available. The aim of this thesis is to investigate how geometrical simplifications can be used when developing the front wing of a Formula Student (FS) car.

Using the most up-to-date (by January 2023) full car simulation file from Chalmers Formula Student (CFS), five different simplifications were created, each simulated with three different wings. These were compared both with the full car simulation and each other. As a proof of concept, the most successful simplification were also used in the design process of a new front wing.

Based on the analysis of these simulations, it was concluded that a simplification with a good trade-off between accuracy and simplicity is a half car simulation of the front wing, front wheels, suspension and monocoque. This variant reduced the number of mesh cells to 18% of number of cells in the whole car reference, leading to a similar reduction in simulation lead time. It could predict front wing downforce as well as describe vorticity and total pressure downstream until the side structures begin, all with acceptable precision to predict certain aspects of the whole car's aerodynamic performance. The side structures could be included as well for more accuracy, at the expense of an 29% increase in cells. These simplifications are not intended be used in isolation, but rather in conjunction with full car simulations and wind tunnel testing for validation purposes.

Keywords: CFD, aerodynamics, geometric simplifications, downforce, front wing, Formula Student

---

## Sammandrag

Idag är forskning om aerodynamik en central del av motorsport då det ger insikt i viktiga krafter som exempelvis luftmotstånd. Som komplement till vindtunneexperiment och bantester används beräkningsströmningsdynamik (*Computational Fluid Dynamics*, CFD) som verktyg för att simulera aerodynamiska egenskaper vid for-  
donsdesign. På grund av de höga beräkningskostnaderna för CFD är aerodynamiker intresserade av olika förenklingar för att kunna utvärdera fler designalternativ med de begränsade resurserna som finns. Syftet med detta kandidatarbete är att undersöka hur olika geometriska förenklingar kan användas vid utvecklingen av framvingen på en Formula Student (FS) bil.

Med hjälp av den mest uppdaterade (vid januari 2023) fullständiga simuleringsfilen i helbil från Chalmers Formula Student (CFS) skapades fem olika förenklade modeller, var och en simulerad med tre olika vingar. Dessa jämfördes med helbils-simuleringen och med varandra. Den mest framgångsrika förenklingen användes i designprocessen av en ny framvinge.

Baserat på analysen av dessa simuleringar drogs slutsatsen att en förenkling med en bra avvägning mellan noggrannhet och förenklingsgrad är en halvbilssimulering av framvingen, framhjulen, hjulupphängningen och karossen. Denna variant reducerade antalet celler till 18% av de i helbilsreferensen och motsvarande minskning i tidsåtgång för simuleringen. Den kunde förutsäga framvingens downforce, samt beskriva vorticitet och totaltryck nedströms fram till sidovingarna, med acceptabel precision för att förutsäga vissa aspekter av hela bilens aerodynamiska prestanda. Om dessutom sidovingarna inkluderas erhålls ökad precision, på bekostnad av en 29% ökning av antalet celler. Förenklingarna är inte menade att användas isolerat, utan snarare som ett av flera verktyg tillsammans med helbilssimuleringar och vindtunneltester.

Nyckelord: CFD, aerodynamik, geometriska förenklingar, downforce, framvinge, Formula Student.

## Tillkännagivanden

Vi författare vill uttrycka vår tacksamhet till vår handledare Erik Josefsson, doktorand på mekanik och maritima vetenskaper, avdelningen för fordonsteknik och autonoma system, som väglett oss genom hela arbetet och lagt ned mycket tid och engagemang på alla våra funderingar och frågor.

Vidare vill vi tacka CFS23-teamet som har låtit oss använda deras simuleringsmodell och varit behjälpliga med diverse tekniska frågeställningar som uppstått.

Slutligen vill vi tacka vår examinator professor Simone Sebben, avdelningschef för fordonsteknik och autonoma system, som under arbetets gång bidragit med värdefull vägledning.

Olle Lyth Andersson, Andreas Erlandsson, Gustav Rönn, Viktor Sundström,  
Stefan Zoric, Göteborg, Maj 2023



# Lista över förkortningar

Nedan följer en lista över förkortningar som förekommer i denna rapport, listade i bokstavsordning:

CAD	<i>Computer-Aided Design</i> (Datorstödd konstruktion)
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Beräkningsströmningsmekanik)
CFS	Chalmers Formula Student
FS	Formula Student
FVM	Finita Volymmetoden
HF	Förenkling innehållande hjul och framvinge
HFK	Förenkling innehållande hjul, framvinge och kaross
HFKU	Förenkling innehållande hjul, framvinge, kaross och (hjul-)upp-hängning
HFKUS	Förenkling innehållande hjul, framvinge, kaross, (hjul-)upp-hängning och sidostrukturer
$k - \omega$ -SST	Turbulensmodell, $k - \omega$ <i>Shear Stress Transport</i>
N23	Nydesignad vinge baserad på O23
O21	CFS framvinge från 2021
O23	CFS framvinge 2023
R23	Reducerad vinge baserad på O23
RANS	<i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i>
Siemens NX	CAD-programvara
STAR-CCM+	CFD-simuleringsprogram, <i>Simulation of Turbulent flow in Arbitrary Regions - Computational Continuum Mechanics</i> , C++-baserat



# Nomenklatur

Nedan finns nomenklaturen av dimensionslösa tal och variabler som har använts genom hela rapporten.

## Dimensionslösa tal

$Re$	Reynoldstal
$C_p$	Tryckkoefficient
$C_{p,t}$	Totaltryckskoefficient

## Variabler

$\rho$	Densitet
$\mu$	Viskositet
$p$	Statiskt tryck
$p_\infty$	Friströmstryck
$\vec{v}$	Hastighetsfält
$\bar{\vec{v}}$	Tidsmedelvärderat hastighetsfält
$U$	Hastighet
$\vec{\zeta}$	Vorticitet
$\zeta$	Vorticitet i friströmsriktningen



# Innehåll

<b>Lista med akronymer</b>	<b>viii</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>x</b>
<b>1 Introduktion</b>	<b>1</b>
1.1 Geometriska förenklingar i tidigare studier . . . . .	1
1.2 Syfte . . . . .	3
1.3 Problemformulering . . . . .	3
1.4 Avgränsingar . . . . .	3
<b>2 Teori</b>	<b>5</b>
2.1 Grundläggande strömningsmekanik . . . . .	5
2.1.1 Laminära och turbulenta flöden . . . . .	5
2.1.2 Navier-Stokes och RANS-ekvationer . . . . .	5
2.1.3 Karaktäristiska parametrar för flöden . . . . .	6
2.2 Beräkningsströmningsmekanik . . . . .	7
2.2.1 Diskretisering av geometri . . . . .	7
2.2.2 Lösningsprocess . . . . .	8
2.3 Design av framvinge . . . . .	8
2.3.1 Regler för framvingedesign inom Formula Student . . . . .	8
<b>3 Metod</b>	<b>9</b>
3.1 Framtagning av förenklad modell . . . . .	9
3.1.1 CFD . . . . .	9
3.1.2 Hel- och halvbilssimuleringar . . . . .	10
3.1.3 Vingmodeller . . . . .	11
3.1.4 Förenklingar . . . . .	12
3.1.5 Anpassad mesh för förenklade modeller . . . . .	13
3.1.6 Efterbehandling och analys . . . . .	14
3.2 Framtagning av ny vinge . . . . .	16
3.2.1 CAD-modellering och design av framvinge . . . . .	16
3.2.2 Nytt koncept för framvinge baserat på en geometriskt för- enklad simuleringsmodell . . . . .	16
3.2.3 Ny framvinge i helbilssimulering . . . . .	17
<b>4 Resultat och analys</b>	<b>19</b>
4.1 Förenklade simuleringar jämfört med referenssimulering för vinge O23	19

4.1.1	Cellantal för förenklade modeller . . . . .	19
4.1.2	Framvingens downforce i förenklade modeller . . . . .	20
4.1.3	Tryckkoefficient på framvingen i förenklade modeller . . . . .	20
4.1.4	Vorticitet i luftflödets riktning framför och bakom framhjulen i förenklade modeller . . . . .	24
4.1.5	Totaltryckskoefficient i förenklade modeller . . . . .	27
4.2	Jämförelse av downforce med framvingar O21 och R23 . . . . .	30
4.3	Prestanda för ny framvinge . . . . .	30
4.3.1	Ny framvinge N23 i förenklad modell HFKU . . . . .	31
4.3.2	Ny framvinge N23 i helbilssimulering . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>35</b>
5.1	Användningsområden och begränsningar för förenklingarna . . . . .	35
5.1.1	Framhjul och framvinge (HF) . . . . .	35
5.1.2	Framhjul, framvinge och kaross (HFK) . . . . .	36
5.1.3	Framhjul, framvinge, kaross och hjulupphängning (HFKU) . . . . .	36
5.1.4	Framhjul, framvinge, kaross, hjulupphängning och sidostrukturer (HFKUS) . . . . .	36
5.1.5	Halvbil . . . . .	37
5.2	Utvärdering av framvingedesign med förenklad modell . . . . .	37
<b>6</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>39</b>
6.1	Framtida studier . . . . .	39
	<b>Referenslista</b>	<b>41</b>

# 1

## Introduktion

Formel 1 är en motorsport där de medverkande lagen tävlar i att utveckla en så snabb bil som möjligt. På senare år har utvecklingen fokuserat mer och mer på aerodynamik, det vill säga studien av hur luftflödet kring bilen kan manipuleras för att öka bilens prestanda. En av egenskaperna som studeras är den negativa lyftkraft (hädanefter *downforce*) som bilen genererar, eftersom downforce ökar friktionskrafterna mellan däck och asfalt och således möjliggör högre kurvastigheter.

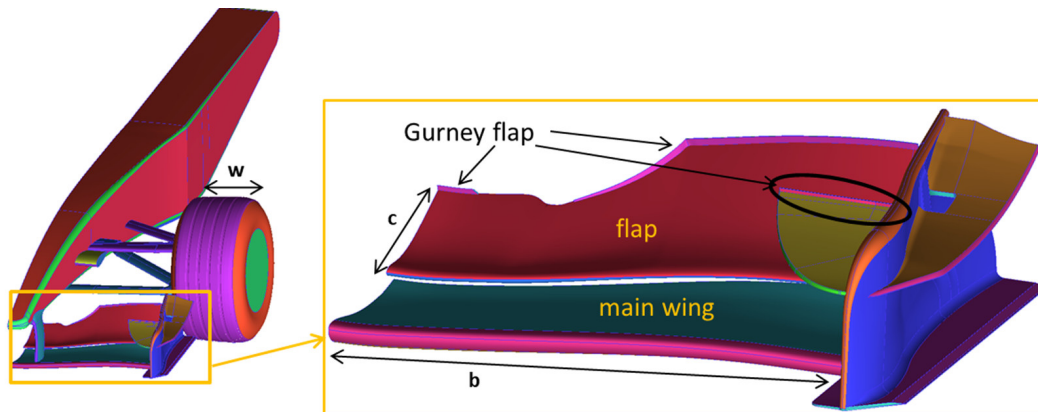
Formula Student är en ingenjörstävling där lag bestående av universitetsstudenter från hela världen deltar, bland annat Chalmers Formula Student (CFS) [1]. Målet är att på en årlig basis utveckla en nedskalad formelbil med fokus på prestanda i ett antal tävlingsmoment, både statiska och dynamiska. Likt Formel 1-lagen är CFS intresserade av att maximera bilens downforce. Med simuleringar från 2019 uppskattades att det aerodynamiska paketet ökade bilens prestanda med 17% av totala möjliga tävlingspoängen, jämfört med motsvarande bil helt utan aerodynamiska element [2]. Arbetet som krävs för att optimera bilens aerodynamiska egenskaper är alltså välmotiverat inom Formula Student.

### 1.1 Geometriska förenklingar i tidigare studier

Både inom Formel 1 och Formula Student föreligger begränsningar i hur mycket resurser som kan läggas på simuleringar vid aerodynamiskt utvecklingsarbete. Formel 1-reglerna specificerar hur många processortimmar som kan användas för detta inom olika tidsintervall under året [3], medan CFS istället är begränsade av antalet allokerade processortimmar per månad på Chalmers datorkluster Vera. Genom att minimera simuleringskostnaderna inom båda racingklasserna kan fler designförslag simuleras med de tillgängliga resurserna.

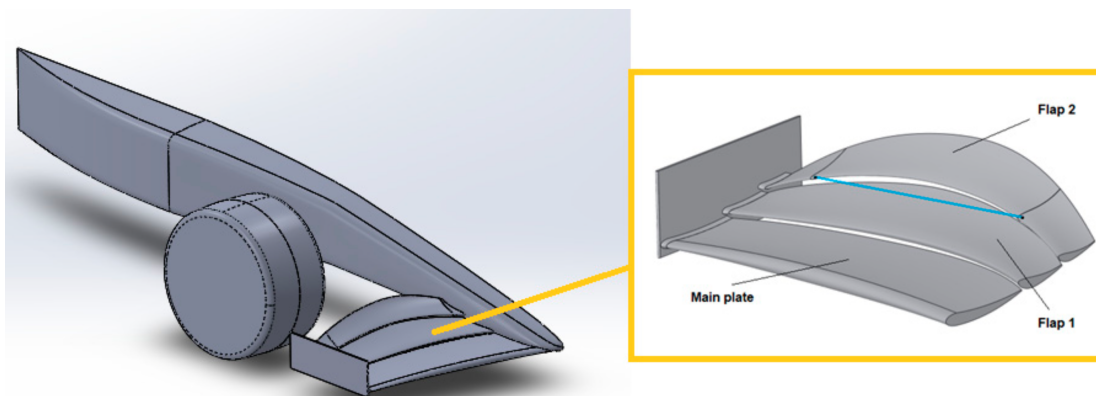
Geometriska förenklingar har tidigare använts vid aerodynamiska simuleringar av formelbilar. I en undersökning av hur närliggande geometrier påverkar luftflödet kring framhjulen, jämfört med flödet kring ett helt isolerat framhjul, begränsades geometrin till att endast inkludera halva framvingen, ett framhjul, tillhörande hju-lupphängning samt en förenklad kaross [4]. I studien konstaterades att interaktionen mellan framvingen och framhjulet reducerade luftmotstånds-, lyft- och tryckkoefficienterna. Vidare fann studien att nämnda koefficienter minskade då roterande hjul

inkluderades i modellen, i förhållande till stationära hjul. Denna förenkling användes även vid en studie av aerodynamiska effekter av en så kallad *Gurney flap* (se figur 1.1) [5].



**Figur 1.1:** Den geometriska förenklingen som används av Basso *et al.* [5] när de undersöker aerodynamiska effekter av en Gurney flap. Bilen's främre vänstra hörn är inkluderat, samt en förenklad kaross (CC BY).

En liknande förenkling, fast utan hjulupphängning, användes då framvingeelementens optimala anfallsvinklar undersöktes [6], samt i en studie av framvingens inverkan på framhjulens vak, se figur 1.2 [7].



**Figur 1.2:** Den geometri som användes vid en undersökning av framvingens påverkan på vaken som uppstår bakom framhjulens (CC BY) [6].

Denna förenkling användes även av en studie som optimerade en framvinges design med avseende på bromskanalernas och framhjulens prestanda [8].

En vanligt förekommande förenkling, som används i samtliga arbeten nämnda ovan, är att endast simulera halva bilen. Genom att anta att flödesfältet är symmetriskt

och bara simulera halva geometrin minskas beräkningskostnaderna avsevärt. Detta är en förenkling som CFS tidigare har använt sig av. CFS har dock övergått till helbilssimuleringar med hänvisning till att det är för stora skillnader i resulterande downforce-värden mellan identiska simuleringar. Genom att köra fem simuleringar med samma indata för hel- och halvbil fann CFS att standardavvikelsen var 1,3 N för helbil och 2,5 N för halvbil [2]. Huruvida denna minskade spridning av resulterade värden motiverar att köra mer beräkningstunga simuleringar beror på användningsområdet. Vid större ändringar i aerodynamisk design är det ofta tillräckligt med halvbilssimuleringar.

Att använda geometriska förenklingar för att spara beräkningstid är alltså vanligt förekommande vid design av formelbilar. Dessa studier saknar dock analys av hur jämförbara förenklingarna är med simuleringar av hela geometrin. I vissa fall påstås kortfattat att förenklingarna inte sker på bekostnad av nödvändig information, men detta motiveras inte vidare, varken i själva artikeln eller med hänvisning till tidigare studier. Det är därför av intresse att kartlägga hur väl olika geometriska förenklingar korrelerar med simuleringar av hela geometrin och vad dessa förenklingar har för begränsningar.

## 1.2 Syfte

Denna studie ämnar att undersöka hur den numeriska modelleringen av en framvinge på en formelbils aerodynamik kan förenklas geometriskt och följaktligen minimera simuleringskostnaderna.

## 1.3 Problemformulering

Den huvudsakliga uppgiften är att undersöka hur en detaljerad CFD-modell för en Formula Student-bil kan förenklas geometriskt, utan att förlora allt för mycket meningsfull information om luftflödet kring framvingen. I syfte att testa hur den förenklade modellen presterar i en designprocess ska modellen därefter användas för att ta fram ett förslag på en förbättrad framvinge. Med den förenklade modellen kan olika framvingar testas snabbt, och ett alternativ med goda egenskaper kan slutligen valideras med hjälp av den ursprungliga helbilssimuleringen.

## 1.4 Avgränsingar

Projektet avgränsas till att enbart undersöka geometriska förenklingar av CFS simuleringsmodell. Således görs inga förändringar av de fysikaliska simuleringsmodeller som CFS nyttjar, såsom val av turbulensmodeller eller väggfunktioner. Simuleringen är inte tidsberoende och når därför ett stationärtillstånd (*steady state*).

Fysiskt valideringsarbete med hjälp av vindtunnel kommer inte att inkluderas. Vidare kommer varken studie eller vidareutveckling att utföras av det beräkningsnät

(*mesh*) som finns implementerat i CFS befintliga modell. Endast mindre justeringar kommer att göras, relaterade till de geometriska förenklingar som görs.

De förenklingar som görs avgränsas till att fokusera på framvingen. Förenklingarna utvärderas endast med avseende på hur väl framvingens prestanda kan avgöras med hjälp av dem. Prestandan från övriga delar kommer inte betraktas och dess design behålls oförändrad från CFS modell. Vid analys av aerodynamisk prestanda undersöks inte horisontellt luftmotstånd (*dragforce*) då det inte är en parameter som CFS anser har stor påverkan på bilens prestanda [2].

Projektet begränsas till CFS grundläggande körscenario, körning rakt fram i 40 km/h. Det kommer inte att tas hänsyn till hur modellen beter sig vid inbromsningar och svängningar; simuleringarna kommer att köras på plant underlag.

Slutligen föreligger även begränsningar av tillgänglig simuleringstid, där projektet har 5000 kärntimmar (*core hours*) per 30 dagar allokerat på Chalmers datorkluster Vera. Minskningen i beräkningskostnader kommer enbart att redovisas som minskning i antalet celler. Då övriga inställningar är konstanta mellan alla förenklingar kommer antalet celler, till god approximation, vara proportionerligt mot tiden det tar att köra simuleringen. Den exakta tiden beror delvis på faktorer som inte studeras i denna studien, såsom hur parallellisering av simuleringen över beräkningskärnor på Vera går till.

# 2

## Teori

I detta kapitel beskrivs den väsentliga teorin för projektet. Detta innefattar fysikaliska beskrivningar av fluider, hur strömningsmekaniska problem kan lösas numeriskt samt kort om design av framvingar och de regler som styr designen inom Formula Student.

### 2.1 Grundläggande strömningsmekanik

Strömningsmekanik är läran om fluiders rörelse under inverkan av krafter. Fysiken som behandlar ämnen som kan flöda, såsom vätskor och gaser, involverar studier av fluidens egenskaper och beteende under olika förhållanden, inklusive hur den rör sig och hur den interagerar med fasta föremål och andra fluider. Egenskaper och beteenden hos vätskor och gaser beskrivs med olika formler, terminologier och dimensionslösa tal, där de mest centrala för denna studie tas upp i de nästkommande avsnitten.

#### 2.1.1 Laminära och turbulenta flöden

Flödesbeteende kan kategoriseras som laminärt eller turbulent flöde. Laminärt flöde beskrivs som ordnat och strukturerat flöde, medan turbulent flöde karakteriseras av oordning och kaotiskt beteende [9]. Det så kallade Reynoldstalet  $\mathbf{Re}$  ger en indikation om ett flöde strömmar laminärt eller turbulent (se avsnitt 2.1.3). Flöden kring formelbilar är i allmänhet turbulenta då de har höga Reynoldstal.

#### 2.1.2 Navier-Stokes och RANS-ekvationer

För att beskriva flödet av vätskor och gaser används Navier-Stokes ekvationer vilket är ett system av partiella differentialekvationer. De beskriver en fluids rörelsemängd i relation till tryck och friktionskrafter (hädanefter, viskösa krafter). Dessa ekvationer, tillsammans med kontinuitetsekvationen, kan användas för att bestämma flödesfältet. Navier-Stokes respektive kontinuitetsekvationen kan i något förenklad form skrivas

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} \right) = -\vec{\nabla} p + \mu \vec{\nabla}^2 \vec{v} + \rho \vec{g}, \quad (2.1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0. \quad (2.2)$$

Ekvationerna 2.1 och 2.2 gäller under förutsättningarna att strömningen är inkompressibel, det vill säga att fluidens densitet är konstant. Vidare ska fluiden vara Newtonsk, vilket innebär att fluidens skjuvspänning är proportionell mot hastighetsgradienten.  $\vec{v}$  betecknar hastighetsfältet,  $p$  det statiska trycket,  $\mu$  viskositeten och  $\rho$  densiteten [10].

Navier-Stokes ekvationer är omöjliga att lösa analytiskt för de flesta randvärden, och kräver väldigt mycket datorkraft att beräkna numeriskt [11]. Vid studier av turbulenta flöden används därför ofta *Reynolds-averaged Navier-Stokes* (hädanefter RANS) ekvationer. Grundprincipen är dela upp alla ingående variabler i en tidsmedelvärderad  $\vec{v}$  term och en term som innehåller snabba fluktuationer  $\vec{v}'$ . Tidsmedelvärdering noteras med ett streck över termen och de termer som innehåller fluktuationerna bildar tillsammans *Reynolds stresstensor* enligt ekvation 2.3,

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} + \underbrace{(\vec{v}' \cdot \vec{\nabla}) \vec{v}'}_{\text{Stresstensor}} \right) = -\vec{\nabla} \bar{p} + \mu \vec{\nabla}^2 \vec{v} + \rho \vec{g}. \quad (2.3)$$

Stresstensorn kan sedan beräknas med semiempiriska turbulensmodeller som till exempel  $k - \epsilon$  och  $k - \omega$ -SST [10], [12].

### 2.1.3 Karaktäristiska parametrar för flöden

Dimensionslösa parametrar som är relevanta för att beskriva flöden i denna studie är Reynoldstalet, tryckkoefficienten och totaltryckskoefficienten. Ytterligare relevanta parametrar är vorticiteten och *downforce* för objekt i flöden.

Reynoldstalet är den dimensionslösa koefficient som relaterar tröghetskrafter till viskösa krafter i en fluid, och används vanligtvis för att förutsäga uppkomsten av turbulent flöde. Laminärt flöde karakteriseras av låga Reynoldstal, medan turbulent flöde beskrivs av höga. Reynoldstalet ges av

$$\mathbf{Re} = \frac{\rho U_\infty L}{\mu}, \quad (2.4)$$

där  $U_\infty$  står för flödehastigheten och  $L$  är en karakteristisk längd. Tryckkoefficienten används för att beskriva den relativa tryckfördelningen i ett flöde och definieras enligt

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2}. \quad (2.5)$$

I ekvationen 2.5 står  $p$  för det statiska trycket,  $p_\infty$  är friströmstrycket och  $\rho$  är fluidens densitet. Genom att bland annat analysera tryckfördelningen runt ytorna på delar av bilen kan designen optimeras för att åstadkomma maximal *downforce*.

Förutom analys av tryckkoefficient är det vanligt att undersöka totaltryckskoefficienten  $C_{p,t}$ , som istället fungerar som ett mått på flödets energi i förhållande till friströmmen enligt ekvation 2.6

$$C_{p,t} = \frac{p - p_\infty + \frac{1}{2} \rho |\vec{v}'|^2}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2}, \quad (2.6)$$

där  $|\vec{v}|$  är fluidens fart i en viss punkt. Områden där  $C_{p,t} > 0$  tyder på flöde med hög energi, medan områden där  $C_{p,t} < 0$  är tecken på flöde med låg energi. Genom att identifiera områden där flödets energi är hög kan dessa utnyttjas för att optimera aerodynamiken på en bilens, till exempel genom att justera formen på aerodynamiska komponenter för att kanalisera högt energiflöde till områden där det är mest fördelaktigt [6], [13].

Vorticitet är ett mått på den lokala rotationen av ett flöde. Vorticiteten beskrivs som rotationen av hastighetsfältet enligt

$$\vec{\zeta} = \vec{\nabla} \times \vec{v}. \quad (2.7)$$

Virvlar är områden med hög vorticitet och vid design av aerodynamiska komponenter kan dessa undersökas för att optimera aerodynamiska egenskaper. Genom att styra virvlarna som uppkommer nedströms med hjälp av aerodynamiska element kan en högre downforce uppstå [14]. Den komponent av vorticitetsvektorn som är av störst intresse vid aerodynamisk design är den i luftflödets riktning. Följaktligen kommer *vorticitet* i fortsättningen att syfta på denna komponent.

Downforce är den kraft som uppstår på ett objekt i ett flöde genom aerodynamiska effekter och verkar vinkelrätt mot flödesriktningen, för ett fordon blir det ned mot marken. Mängden downforce beror i huvudsak på trycksskillnaden mellan ett objekts ovan och undersida.

## 2.2 Beräkningsströmningsmekanik

För att komplettera experimentell testning av de aerodynamiska egenskaperna hos en produkt används ofta mjukvara för att numeriskt lösa Navier-Stokes ekvationer. En sådan process, där fysikaliska modeller används tillsammans med datorer för att studera strömningsmekaniska problem, kallas beräkningsströmningsmekanik (eng. *Computational Fluid Dynamics*, hädanefter CFD). Metoden bygger på att importera en CAD-fil av det undersökta systemet till CFD-mjukvara, varpå diverse fysikaliska beräkningsmodeller kan appliceras. Processen förbehandlas genom att skapa ett beräkningsnät (eng. *mesh*, används hädanefter), vars utseende är avgörande för noggrannheten i beräkningen. Därefter körs en iterativ beräkningsprocess som resulterar i en numerisk lösning av flödesfälten, varpå efterbehandling och analys kan göras. I följande avsnitt beskrivs dessa grundläggande steg mer utförligt.

### 2.2.1 Diskretisering av geometri

Den största delen av förbehandlingen består av att diskretisera geometrin för det som ska undersökas genom att skapa en lämplig mesh. Meshen ligger till grund för hur de teoretiska ekvationerna ska lösas numeriskt, och har stor påverkan på den slutgiltiga lösningen. En mesh består av ett begränsat antal angränsande celler, vars placering och utseende representerar geometrin för det som ska undersökas [15]. Huvudregeln för all typ av mesh är att ett ökat antal celler ger precisare resultat, men även en högre beräkningskostnad.

### 2.2.2 Lösningsprocess

För att erhålla numeriska värden av samtliga variabler i domänen används finita volymmetoden (hädanefter FVM). Varje enskild cell i meshen motsvarar en kontrollvolym i FVM. I den geometriska mittpunkten av samtliga kontrollvolymmer placeras en nod där hastighet och tryck beräknas. Därefter tillämpas olika algoritmer för att lösa Navier Stokes ekvationer 2.1, alternativt RANS ekvationer 2.3 med en turbulensmodell, och kontinuitetsekvationen 2.2. Ett sätt att lösa det är att iterativt lösa med `simple`-algoritmen. Den initeras med en uppskattning av flödesfältet och använder den uppskattningen för att iterativt förbättra lösningen tills felet är tillräckligt små [16].

## 2.3 Design av framvinge

Målet vid vingdesign för en formelbil är att skapa en så hög kraft som möjligt ned mot marken, downforce. Det traditionella sättet att åstadkomma detta är med en vingprofil som bromsar luftflödet ovanför vingen och accelererar luftflödet under vingen. Detta skapar ett högtryck på vingens ovansida och ett lågtryck på dess undersida, vilket resulterar i en nedåtriktad kraft. Något som kan öka mängden downforce som en vinge genererar är att lägga till en *Gurney Flap*. Detta är ett tillägg längst bak på vingens ovansida som bromsar luften ovanför vingen och ökar luftens hastighet under vingen [5].

### 2.3.1 Regler för framvingedesign inom Formula Student

Det finns regler som styr hur en Formula Student-bil får se ut. De mest relevanta reglerna för design av aerodynamiska element återfinns under punkterna T2 och T8 i reglementet för *Formula Student Germany* [17]. Gällande framvingen är det framförallt geometrin som begränsas. Framvingen får endast gå ut 700 mm framför främsta punkt på framhjulen och 500 mm från marken. De delar av framvingen som är direkt framför hjulet (eller längre ut) får maximalt vara 250 mm från marken. Därutöver finns det begränsningar för hur vassa kanter framvingen får innehålla. Alla kanter som skulle kunna komma i kontakt med fotgängare måste ha en radie på minst 5 mm.

# 3

## Metod

Arbetet delades upp i två huvudsakliga moment, en stor simuleringsdel där olika förenklingar testades och en mindre designdel där en ny vingetogs fram med hjälp av den förenklade modell som utvecklats. Detta möjliggjorde en bedömning av förenklingens potentiella värde i en typisk designprocess. I samtliga moment användes CFS formelbil från 2023 som bas för geometrin.

### 3.1 Framtagning av förenklad modell

Inledningsvis kördes en CFD-simulering av en komplett formelbil. Resultatet från denna användes sedan som referens för att utvärdera de förenklade modellerna. Detta gjordes genom att undersöka datan från de förenklade simuleringarna och utvärdera hur mycket information dessa gav om framvingens prestanda jämfört med helbilssimuleringen. De geometriska avskalningarna utarbetades genom att först analysera ett väldigt förenklat fall där endast framvinge och framhjul inkluderades. Därefter adderades successivt fler delar av geometrin för att undersöka om dessa förbättrade modellens giltighet. Processen genomfördes för tre olika framvingar parallellt, i syfte att identifiera övergripande trender i data och strömningsprofil.

#### 3.1.1 CFD

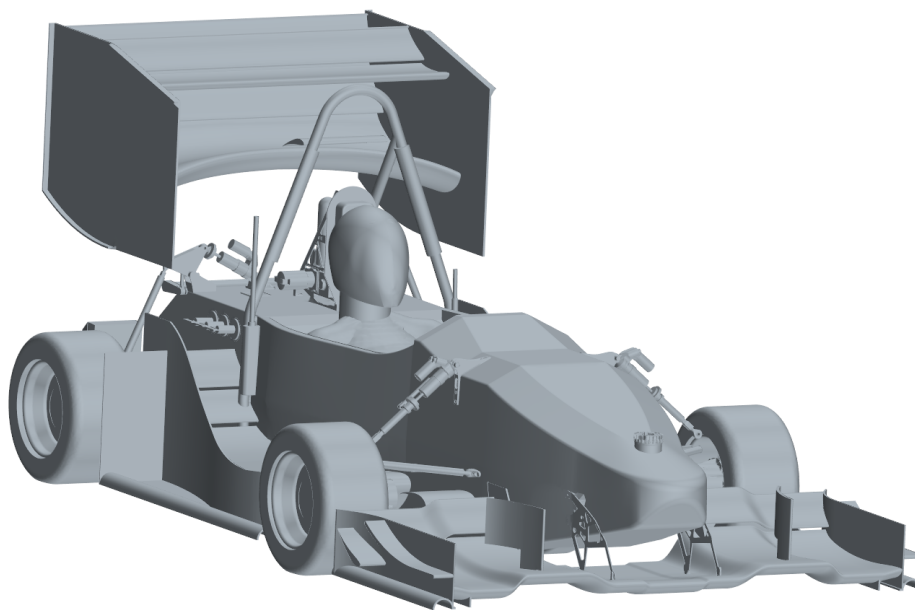
Simuleringen var väsentligen en typisk vindtunnelsimulering, där bilen står stilla med en pålagt konstant luftflöde, för en bil som färdades i 40 km/h. Exakta parametrar finns redovisade i tabell 3.1. Utöver detta definierades hjulens randvillkor så att det motsvarade rotation på 54 rad/s. Lösningvärdena fluktuerade efter ett stort antal iterationer, exempelvis varierade värdet för total downforce med 2% mellan iteration 2500 och 3000. Således nyttjades genomsnittliga värden mellan iteration 2500 och 3000 för analys i rapporten. Samma inställningar användes genomgående för samtliga simuleringar.

**Tabell 3.1:** De inställningar i StarCCM+ som användes för alla simuleringar.

CFD-inställningar		
Tidsberoende		steady state
Iterationer		3000
Slutliga värden	Genomsnitt av iteration	2500 – 3000
Inloppshastighet		11 m/s
Storlek vindtunnel (helbil)		$(31 \times 16 \times 8) \text{ m}^3$
Storlek vindtunnel (halvbil)		$(31 \times 8 \times 8) \text{ m}^3$
Turbulensmodell		$k - \omega$ -SST
Ytbehandling	All $y+$ Wall Treatment	
StarCCM-version		2022.1.1

### 3.1.2 Hel- och halvbilssimuleringar

Som utgångspunkt för projektet gjordes en simulering av CFS helbilskonfiguration från 2023. Den fullständiga geometrin för denna återfinns i figur 3.1 nedan. Geometrin för de olika förenklingarna framställdes genom att avlägsna delar från helbilskonfigurationen.



**Figur 3.1:** Den fullständiga geometrin för CFS nuvarande bil vid tiden för detta projekts start (januari 2023).

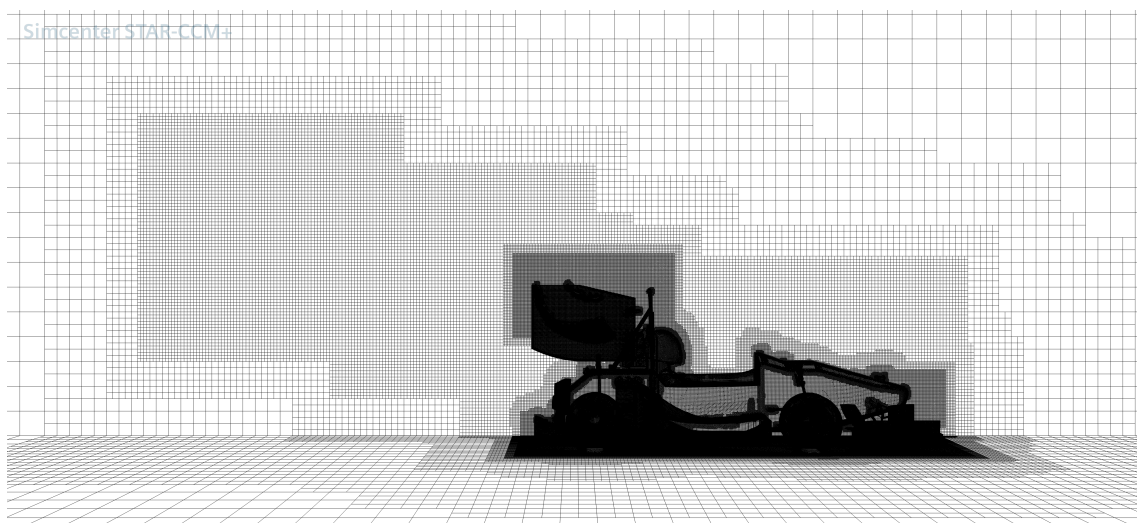
Utöver en helbilssimulering gjordes även en halvbilssimulering med symmetrivillkor längs bilens centralplan. Detta syftade till att kontrollera eventuella skillnader som kan uppstå då beräkningarna endast görs på bilens ena sida. Samtliga förenklingar

undersöktes enbart i halvbilssimuleringar.

För referenssimuleringarna användes samma mesh-inställningar som i CFS ursprungliga modell. Detta gjordes för att kunna jämföra resultatet av den förenklade modellen mot den modell som faktiskt praktiseras av ett riktigt Formula Student-lag. Processen inleddes med att en `surface wrap`-funktion applicerades över bilens yta. Resultatet subtraherades därefter bort från vindtunneln för att kunna skapa en ytmesh för geometrin. De exakta mesh-inställningarna redovisas i tabell 3.2. Den slutgiltiga meshen för hel- och halvbilssimuleringen återfinns i figur 3.2.

**Tabell 3.2:** Inställningar för surface wrapper och volymmesh i CFS ursprungliga modell.

Surface wrapper	Base size	32 mm
	Target surface size	16 mm
	Minimum surface size	2 mm
	Gap closure size	5 mm
Volymmesh	Base size	32 mm
	Target surface size	24 mm
	Minimum surface size	3 mm
	Antal prism layers	12

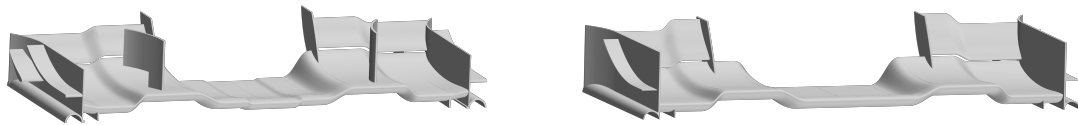


**Figur 3.2:** Ursprunglig mesh från referensmodellen, som användes till hel- och halvbilssimuleringarna. Särskilda meshinställningar appliceras i områdena närmast bilen där flödets utseende önskas studeras. Nätet är som finast vid bilens yta. Dessa inställningar används vid CFS designprocesser.

### 3.1.3 Vingmodeller

De tre varianter av framvingar som prövades var CFS framvinge från 2021, CFS framvinge från 2023, samt CFS framvinge från 2023 i en minimalistisk utformning.

Dessa refereras hädanefter till som O21, O23 respektive R23 ("O" syftar till "original", "R" syftar till "reducerad"). De två första vingarna resulterade i liknande downforce-värden, medan den sista utvecklades för att prestera betydligt sämre. Genom att jämföra dessa varianter kunde således en analys göras för modellernas förmåga att återge både små och stora skillnader i flödets utseende. De tre vingarna återfinns i figur 3.3 nedan.



(a) O23 (CFS framvingemodell för 2023). (b) O21 (CFS framvingemodell från 2021).

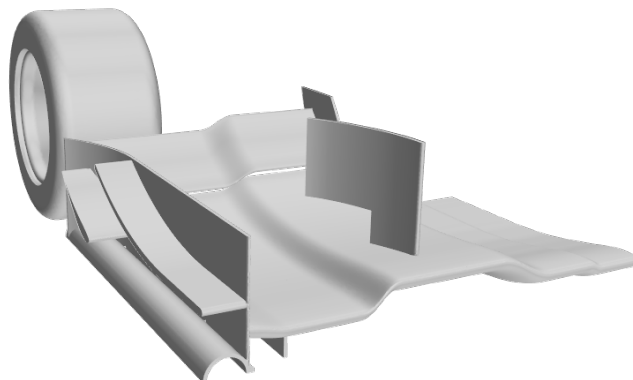


(c) R23. Samtliga element har skalats av från O23 för att kunna studera flödesfältens utseende för en lågpresterande vinge.

**Figur 3.3:** De olika framvingarna som testades. Analysen gjordes först utifrån O23, och komplementerades sedan med O21 och R23.

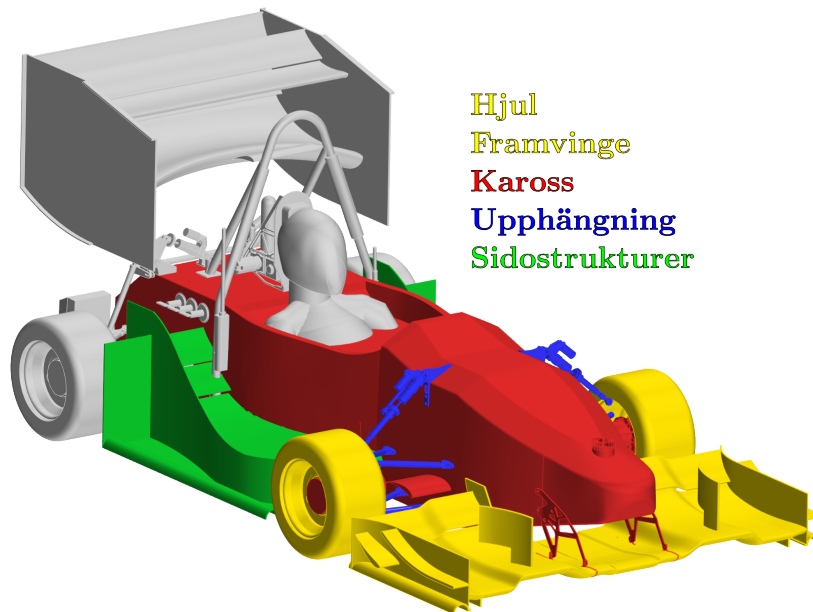
#### 3.1.4 Förenklingar

Den första förenkling som gjordes var en framvinge-hjul-konfiguration. Alla delar i CFS helbilskonfiguration eliminerades förutom framvingen och framhjulen, se figur 3.4. Denna förenkling benämns hädanefter som HF (Hjul & Framvinge). Simuleringen gjordes i halvbilskonfiguration.



**Figur 3.4:** Geometrin för HF-förenklingen med vingmodell O23. Endast den högra sidan av geometrin meshades, och ett symmetriplan placerades längs färdaxeln.

Utöver HF undersöktes ytterligare tre geometriförenklingar. I tur och ordning adderades kaross, hjulupphängning och sidostrukturer till simuleringsfilen för att se hur antal celler, prestanda och predikterbarhet påverkades. Geometrierna för dessa delar markeras i figur 3.5. Benämningarna som används för de olika förenklingarna och vilka olika geometrier som ingår i dem återfinns i tabell 3.3.



**Figur 3.5:** Geometrierna för de delar som systematiskt adderades till simuleringsfilen. Den del som benämns "kaross" inkluderar, utöver huvudsegmentet, även motorerna inuti hjulen, framvingens upphängningsanordning samt de små aerodynamiska element som placerats bakom framvingen. Dessa ingick inte i den ursprungliga HF-förenklingen och valdes att adderas tillsammans med bilens huvudsegment.

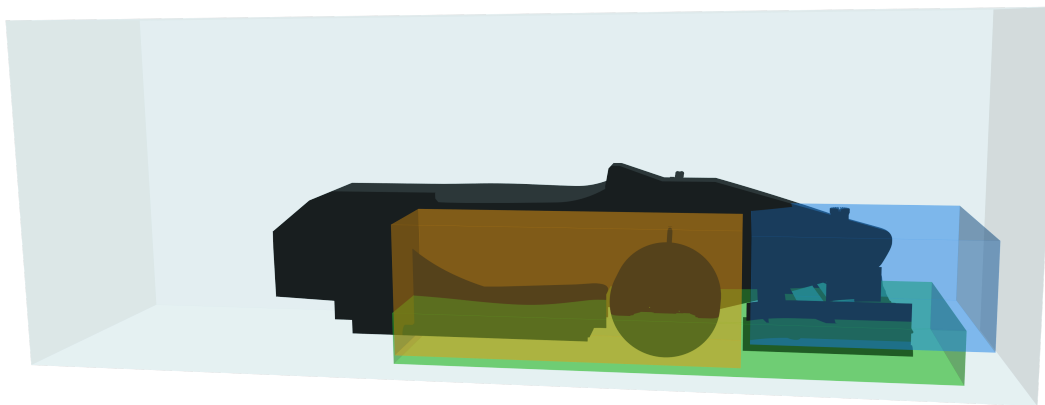
**Tabell 3.3:** Förkortningarna som hädanefter används för att benämna de olika förenklingarna, samt vilka geometrier som ingår i dem. Geometrierna följer schemat i figuren ovan.

Förenklad modell	Ingående geometrier
HF	Hjul, framvinge
HFK	Hjul, framvinge, kaross
HFKU	Hjul, framvinge, kaross, upphängning
HFKUS	Hjul, framvinge, kaross, upphängning, sidostrukturer

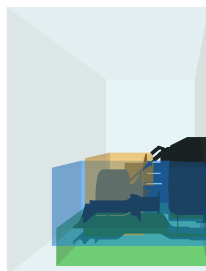
### 3.1.5 Anpassad mesh för förenklade modeller

De förenklade modellerna använde i huvudsak samma mesh-inställningar som referenssimuleringarna. En del förändringar gjordes emellertid för att reducera antalet celler vid bilens bakre ände, då den höga upplösningen i de områdena ansågs överflödigt. Dessutom omdefinierades mesh-inställningarna närmast framvingen för att

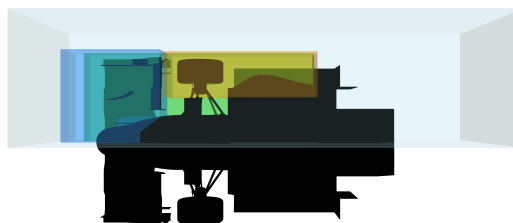
istället erhålla en väldefinierad mesh i de regioner som var centrala för analysen. De senare nämnda ändringar illustreras i figur 3.6. Den resulterande meshen visas i figur 3.7. Dessa slutgiltiga mesh-inställningar användes för samtliga förenklingar.



(a) Sidovy av de olika regionerna.



(b) Frontalvy av de olika regionerna.

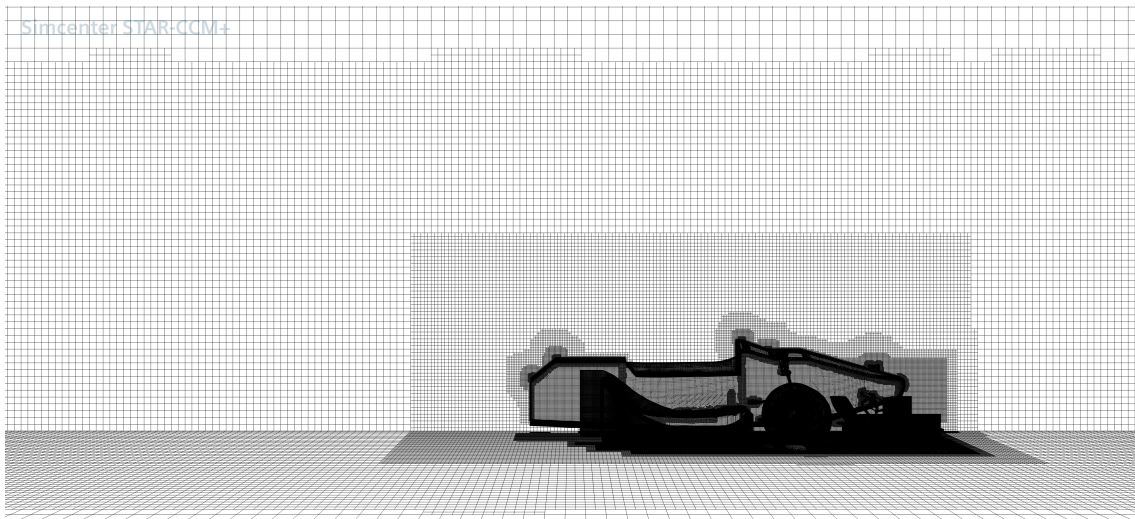


(c) Toppvy av de olika regionerna.

**Figur 3.6:** De slutgiltiga mesh-regionerna närmast framvingen sedd från olika vyer. Regionen kring framhjulet (gul) förlängdes bakåt för att inkludera den övre delen av sidovingarna. Diffuser-regionen (grön) gjordes kortare för att skära ned antalet celler i bilens bakre del. Den yttre regionen (ljusblå) förlängdes ned mot golvet.

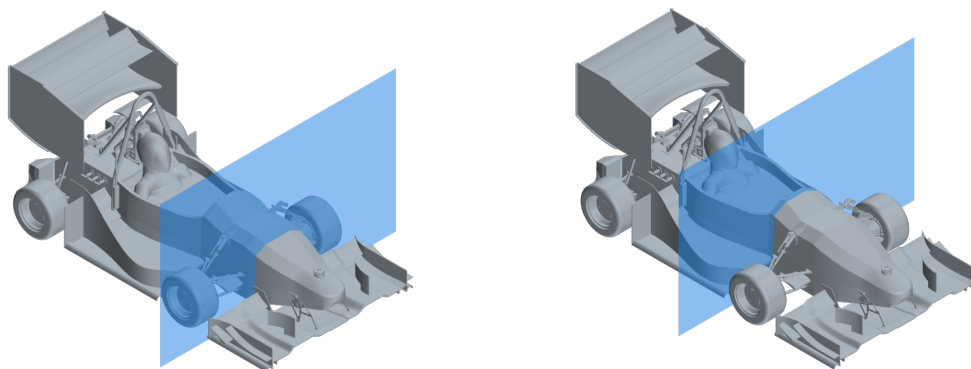
#### 3.1.6 Efterbehandling och analys

Efterbehandlingen av simuleringarna bestod huvudsakligen av två delar, en numerisk del och en visuell del. I den numeriska delen studerades värdena för downforce som genererats av framvingen i den förenklade modellen, vilka jämfördes med motsvarande värden i helbilssimuleringen. Detta utgjorde det huvudsakliga måttet på framvingens individuella prestanda i den undersökta modellen. I den visuella delen studerades flödets utseende i två tvärsnitt framför och bakom framhjulen, samt i vyn från bilens under- och ovsida. Tvärsnitten togs 7 cm framför framhjulet respektive 2 cm bakom framhjulen, se figur 3.8. De parametrar som i synnerhet analyserades



**Figur 3.7:** Modifierad mesh som användes till förenklingarna HF, HFK, HFKU samt HFKUS. Jämfört med meshen för referenssimuleringarna har antalet celler som används bakom bilen reducerats.

var tryckkoefficienten, totaltryckskoefficienten och vorticitetsvektorns komponent i bilens färdriktning. Syftet med att studera flödesfälten visuellt var framförallt att undersöka ifall den förenklade modellen kunde prediktera framvingens påverkan på komponenter längre bak på bilen. Dessutom användes bilderna som grund för framtagning av nya framvingekoncept.



(a) Tvärsnitt 7 cm framför hjulen.

(b) Tvärsnitt 2 cm bakom hjulen.

**Figur 3.8:** Placering av de tvärsnitt som användes till analys av framvingens prestanda.

Efter att de olika modellerna simulerats och efterbehandlats jämfördes de mot varandra. Den ökade beräkningskostnaden för mer detaljerade förenklingar vägdes mot den marginella förbättringen av flödets noggrannhet i förhållande till helbilssimuleringen. Den modell som ansågs ge tillräckligt goda resultat med minimalt antal

celler användes till vidare arbete i projektets andra delmoment.

## 3.2 Framtagning av ny vinge

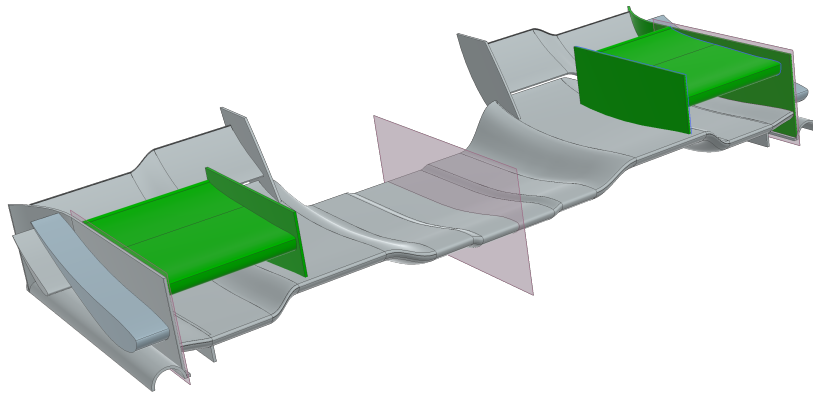
I projektets andra del prövades den förenklade modellen genom framtagning av ett nytt framvingekoncept.

### 3.2.1 CAD-modellering och design av framvinge

Ett antal nya framvingar skapades med CAD baserat på slutsatserna som dragits av genomförda simuleringar. Tidigare års framvinge, regler och inspiration från andra Formula Student-lag och Formel 1-lag togs fram. Utifrån det underlaget valdes några möjliga modifikationer ut och designades i Siemens NX. För att avgränsa designarbetet fokuserades alla förbättringar på att lägga till en övervinge. Ett tillägg av en övervinge innebär endast additiv design, vilket underlättar arbetet och kan öka chansen att hitta en förbättring. CFS har ingen övervinge fram sedan tidigare och de har nyligen förbättrat sin bakvinge med hjälp av en övervinge. Övervingar har också observerats i framgångsrika Formel 1 och Formula Student-lag. Därav bedömdes en övervinge ha potential att förbättra CFS framvinge. En ytterligare fördel med konceptet i just detta arbete är att en övervinge bör ha stor påverkan på luftflödet bakom vingen vilket kan visa vilka begränsningar modellen har. Här skapades tre olika framvingekoncept.

### 3.2.2 Nytt koncept för framvinge baserat på en geometriskt förenklad simuleringsmodell

HFKU-förenklingen användes för att simulera de nya vingarna då denna bedömdes ge en god balans mellan cellantal och prestanda. Designprocessen var iterativ och efter att en given framvinge simulerats gjordes justeringar varpå vingen simulerades igen. Här gjordes framförallt ändringar av vingprofil och Gurney Flap, totalt skapades 9 varianter från de 3 koncepten. Den mest lovande vingen utifrån uppmätt downforce och bilder på tryckfält och vorticitet etc. valdes ut för simulering i helbil. I figur 3.9 visas denna vinge, som hädanefter benämns N23.



**Figur 3.9:** Framvingekoncept N23 som utvecklats för att undersöka förenklingen HFKUs tillämpbarhet. Huvudsegmentet är detsamma som för O23, men övervingar har lagts till på vardera sida av vingen.

### 3.2.3 Ny framvinge i helbilssimulering

Den valda framvingen N23 simulerades i helbil och resultatet analyserades och jämfördes med tidigare framvingar som simulerats i helbil. Resultatet för den nya framvingen och för framvingarna som använts som referens jämfördes också mot respektive förenklad simulering för att utröna huruvida resultaten i den förenklade modellen korrelerar väl gentemot resultaten i helbilssimulering. På så sätt utvärderades huruvida den slutgiltiga förenklade modellen kan utnyttjas som verktyg i en reell designprocess.



# 4

## Resultat och analys

Målet med arbetet var att undersöka huruvida geometriska förenklingar i CFD-simuleringar kan användas vid designen av en framvinge för att spara beräkningskraft. En förutsättning för detta är att resultatet i en förenklad modell beskriver verkligheten relativt väl och att det kan användas för att prediktera hur en viss framvinge kommer att prestera i en referenssimulering. Underlag för att diskutera detta presenteras i detta kapitel.

### 4.1 Förenklade simuleringar jämfört med referenssimulering för vinge O23

Inledningvis presenteras hur de undersökta geometriska förenklingarna presterar gentemot helbilssimuleringen för vinge O23. Här redovisas antal celler, framvingens downforce, tryckkoefficient, totaltryckskoefficient och vorticitet.

#### 4.1.1 Cellantal för förenklade modeller

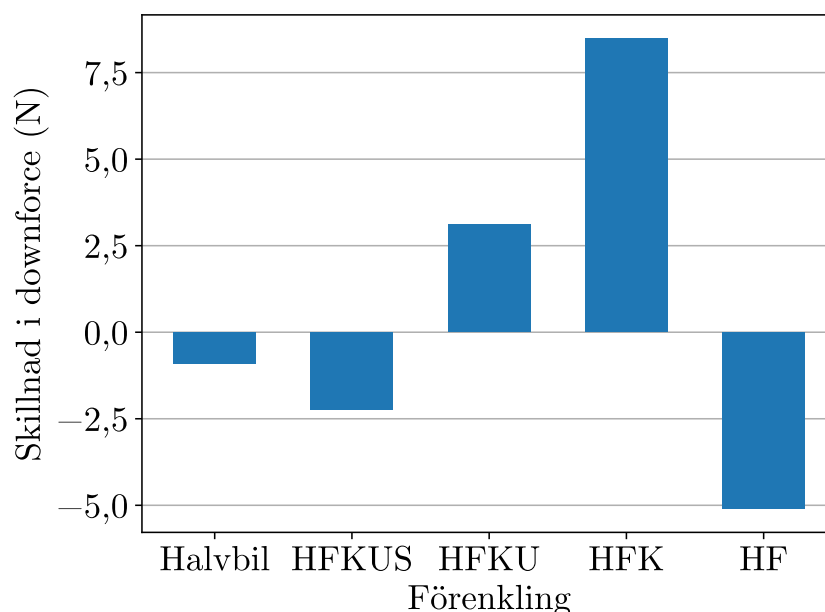
I tabell 4.1 visas antalet celler för varje given simulering med CFS framvinge från 2023. Antalet celler i en given simulering är i stort sett proportionellt med beräkningskraften som krävs för att köra den om alla andra inställningar är konstanta. Därför är de procentuella skillnaderna i tredje kolonnen i tabell 4.1 ett bra mått på hur många processortimmar som sparas med de olika geometriska förenklingarna.

**Tabell 4.1:** Sammanställning av antalet celler i förenklingarna med framvinge O23, samt en jämförelse med cellantalet för helbilssimulering.

Simulering (O23)	Antal celler	Storlek jämfört med helbil
Helbil	72 000 000	—
Halvbil	36 860 000	51 %
HFKUS	17 400 000	24 %
HFKU	13 540 000	18 %
HFK	12 310 000	17 %
HF	8 740 000	12 %

### 4.1.2 Framvingens downforce i förenklade modeller

Framvingens downforce har undersökts i de olika förenklade modellerna. Det som främst är intressant här är avvikelserna från helbilssimuleringen. I figur 4.1 visas mängden downforce vinge O23 genererar i helbilssimulering respektive i de förenklade modellerna. Standardavvikelsen för total downforce vid upprepade körningar av samma helbilssimulering är, enligt CFS,  $1,3N$  [2] och för att vara användbar i en designprocess behöver modellen kunna fånga förändringar på några få Newton. Med detta i åtanke kan avvikelserna för framvingens downforce sättas i proportion. Alla förenklingar förutom halvbil resulterar i avvikelser för framvingens downforce som är utanför standardavvikelsen för en helbilssimulering, vilket tyder på att information förloras i förenklingarna. Frågan är hur viktig den informationen som förloras är för designen av framvingen. För att utröna detta måste andra faktorer än enbart framvingens downforce analyseras, vilket görs i följande kapitel.

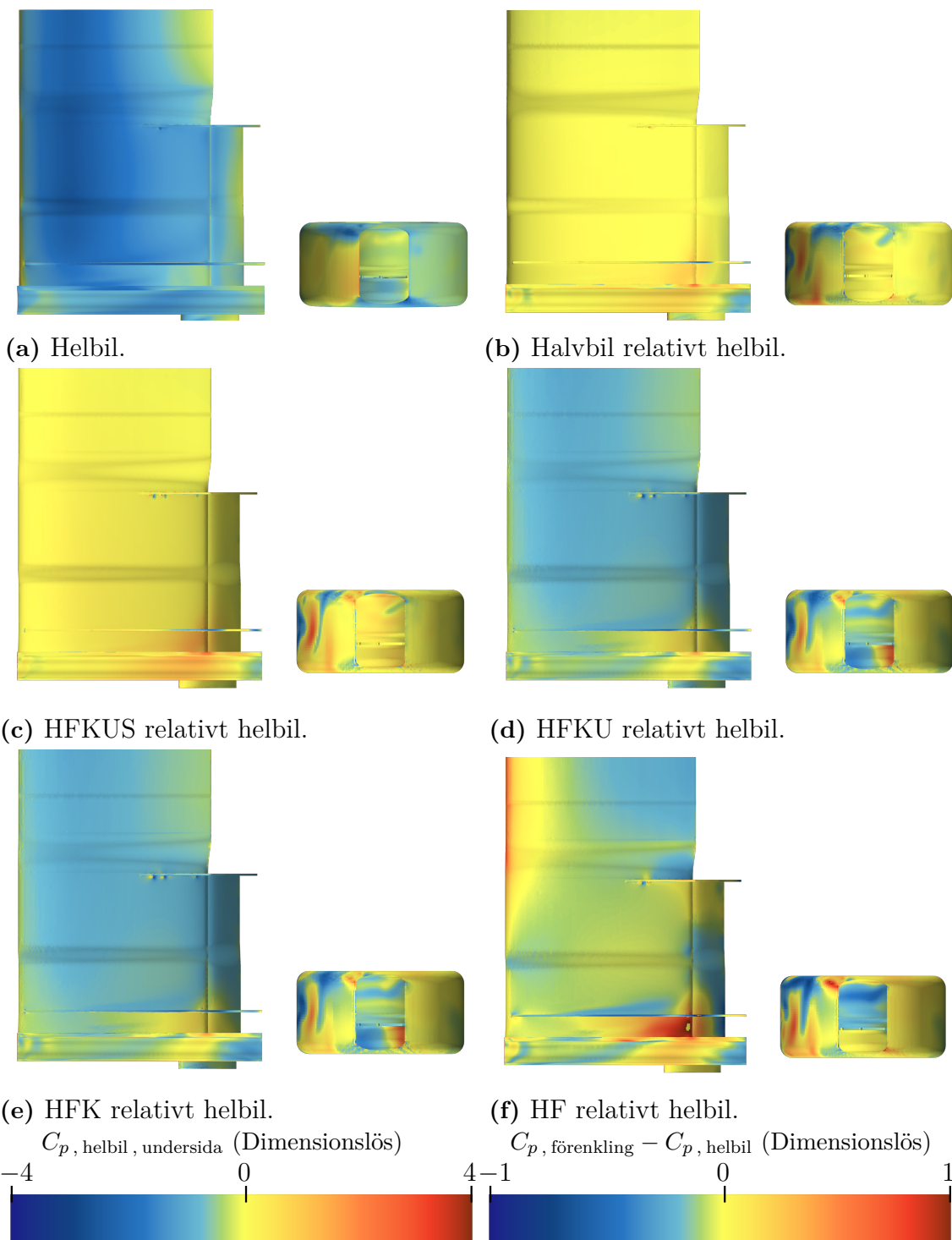


**Figur 4.1:** Skillnad i downforce på framvinge O23 för de olika förenklingarna jämfört med referens. Staplarna representerar sammanlagd downforce för hela framvingen. Ett värde nära noll innebär liten avvikelse från helbilssimuleringen. Referensvärdet för O23 var  $106,4N$ .

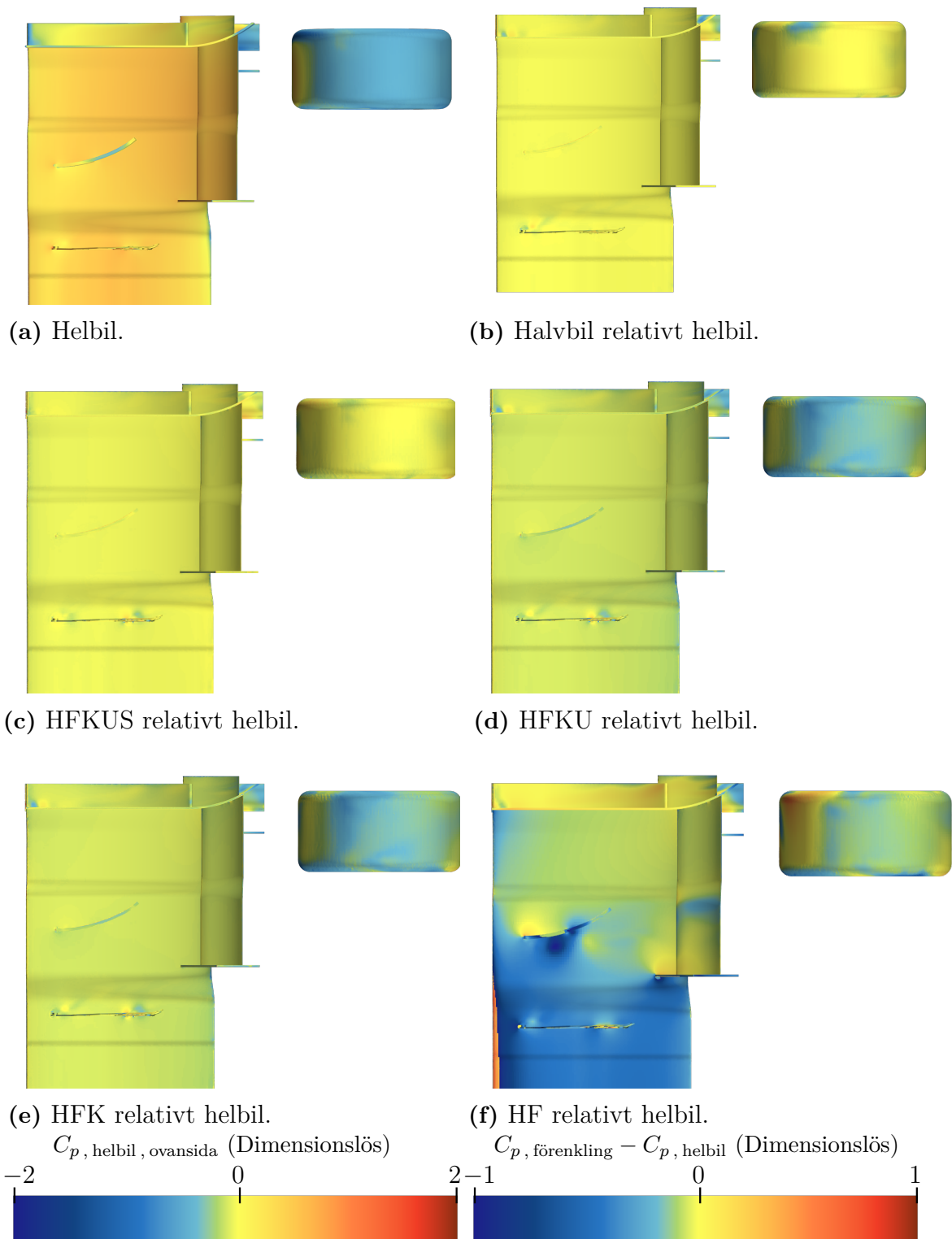
### 4.1.3 Tryckkoefficient på framvingen i förenklade modeller

Tryckfördelningen på framvingens undersida i halvbils- och HFKUS-konfiguration i figur 4.2b respektive 4.2c, stämmer väl överens med referensen i figur 4.2a. För HFKU och resterande förenklingar börjar tryckkoefficienten avvika något, då lågtryckszonen på vingens undersida är större än för referensen. Avsaknaden av sidostrukturer tycks alltså påverka tryckfördelningen märkbart. Framvingens undersida i HF tycks avvika oregelbundet från referenssimuleringen, något som gör förenklingen oberäknelig och försvårar dess användning. Med motsvarande analys för framvingens

ovansida, i figur 4.3, inses att skillnaderna på ovansidan inte är lika stora som för undersidan. I HFKU och HFK kan marginella skillnader utrönas. Större skillnader i tryckkoefficient visas i HF relativt helbil. Avsaknaden av karossens främre ände tycks sänka tryckkoefficienten kring vingens centrala delar.



**Figur 4.2:** Tryckkoefficienten på framvingens undersida för helbilssimuleringen, samt avvikelser från detta fält för de olika förenklingarna (beräknat som förenkling minus helbil). För figur 4.2a gäller den vänstra färgskalan ovan och för övriga figurer gäller den högra. Luftflöde från vänster till höger.

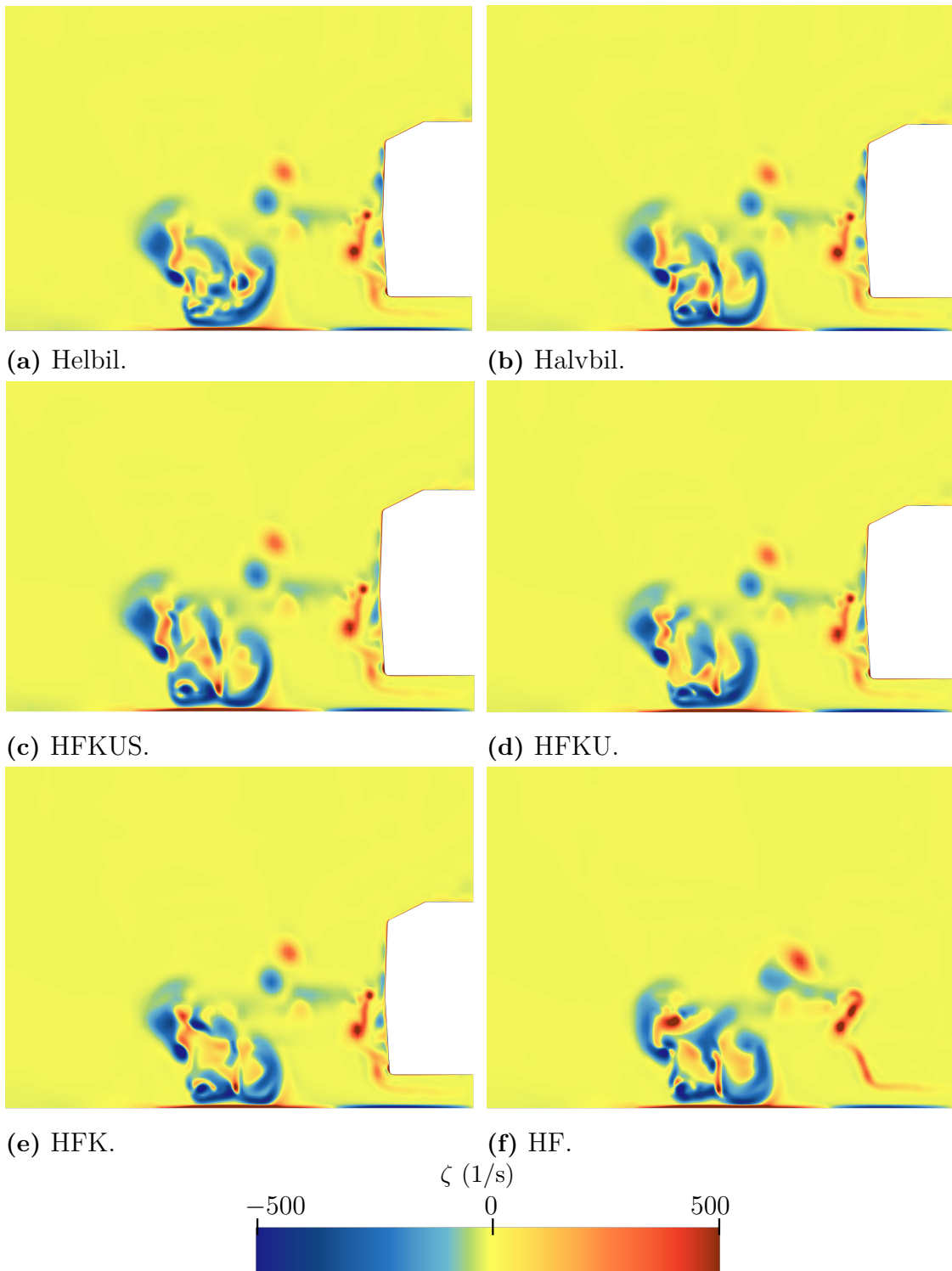


**Figur 4.3:** Tryckkoefficienten på framvingens ovansida för helbilssimuleringen, samt avvikelser från detta fält för de olika förenklingarna. För figur 4.3a gäller den vänstra färgskalan ovan och för övriga figurer gäller den högra. Luftflöde från vänster till höger.

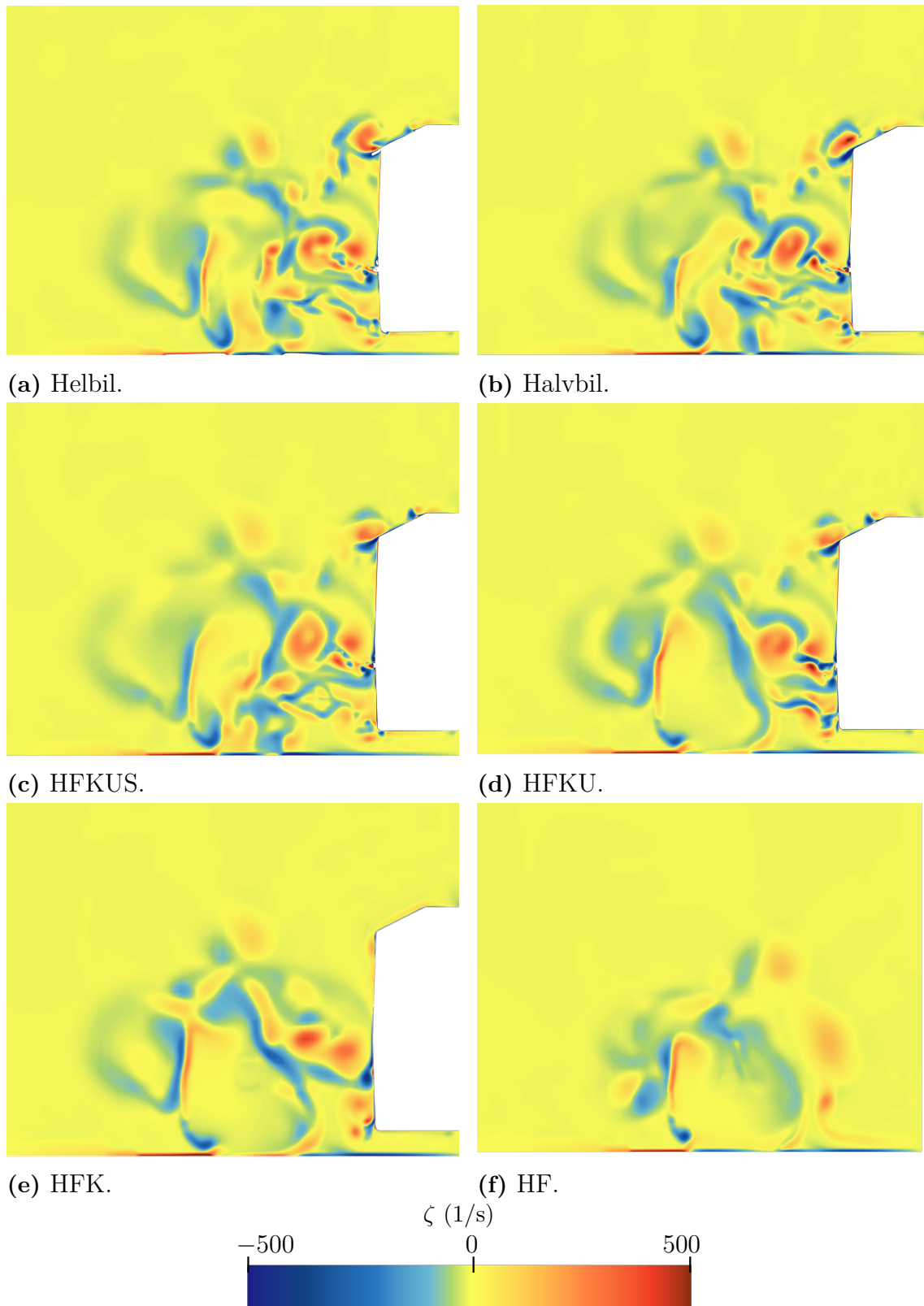
#### 4.1.4 Vorticitet i luftflödets riktning framför och bakom framhjulen i förenklade modeller

Vorticiteten visas i rött för virvlar som roterar medurs och blått för virvlar som roterar moturs. I planet framför framhjulen som visas i figur 4.4 syns vissa mindre skillnader mellan referens och halvbil. Ytterligare små skillnader kan observeras genom HFKUS, HFKU och HFK, men de större rörelserna i vorticitet är snarlika i de förenklingarna. I HF syns större skillnader gentemot referens, framförallt i utrymmet mellan hjulen och karossen (som saknas i modellen). Emellertid kan de övergripande mönstren urskiljas även här.

I planet bakom framhjulen som visas i figur 4.5 syns genomgående stora skillnader mellan simuleringarna. Redan i halvbilssimuleringen syns skillnader gentemot referenssimuleringen, även om många virvlar och former bibehålls. Mellan halvbil och HFKUS syns vissa skillnader, främst i de detaljerna som följer hjulupphängningen. Detta är oväntat då geometrin inte förändras i närheten av eller framför planet. I HFKU försvinner många rörelser precis innanför hjulen och i HFK går virvlarna som skapas av hjulupphängningen förlorade. I HF försvinner virvlarna som skapas av bullhornen (de små vingarna innanför hjulen som sitter fast på karossen) och här tycks skillnaden mellan HF och referenssimuleringen vara betydande. Möjligheten att förutsäga hur virvlar kommer flöda över, under och runt bilen minskar vid stora geometriska förenklingar.



**Figur 4.4:** Vorticiteten för förenklingarna och referensen i ett plan i bilens färdriktning, sett framifrån 7 cm framför framhjulet (se figur 3.8a). Positiv vorticitet motsvarar medurs rotation och vice versa.

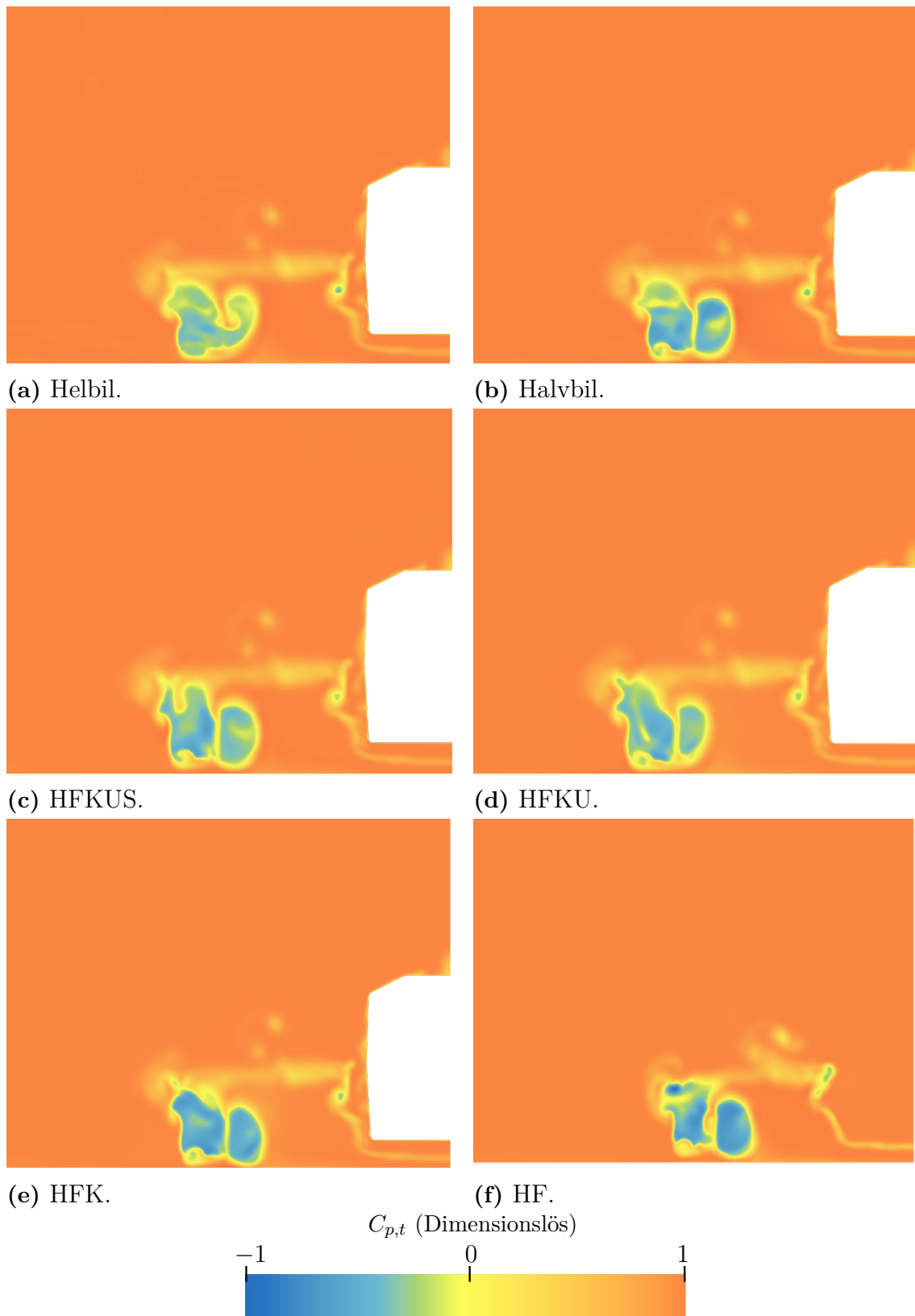


**Figur 4.5:** Vorticiteten för förenklingarna och referensen i ett plan i bilens färdriktning, sett framifrån 2 cm bakom framhjulet (se figur 3.8b). Positiv vorticitet motsvarar medurs rotation och vice versa.

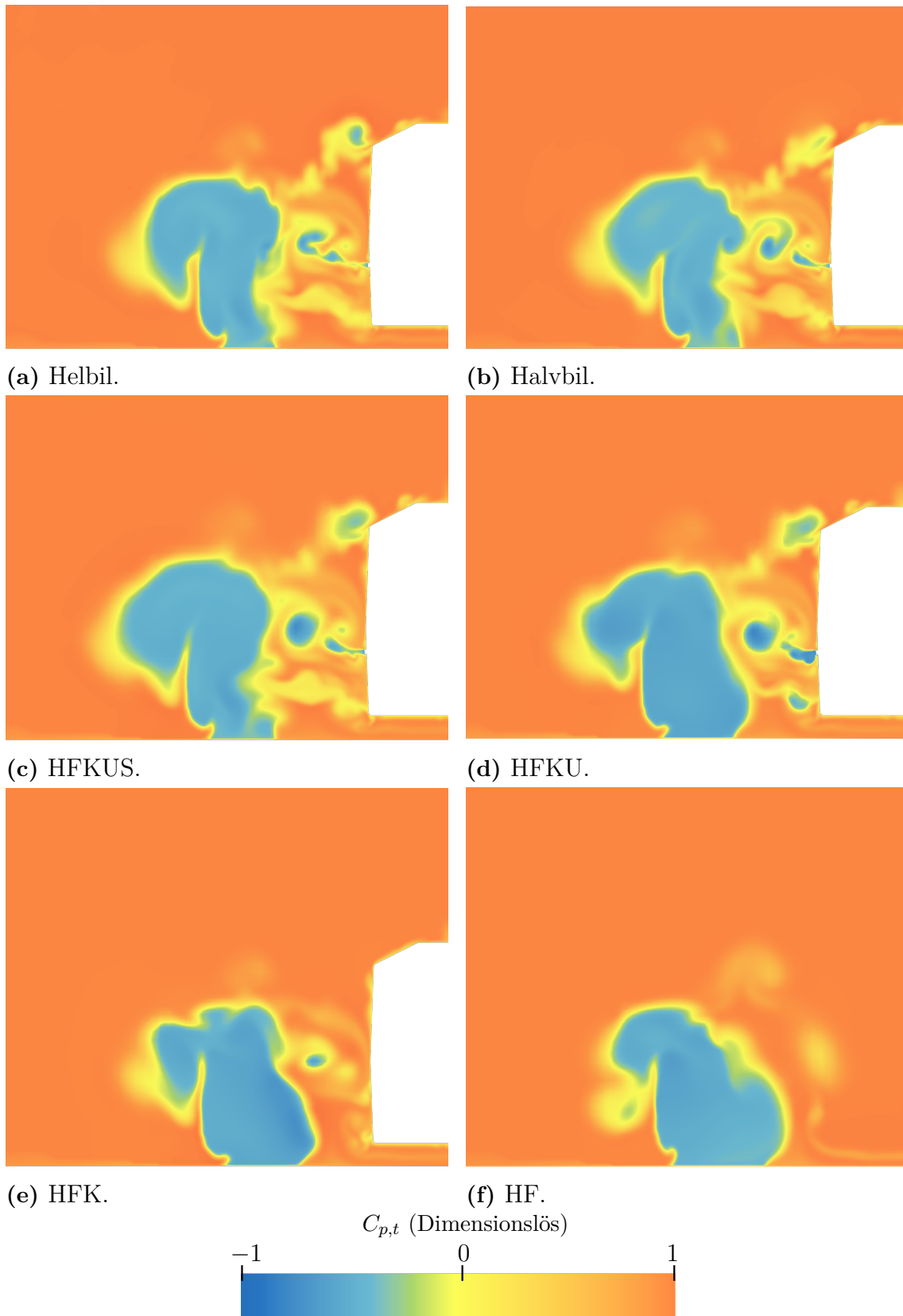
### 4.1.5 Totaltryckskoefficient i förenklade modeller

Totaltryckskoefficienten indikerar energiförluster i luften, där  $C_{p,t} = 1$  innebär att ingen energi förloras. Detta kan användas för att förutsäga hur en framvinge kommer påverka konstruktioner längre nedströms. I planet framför hjulet, figur 4.6 syns stora likheter mellan de olika simuleringarna och alla förenklingar ser ut att kunna prediktera totaltryckskoefficienten i detta plan väl.

I planet bakom framhjulen ses större skillnader i totaltryckskoefficienten mellan simuleringarna, se figur 4.7. I halvbilssimuleringen kan vissa skillnader i form och storlek observeras mellan utformningen av områden med låg totaltryckskoefficient. Ytterligare mindre skillnader kan observeras när modellen förenklas ned till HFKUS och HFKU. HFKUS korrelerar förhållandevis väl med referenssimuleringen, men i HFKU kan ett stort område med låg totaltryckskoefficient observeras innanför hjulen, nära marken, som inte finns i referenssimuleringen. HFK och HF saknar hjulupphängning och därför saknas flera områden mellan hjulet och karossen som skapats av hjulupphängningen. Mellan HFK och HF försvinner också bullhornsen som sitter på karossen vilket reflekteras i totaltryckskoefficienten på planet bakom hjulen.



**Figur 4.6:** Totaltryckskoefficienten för förenklingarna och referensen i ett plan i bilens färdriktning, 7 cm framför framhjulet (se figur 3.8a).

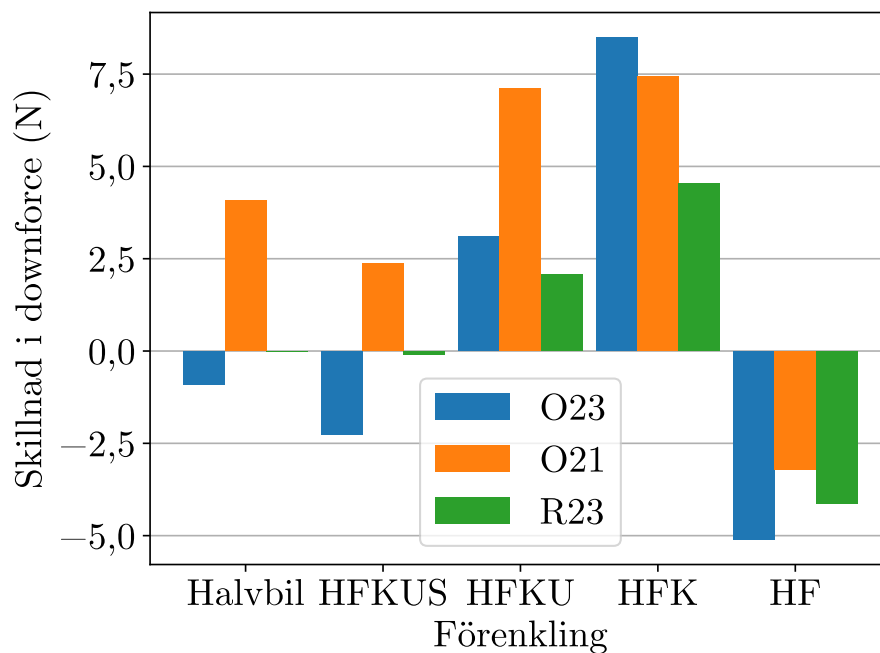


**Figur 4.7:** Totaltryckskoefficienten för förenklingarna och referensen, i ett plan 2 cm bakom framhjulet (se figur 3.8b).

## 4.2 Jämförelse av downforce med framvingar O21 och R23

I detta avsnitt jämförs resultaten för O23 med de för O21 och R23, i syfte att se hur väl de förenklade modellerna fångar upp olika vingars specifika egenskaper.

Genom att studera figur 4.8 noteras att respektive förenkling tycks följa ett generellt mönster i hur de skattar framvingens downforce relativt referensmodellen. HF ger något för låga värden, medan HFKU och HFK ger för höga. De två förenklingarna vars beräkning av downforce stämmer bäst överens med referenssimuleringen är HFKUS och halvbil, även om dessa tycks variera kring noll för de olika framvingarna. Intressant är att skillnaden mot referenssimulering för en given förenkling avviker ganska lite mellan vingarna. Det tyder på att alla modeller skulle kunna vara användbara för att förutsäga vilken framvinge (av ett urval) som producerar mest downforce.



**Figur 4.8:** Skillnad i downforce på de olika framvingarna i varje förenkling jämfört med respektive Helbil. Staplarna representerar sammanlagd downforce för hela framvingen. Ett värde nära noll innebär liten avvikelse från helbilssimuleringen. Referensvärdena var 106,4 N för O23, 105,2 N för O21 och 36,8 N för R23.

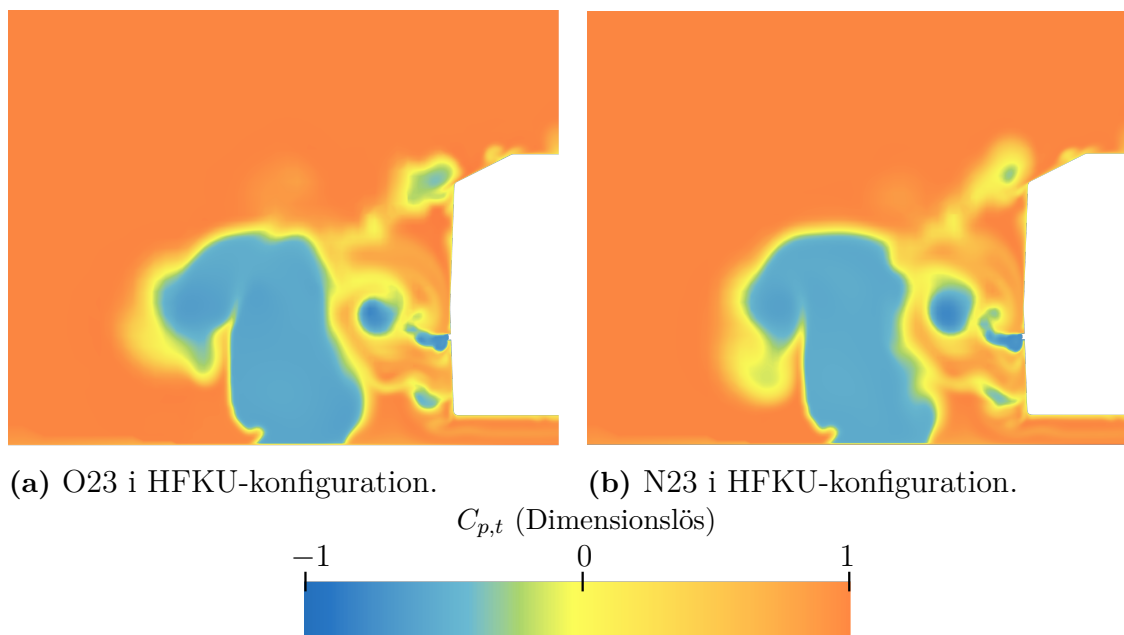
## 4.3 Prestanda för ny framvinge

Flera framvingskoncept testades i en förenklad modell och den med bäst prestanda simulerades därefter i helbilskonfiguration. HFKU var den förenklade modell som valdes ut till processen, eftersom modellen tycks uppvisa en bra balans mellan antal celler och precision. Detta diskuteras vidare i avsnitt 5.1.

### 4.3.1 Ny framvinge N23 i förenklad modell HFKU

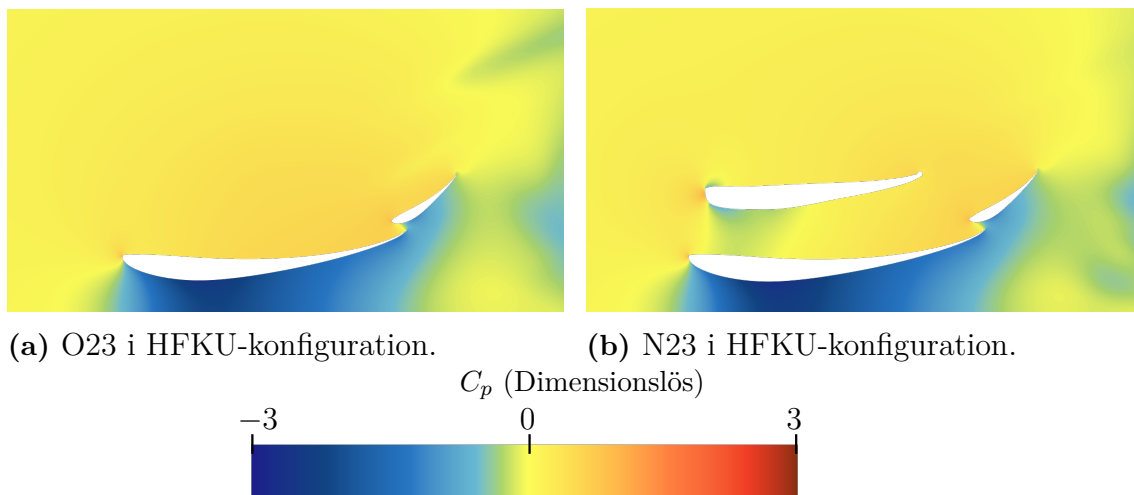
Designen av en ny ving genomfördes och testades i modellen HFKU. Detta gjordes iterativt och som ett led i designprocessen utforskades tryckkoefficienten runt vingarna och totaltryckskoefficienten framför respektive bakom framhjulen. Tre olika grundkoncept för framvingen testades i totalt nio versioner. Den ving med högst downforce, hädanefter kallad N23, valdes utför att simuleras i helbil. En bild på N23 återfinns i figur 3.9. Då denna testades i HFKU erhöles 112,0 N i downforce på framvingen, medan samma värde för O23 uppgick till 109,5 N. För att utvärdera vingens övergripande prestation krävs dock en jämförelse i helbilssimulering.

I figur 4.9 framgår det att N23 ger upphov till ett större område med låg totaltryckskoefficient mellan hjulet och karossen än O23. Detta ger indikationer om att sidovingarna och övriga aerodynamiska komponenter längre bak på bilen eventuellt kan komma att prestera sämre.



**Figur 4.9:** Totaltryckskoefficienten i den förenklade modellen HFKU för O23 till vänster och N23 till höger. Visas i ett tvärsnitt 2 cm bakom framhjulen.

I figur 4.10 visas tryckkoefficienten för vingarna O23 och N23 i ett plan precis innanför hjulen. Det turkosa området ovanför den övre vingen i N23 visar ett litet lågtrycksområde. Det är oönskat och en bättre vingprofil design hade kunnat ge ett genomgående högtryck ovanför övervingen och ett större lågtrycksområde precis under övervingen. Tillsammans hade detta kunnat resulterat i högre downforce.



**Figur 4.10:** Tryckkoefficienten i den förenklade modellen HFKU för O23 till vänster och N23 till höger. Visas i ett tvärsnitt innanför framhjulet, sett från sidan i förhållande till bilens färdriktning och in-zoomat på framvings del i det planet. Luften flödar från vänster till höger.

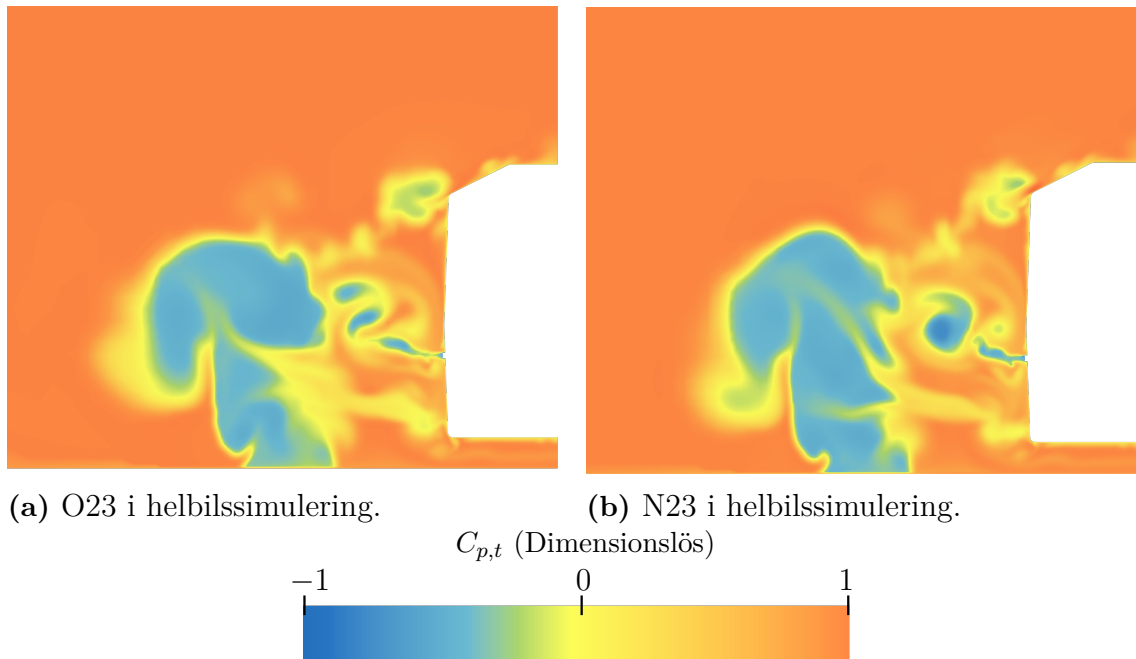
### 4.3.2 Ny framvinge N23 i helbilssimulering

I tabell 4.2 jämförs resultaten för N23 och O23 då de testats i helbilssimulering. Den nya vingen N23 får ut lika mycket downforce på framvingen som O23, men bilen som helhet förlorar totalt 15,5 N med den nya framvingen. Värdena för framvings downforce i HFKU har även inkluderats för att jämföra den förenklade modellen med helbilmodellen.

**Tabell 4.2:** Tabell över downforce för vinge O23 och N23 i HFKU.

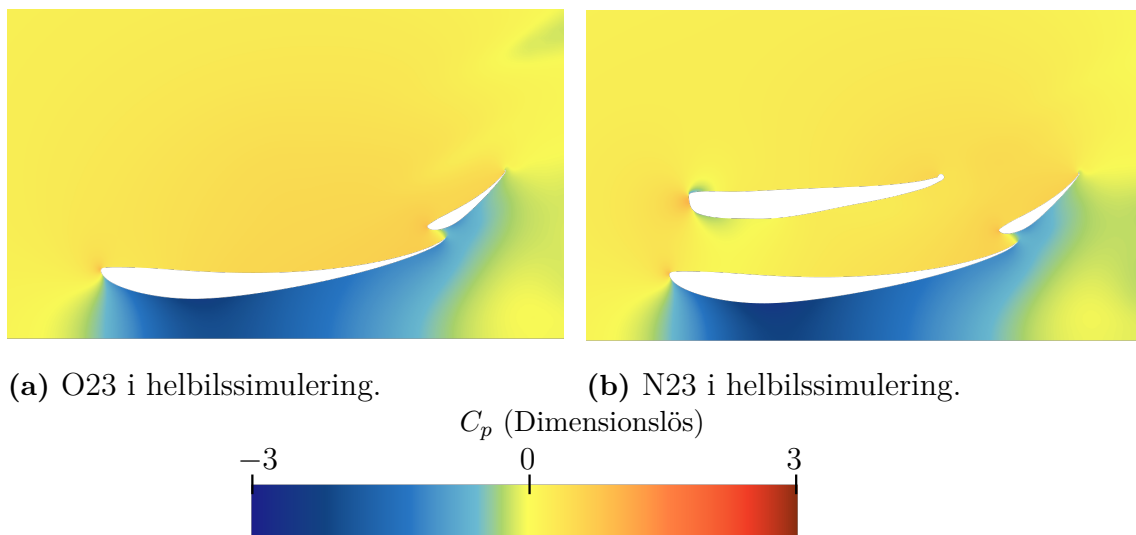
Simulering	Total downforce (N)	Downforce framvinge (N)
O23 HFKU	—	109,5
N23 HFKU	—	112,0
O23 Helbil	336,5	106,4
N23 Helbil	321,0	106,4

Totaltryckskoefficienten för N23 och O23 visas i figur 4.11. Precis som i förenklingen HFKU kan ett större område med låg totaltryckskoefficient observeras mellan hjul och kaross med N23. Detta kan antas påverka de aerodynamiska komponenterna nedströms negativt.



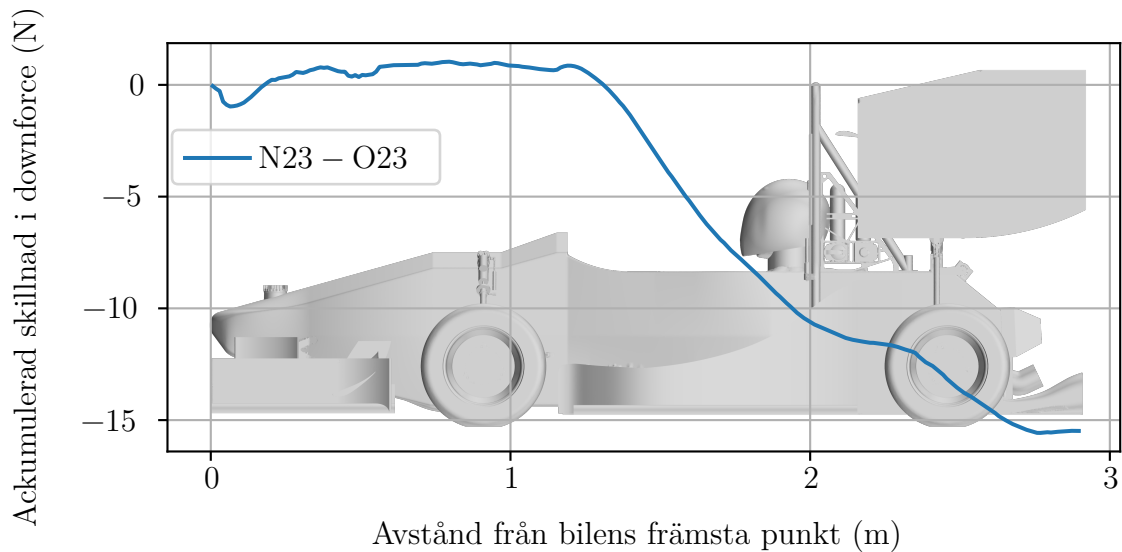
**Figur 4.11:** Totaltryckskoefficienten i referenssimulering för O23 och N23, visat i ett tvärsnitt 2 cm bakom framhjulen.

Tryckkoefficienten i helbil visar upp ett liknande beteende som tryckkoefficienten i den förenklade modellen HFKU, se figur 4.12b och 4.10b. En skillnad som syns är att lågtrycksområdet under övervingen är mindre i helbil än i förenklingen. Detta bör försämra prestandan av övervingen, och det reflekteras också i framvingens downforce i tabell 4.2.



**Figur 4.12:** Tryckkoefficienten i referenssimulering för O23 till vänster och N23 till höger. Visas i ett tvärsnitt innanför framhjulet, sett från sidan i förhållande till bilens färdriktning och in-zoomat på framvings del i det planet. Luften flödar från vänster till höger.

För att förklara skillnaden i total downforce mellan N23 och O23 undersöks den ackumulerade downforcen längs med bilen. Detta visas i figur 4.13 och det är tydligt att skillnaden i downforce skapas i andra halvan av bilen. Downforce beräknades därför för undergolvet och diffusern, för sidovingarna samt för bakvingen. Med O23 erhöles 52,9 N, 81,4 N respektive 106,5 N. Å andra sidan erhöles 45,0 N, 74,5 N respektive 106,6 N med N23. Undergolvet och diffusern ger alltså 7,9 N mer downforce med O23. Likaså ger sidovingarna 6,9 N mer downforce med O23. Bakvingen genererar snarlika värden för båda vingarna.



**Figur 4.13:** Ackumulerad skillnad i downforce mellan N23 och O23, uträknat som N23 minus O23.

# 5

## Diskussion

I detta kapitel diskuteras de olika förenklingarna med avstamp i den analys som gjordes i föregående kapitel. Utifrån de egenskaper som modellerna tycks uppvisa görs bedömningar kring vilka begränsningar modellerna har, det vill säga vilka trender i helbilssimuleringen som kan förutspås i den förenklade modellen och med vilken precision detta kan göras. Detta viktas mot antalet celler i förenklingen, och utgör sedermera grunden för de förenklade modellernas potentiella användningsområden vid utvecklingen av framvingen för en Formula Student-bil. Vidare utvärderas designarbetet av en ny framvinge med hjälp av en förenklad modell.

### 5.1 Användningsområden och begränsningar för förenklingarna

Nedan redogörs för respektive modells potentiella användningsområden och begränsningar. En gemensam begränsning för samtliga förenklingar är, eftersom de har gjorts i halvbilskonfiguration, att de enbart kan användas för att undersöka körscenarion som till god approximation resulterar i symmetriska flöden. Vidare gäller att en förenklad modell ej utgör ett fullgott substitut till en helbilssimulering. En slutgiltig framvingedesign måste simuleras i helbilskonfiguration för att kunna utvärderas med större precision. Utifrån figur 4.8 tycks förenklingarnas osäkerheter vara för stora för att kunna jämföra skillnader i framvingens downforce som är mindre än 5 N. Däremot kan en förenklad modell med fördel användas som komplement till en helbilssimulering, i synnerhet tidigt i designprocessen då många olika vingalternativ ska jämföras. På så sätt skulle antalet helbilssimuleringar som krävs kraftigt reduceras.

#### 5.1.1 Framhjul och framvinge (HF)

Detta är den mest förenklade modellen som har undersökts i denna studie, där antalet celler har reducerats till 12% av helbilssimuleringen. Sett till simuleringskostnader är HF alltså den mest gynnsamma förenklingen att använda. Nivån av förenkling sker dock på bekostnad av modellens jämförbarhet med helhetssimuleringen. Vid en första anblick tycks framvingens downforce kunna analyseras på en relativt god nivå, enligt figur 4.8. När figur 4.2f och 4.3f studeras ses små skillnader

i tryckkoefficient jämfört med referens vid den yttre delen av vingens ovansida. Där-  
emot indikerar de stora skillnaderna i tryckkoefficient kring framvingens mitt, samt  
vid de yttre delarna av framvingens undersida, att dessa delar av framvingen inte  
är lämpliga att undersöka i HF-förenklingen. Vidare medför skillnaderna i tryck och  
vorticitet mellan framvingen och framhjulen viss oförutsägbarhet kring hur luftflödet  
kommer propagera nedströms. Således bedöms modellen enbart kunna användas till  
att undersöka designen på ovansidan av framvingens yttre delar, så som ändplattor  
och vingelement.

### 5.1.2 Framhjul, framvinge och kaross (HFK)

Att inkludera karossen innebär en ökning av antalet celler med 40 % relativt HF.  
Förenklingen är fortfarande en avsevärd minskning av beräkningskostnaden, då den  
endast har 17 % av antalet celler jämfört med helbilssimuleringen. HFK är däremot  
mer jämförbar med helbilssimuleringen än HF. Tryckfördelningen vid framvingens  
centrala delar, totaltryckskoefficient och vorticitet mellan framvinge och framhjul  
är alla mer lika helbilssimuleringen än för HF. Bakom framhjulen ökar skillnaderna  
till följd av att hjulupphängningen inte är inkluderad. Flödet nedströms kan alltså  
analyseras relativt väl nedströms till framhjulet, vilket kan vara av användning för  
att exempelvis studera framvingens interaktion med framhjulen och hur luftflödet  
kan styras runt dem.

### 5.1.3 Framhjul, framvinge, kaross och hjulupphängning (HF- KU)

Hjulupphängningen ökade antalet celler med 10 % jämfört med HFK. Precisionen för  
framvingens downforce ökar för samtliga undersökta vingar i figur 4.8 och likheterna  
relativt helbilssimuleringen för vorticitet och totaltryckskoefficient ökar i området  
mellan framhjulen och sidostrukturererna jämfört med HFK. Detta möjliggör ytterli-  
gare analys av hur flödet propagerar nedströms. Utöver de användningsområden som  
diskuterades för HFK, kan även luftflödets interaktion med sidostrukturererna förutsä-  
gas med större säkerhet. Detta ger indikationer för om en viss design av framvingen  
ger upphov till negativa egenskaper för flödet längre nedströms. Exempelvis kan  
totaltryckskoefficienten studeras för den luft som är på väg mot sidostrukturerernas  
ovansida, för att avgöra energiinnehållet för luften som kommer träffa de aerodyna-  
miskt intressanta ytorna. Givet det utökade användningsområdet för HFKU relativt  
HFK, med hänsyn till den relativt låga ökningen av antalet celler, bedöms HFKU  
vara modellen att föredra av de två.

### 5.1.4 Framhjul, framvinge, kaross, hjulupphängning och sid- ostrukturer (HFKUS)

Utöver halvbilmodellen var HFKUS den förenkling som efterliknade helbilssimule-  
ringen mest, sett till tryckkoefficient, vorticitet, totaltryckskoefficient och downfor-  
ce. Antalet celler ökar påtagligt, 29 % jämfört med HFKU, vilket gör att HFKUS  
presterar sämre ur ett kostnadsperspektiv. HFKUS tycks uppvisa liknande använd-

ningsområden och begränsningar som HFKU, om än med något bättre precision. Vid jämförelse av ett stort antal framvingar bedöms därför HFKU mer fördelaktig att använda, sett till modellens användningsområden i förhållande till beräkningskostnad. HFKUS kan dock vara att föredra över HFKU vid jämförelse av ett färre antal framvingar, där det ökade antalet celler inte har lika stor inverkan på de totala beräkningskostnaderna. Vidare kan det vara möjligt att, med hjälp av HFKUS, förutse hur sidostrukturerna presterar vid olika framvingar. Den slutsatsen kan dock inte dras utan ytterligare studier.

### 5.1.5 Halvbil

Denna förenkling är förmodligen den mest etablerade inom den aerodynamiska utvecklingen för formelbilar. Antagandet om att flödesfältet är symmetriskt är i många fall en godtagbar approximation och därför ett enkelt sätt att halvera simuleringskostnaderna. Med en halvbilssimulering tycks hela bilens aerodynamiska prestanda kunna predikteras, eftersom att all geometri är inkluderad. Det är en mycket fördelaktig egenskap för modellen, då man får direkt information om huruvida en viss design av framvinge förbättrar eller försämrar aerodynamiken för hela bilen, något som övriga förenklingar saknar. Det föreligger dock begränsningar i vilka körscenarion som kan undersökas med halvbilssymmetri, eftersom flödesfältet inte längre är symmetriskt vid exempelvis kurvtagning. Studien av detta ligger dock utanför detta projekts omfång.

## 5.2 Utvärdering av framvingedesign med förenklad modell

Utifrån diskussionen kring de olika förenklingarna ovan valdes HFKU för att simulera de nydesignade framvingarna. Att förenkling och helbil tycks ange olika inbördes förhållanden sett till framvingarnas downforce försvagar modellen något. Skillnaderna mellan vingarnas downforce i tabell 4.2 tycks emellertid vara för små för att jämföras med HFKU, enligt den precision som diskuterades i avsnitt 5.1. Detta hade kunnat undersökas ytterligare med fler designiterationer.

Vissa element av framvingens inverkan på hela bilens aerodynamiska prestanda kunde förutsägas, baserat på analysen i avsnitt 4.3.2. Då totaltryckscoeffcienten jämfördes mellan O23 och N23 i figur 4.9 verkade luften som träffar sidostrukturerna ha lägre energi med N23. Detta förmodades försämma dess aerodynamiska prestanda, vilket alltså var fallet då vingarna simulerades i helbil. Att detta kunde förutsägas med HFKU stärker modellen. Även diffuser och undergolv genererade lägre downforce med N23 än O23, men detta är emellertid inte något som kunde fångas upp vid analysen av HFKU.

Utifrån ovanstående resonemang konstateras alltså att den förenklade modellen inte bör användas isolerat. Den ger dock mycket information kring hur en vinge påverkar flödet runt omkring vingen. Förmågan att kunna jämföra olika designalternativ i den förenklade modellen, för att sedan verifiera den, eller de, mest lovande varian-

terna i helbilskonfiguration bedöms således vara möjligt. Emellertid skulle fler nya framvingar behöva testas för att närmare avgöra modellens robusthet.

# 6

## Slutsatser

I detta projekt har framvingens aerodynamiska prestanda undersökts vid användandet av olika geometriska förenklingar. Framvingens downforce har utgjort fokus för analysen, men även hur flödet längre nedströms kan förutsägas med en förenklad modell har diskuterats. En modell har även testats i designprocessen av en ny framvinge.

De förenklade modeller som bedömdes vara mest användbara för utvecklingen av en framvinge var HFKU som innehåller hjul, framvinge, kaross och hjulupphängning samt HFKUS som innehåller samma plus sidostrukturer. Detta motiveras av att de båda har en bra balans av antal celler och precision, och att de dessutom kan förutsäga flödet nedströms med acceptabel precision. HFKUS gör detta med högre noggrannhet, på bekostnad av att modellen har 29 % fler celler än HFKU. Beroende på tillämpning och prioritering mellan beräkningskostnader och detaljnivå får en avvägning göras mellan HFKU och HFKUS. Modellerna innehåller 18 % respektive 24 % av antalet celler i helbilssimuleringen vilket innebär att beräkningskostnaderna reduceras avsevärt med båda modellerna.

HFKU testades som ett verktyg vid designen av en ny vinge och den förutsåg framvingens downforce väl. Genom observationer av totaltryckskoefficienten bakom framhjulen upptäcktes indikationer på att vingen skulle påverka sidostrukturerna negativt. Detta bekräftades sedan i helbilssimuleringen där den nya framvingen hade en negativ påverkan på sidostrukturer, men även på golv och diffuser vilket inte kunde upptäckas med HFKU. Från detta drogs slutsatsen att de geometriska förenkningarna inte bör användas isolerat utan tillsammans med helbilssimuleringar, men att de trots det kan visa sig vara ett väldigt användbart verktyg vid utvecklingen av nya framvingar.

### 6.1 Framtida studier

En naturlig uppföljning av projektet är vidare valideringsarbete av de förenklade modellerna. Förslagsvis kan förenkningarna testas vid utvecklingen av framvingen till framtida Formula Student-bilar, för att undersöka hur väl förenklingen hjälper till i designprocessen. En enkel variant av sådan validering inkluderades i projektet i form av designen av den nya framvingen. Utvecklingsarbetet för ett Formula Student-

lag inkluderar emellertid design av många fler komponenter än bara framvingen, varför det är av stort värde att utvärdera hur förenklingarna kan användas i en mer realistisk designprocess av hela det aerodynamiska paketet för en Formula Student-bil.

Det kan vara fördelaktigt att tillämpa liknande förenklingar på andra komponenter i bilen, såsom bakvingen. Även om ett mer komplext inflöde kan krävas för delar som ligger längre bak i bilen, kan det vara möjligt att åtgärda detta genom att använda utflödet i ett visst plan, från helbilskonfigurationen, som inflödet i samma plan för den nya förenklade modellen. Detta tillvägagångssätt kan hjälpa till att skapa en ny förenklad modell som fortfarande fångar de väsentliga funktionerna i flödet, samtidigt som det möjliggör effektiv beräkningsbehandling. Genom att utöka dessa förenklingar till andra delar av bilen kan det vara möjligt att utveckla en mer heltäckande modell som möjliggör djupare insikter om hela fordonets aerodynamiska beteende.

Under avsnitt 1.4 nämndes att ingen konvergensstudie av beräkningsnätet (så kallad mesh-studie) inkluderas i projektet. Detta är likväl något som måste utföras för att säkerställa modellens stabilitet och att lösningen är oberoende av beräkningscellernas storlek och form. Det är även möjligt att geometriskt förenkla modellerna ytterligare. Exempelvis kan bakdelen av karossen designas om för att minska antalet celler. Den minskade komplexiteten av det som simuleras kan potentiellt också bidra till att färre iterationer av lösningsprocessen behöver köras, se tabell 3.1. Detta skulle ytterligare minska beräkningskostnaden för varje enskild simulering.

För att åstadkomma ett mer statistiskt mått på resultaten kan simuleringen upprepas flera gånger, för att därigenom minska effekterna av slumpmässig variation i data och ge ett mer exakt mått på modellens prestanda. Ett sådant tillvägagångssätt skulle dessutom kunna hjälpa till att identifiera eventuella systematiska fel eller bias i modellen, som kan korrigeras genom ytterligare förfining eller justering av simuleringsparametrarna. Genom att beräkna statistiska parametrar som medelvärde, standardavvikelse och konfidensintervall kan en bättre förståelse för simuleringsresultatens tillförlitlighet och noggrannhet fås.

# Litteraturförteckning

- [1] Wikipedia contributors, "Formula student — Wikipedia, the free encyclopedia," 2023. Hämtad 2023-03-21.
- [2] Daniel Olander, "Individual design report cfs22." opublicerad, 2022. [Hämtad 2023-04-27].
- [3] FIA, "2023 formula one sporting regulations." Tillgänglig: <https://www.fia.com/regulation/category/110>, 2023. [Online; hämtad 2023-02-24].
- [4] C. Cravero och D. Marsano, "Computational investigation of the aerodynamics of a wheel installed on a race car with a multi-element front wing," *Fluids*, vol. 7, nr. 6, 2022.
- [5] M. Basso, C. Cravero, och D. Marsano, "Aerodynamic effect of the gurney flap on the front wing of a f1 car and flow interactions with car components," *Energies*, vol. 14, nr. 8, 2021.
- [6] D. Martins, J. Correia, och A. Silva, "The influence of front wing pressure distribution on wheel wake aerodynamics of a f1 car," *Energies*, vol. 14, nr. 15, 2021.
- [7] I. Tolchinsky, T. Carrigan, och J. Dawson, "Cad-based optimization of a race car front wing," *SAE Technical Papers*, vol. 2020-April, nr. April, 2020.
- [8] F.-J. Granados-Ortiz, P. Morales-Higuera, och J. Ortega-Casanova, "3d cfd simulation of the interaction between front wheels & brake ducts and optimised five-element f1 race car front wings under regulations," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 69, ss. 677–698, 2023.
- [9] N. Daniel, "Science trends: the difference between laminar and turbulent flow." Tillgänglig: <https://sciencetrends.com/the-difference-between-laminar-and-turbulent-flow/>, 2020. Online; hämtad 2023-03-18.
- [10] W. Frank M., *Fluid Mechanics*. Mc-Graw Hill, 8. uppl., 2016.
- [11] C. Argyropoulos och N. Markatos, "Recent advances on the numerical model-

- ling of turbulent flows,” *Applied Mathematical Modelling*, vol. 39, nr. 2, ss. 693 – 732, 2015.
- [12] C. Argyropoulos och N. Markatos, ”Recent advances on the numerical modelling of turbulent flows,” *Applied Mathematical Modelling*, vol. 39, nr. 2, ss. 693 – 732, 2015.
- [13] OpenCFD, ”Openfoam: User guide version v2112.” Tillgänglig: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-fos-field-pressure.html>, 2019. Online; hämtad 2023-05-10.
- [14] A. Bouferrouk, ”On the applicability of trapped vortices to ground vehicles,” in *The International Vehicle Aerodynamics Conference*, ss. 101–111, Woodhead Publishing, 2014.
- [15] W. Zuo, ”Introduction of computational fluid dynamics,” *FAU Erlangen-Nürnberg, JASS*, vol. 5, 2005.
- [16] H. Wang, H. Wang, F. Gao, P. Zhou, och Z. J. Zhai, ”Literature review on pressure–velocity decoupling algorithms applied to built-environment cfd simulation,” *Building and Environment*, vol. 143, ss. 671–678, 2018.
- [17] Formula Student Germany, ”Formula Student Rules 2023.” Tillgänglig: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>, 2023. [Online; hämtad 2023-04-28].

**INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA**

Göteborg, Sverige  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



**CHALMERS**