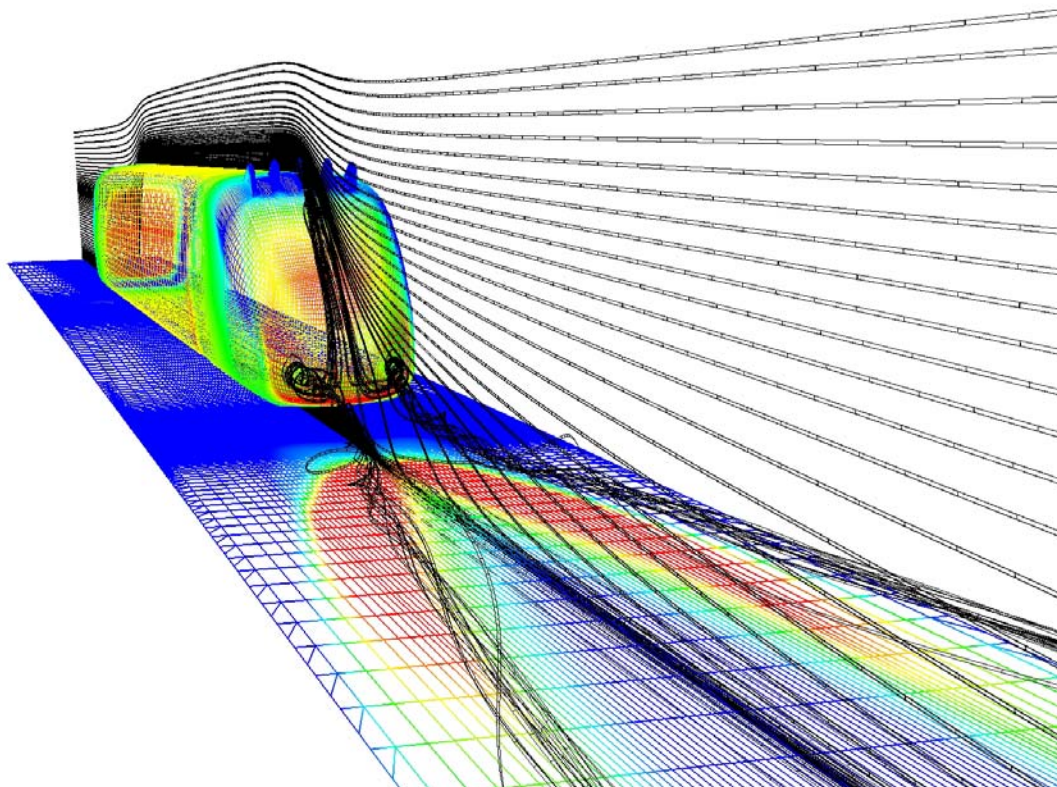


CHALMERS



Virvelgeneratorer till höghastighetståg -ett sätt att minska luftmotståndet

Kandidatarbete i Tillämpad mekanik

JOHAN GEORGII
OLA GUSTAFSON
EMMA JOELSSON
HELENA MARTINI
KRISTIAN NÄSHOLM
GABRIEL RINGIUS

Institutionen för Tillämpad mekanik
Avdelningen för Termo- och Fluidodynamik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2007
Kandidatarbete 2007:04

KANDIDATARBETE 2007:04

Virvelgeneratorer till höghastighetståg

-ett sätt att minska luftmotståndet

Kandidatarbete i Tillämpad mekanik

JOHAN GEORGII

OLA GUSTAFSON

EMMA JOELSSON

HELENA MARTINI

KRISTIAN NÄSHOLM

GABRIEL RINGIUS

Institutionen för Tillämpad mekanik
Avdelningen för Termo- och Fluidodynamik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2007

Virvelgeneratorer till höghastighetståg
-ett sätt att minska luftmotståndet
Kandidatarbete i Tillämpad mekanik

JOHAN GEORGII

OLA GUSTAFSON

EMMA JOELSSON

HELENA MARTINI

KRISTIAN NÄSHOLM

GABRIEL RINGIUS

© JOHAN GEORGII

OLA GUSTAFSON

EMMA JOELSSON

HELENA MARTINI

KRISTIAN NÄSHOLM

GABRIEL RINGIUS

2007

Kandidatarbete 2007:04

ISSN 1654-4676

Institutionen för Tillämpad mekanik

Avdelningen för Termo- och Fluidodynamik

Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg

Sverige

Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Omslag:

Strömning runt ett tåg med virvelgeneratorer

Tryckeri /Institutionen för Tillämpad mekanik
Göteborg, Sverige 2007

Förord

Detta kandidatarbete har utförts under våren 2007 som en obligatorisk del av civilingenjörsprogrammet i maskinteknik på Institutionen för Tillämpad Mekanik, Chalmers Tekniska Högskola. Vi vill tacka vår examinator Docent Siniša Krajnović och handledare Doktorand Hassan Hemida för stöd och uppbackning under arbetets gång.

Arbete av Docent Siniša Krajnović i det här projektet stöddes av Banverket och projektet Gröna Tåget. Beräkningar inom projektet har delvis gjorts på C3SE (Center for Scientific and Technical Computing at Chalmers). Vi vill även tacka Fluent Sweden AB för tillhandahållandet av licenser till programvaran Fluent som har använts i detta kandidatarbete.

För att få full förståelse för detta arbete, rekommenderas läsaren att ha studerat en grundkurs i strömningsmekanik.

Abstract

The present paper examines the possibility to reduce drag on a high speed train using vortex generators. The reason for conducting this study is that drag is accompanied by high energy costs for companies as well as individuals. High speed trains such as X2000 and the TGV have, despite their streamline shaped body, a relatively high drag. In order to manipulate the boundary layer, and thus reduce drag, vortex generators are placed on the rear surface of the roof of the train. These vortex generators create streamwise vortices downstream of the vortex generators. The vortices force the air in the upper part of the boundary layer to flow towards the train surface. This results in a delay of the flow separation and reduces the wake which in turn reduces drag.

Twelve different combinations of vortex generators with varying heights and angles of attack are tested and evaluated. A mesh is created in the mesh generation software ICEM-CFD for each of the twelve designs in order to enable computational experimentation (CFD). The calculations of the flow around the body of the train are conducted by using the CFD-software Fluent with a standard $k-\varepsilon$ turbulence model. By using Centered Composite Design and the results from the calculations a third order polynomial response surface model is constructed. The optimal design of a vortex generator is determined by finding the lowest value of C_D on the response surface.

It is shown that the application of vortex generators decreases drag and that the optimal height of the vortex generators is close to the height of the boundary layer. These results are in a good agreement with previous research in flow control around passenger cars. Finally there are some suggestions for further research in vortex generators.

Sammanfattning

Målet med detta arbete är att undersöka möjligheten att minska luftmotståndet på ett höghastighetståg med hjälp av så kallade virvelgeneratorer. Anledningen till att denna studie genomförs är att med luftmotstånd följer höga energikostnader, för företag likväl som den enskilde individen. Höghastighetståg som X2000 och TGV har trots sin strömlinjeformade karaktär ett relativt högt luftmotstånd. För att kunna manipulera fluidgränsskiktet och minska luftmotståndet, placeras virvelgeneratorer på taket bak på tåget. Dessa virvelgeneratorer skapar virvlar nedströms från virvelgeneratorerna. Virvlarna transporterar luft från övre delen av gränsskiktet ner mot tågytan. På så sätt fördröjs avlösningen och vaken minskas, vilket resulterar i ett sänkt luftmotstånd.

Tolv olika kombinationer av virvelgeneratorer med varierande höjder och attackvinklar testas och utvärderas. Ett beräkningsnät runt tågmodellen skapas i ICEM-CFD som är ett nätgenereringsprogram. Nät skapas för var och en av de tolv geometrierna för att möjliggöra numerisk beräkning av flödet (CFD). Beräkningar av flödet runt tågekroppen görs med hjälp av den kommersiella CFD-programvaran Fluent, med turbulensmodellen standard $k-\epsilon$. Genom att använda Centered Composite Design och resultaten från beräkningarna, kan en tredje ordningens responsyta konstrueras. Genom att identifiera det lägsta värdet på C_D på responsytan kan den optimala kombinationen av höjd och attackvinkel bestämmas.

Det visar sig att virvelgeneratorer på ett höghastighetståg kan minska luftmotståndet. Den optimala höjden på virvelgeneratorerna visar sig vara ungefär lika stor som höjden på fluidgränsskiktet, vilket överensstämmer med tidigare forskning inom området. Slutligen diskuteras några förslag på vidare forskning inom området virvelgeneratorer.

Nomenklatur

Latinska symboler

A_D	projicerad area i strömningsriktningen
A_L	projicerad area i vertikalled
C_D	motståndskoefficient
C_L	lyftkoefficient
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$	konstanter
C_μ	konstant
F_D	motståndskraft
F_L	lyftkraft
G_k, G_b	generering av turbulent kinetisk energi
l_t	turbulent längdskala
k	turbulent kinetisk energi
p	tryck
\bar{p}	tidsmedelvärde av tryck
p'	fluktuerande del av tryck
Re	Reynoldstal
S_k, S_ε	användardefinierade termer för egna modeller
u	hastighet i x-riktning
u^*	friktionshastighet
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	tidsmedelvärde av hastighet i x-, y- och z-riktning
u', v', w'	fluktuerande del av hastighet i x-, y- och z-riktning
$\overline{u'_i u'_j}$	Reynoldsspänningar
U	fluidhastighet
U_t	turbulent hastighetsskala
v	hastighet i y-riktning
w	hastighet i z-riktning
y^+	dimensionslöst väggavstånd
\hat{y}	ersättningsmodell
Y_M	dissipation vid kompressibelt flöde

Grekiska symboler

δ	gränsskiktstjocklek
ε	dissipationshastighet
ε_f	summan av numeriskt fel och modelleringsfel
μ	dynamisk viskositet
μ_t	turbulent viskositet
ν	kinematisk viskositet
ρ	densitet
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	turbulenta Prandtl-tal

τ_w	väggskjuvspänning
T	turbulent tidsskala
ω	dissipationshastighet

Innehållsförteckning

1. Inledning.....	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Syfte och problemformulering.....	1
1.3 Avgränsningar.....	2
1.4 Metod.....	2
1.5 Flödeskontroll.....	3
1.6 Virvelgeneratorer.....	4
1.7 Referensmodell.....	4
2. Teori.....	6
2.1 Ekvationer som beskriver fluidrörelser.....	6
2.1.1 Tidsmedelvärdering.....	6
2.1.2 Turbulensmodellering.....	7
2.2 Fluidgränsskikt.....	8
2.2.1 Separation.....	9
2.2.2 Krafter på en omströmmad kropp.....	9
2.3 Det dimensionslösa väggavståndet, y^+	10
2.4 Motstånds- och lyftkoefficienterna, C_D och C_L	11
2.4.1 Motståndskoefficienten, C_D	11
2.4.2 Lyftkoefficienten, C_L	12
2.5 Programvaran ICEM-CFD.....	12
2.6 Programvaran Fluent.....	13
2.6.1 k - ϵ -modellen i Fluent.....	13
2.6.2 Väggfunktioner.....	14
2.6.3 Randvillkor.....	15
2.6.4 Lösningsprocess.....	15
2.7 Optimering.....	15
2.7.1 Ersättningsmodellering.....	15
2.7.2 Design of experiments (DOE).....	16
2.7.3 Konstruktion av ersättningsmodell.....	16
2.8 Programvaran Ensign.....	18
3. Genomförande.....	19
3.1 Virvelgeneratorer.....	19
3.2 Beräkningsnät.....	20
3.2.1 Topologi.....	22
3.3 Simulering.....	25
3.4 Sökande efter optimal virvelgenerator.....	26
4. Resultat.....	32
4.1 Referensmodell.....	32
4.2 Modell med virvelgeneratorer.....	32
4.3 Den optimala virvelgeneratorn.....	35
5. Diskussion.....	37
5.1 Förändringar hos fluidgränsskiktet.....	37
5.2 Reflektioner.....	39
Referenser.....	41
Litteratur.....	41
Artiklar.....	41
Internetadresser.....	41
Bilder.....	42
Filförteckning.....	43

1. Inledning

1.1 Bakgrund

I den pågående klimatdebatten är en av de stora frågorna hur man ska minska de stora miljöpåverkande utsläppen inom transportsektorn. Mycket fokus läggs på drivkällan men vad som ofta glöms bort är att andra faktorer kan påverka energiförbrukningen. Genom att förbättra de aerodynamiska egenskaperna som påverkar luftmotståndet, kan stora ekonomiska samt miljömässiga besparingar göras (Hadenius, 2003).

Den viktigaste orsaken till luftmotstånd hos de flesta fordon är att luftströmmar kring dessa separerar från ytan nära bakre delen. En så kallad vak bildas, en region med recirkulerande strömning. Vaken är ett område med mycket låga tryck. Tillsammans med ett högt tryck fram skapas en kraft som bromsar kroppen. Detta bidrar till luftmotstånd (White, 2005). För långa fordon som tåg, är det dock friktionskrafterna som ger upphov till det största bidraget.

Ett sätt att minska luftmotståndet hos ett fordon är att kontrollera flödet med hjälp av så kallade virvelgeneratorer. Detta kallas passiv flödeskontroll (eng. passive flow-control). Virvelgeneratorer är föremål vilka fästs på fordonets yta och bidrar till att skapa virvlar i luftströmmarnas huvudriktning. Virvlarna påverkar luftströmningsområdet närmast fordonets yta och tvingar luften att följa ytan. Virvelgeneratorerna förskjuter separationen och minskar vaken bakom fordonet. Därmed blir luftmotståndet lägre. Det är dock fortfarande oklart vilken som är den bästa formen för virvelgeneratorer och hur de skall placeras på fordonets yta för att minimera luftmotståndet (Koike, Nagayoshi, Hamamoto, 2004).

Virvelgeneratorer har tidigare använts i huvudsak till flygplansapplikationer. Det är därför inom denna gren som huvuddelen av forskningen varit fokuserad. Viss forskning har dock utförts för tillämpning på personbilar. Resultaten från denna forskning visar att virvelgeneratorer ger bäst effekt om de har samma höjd som fluidgränsskiktet (Koike et al, 2004). Sett ur strömningsdynamisk synvinkel är den stora skillnaden mellan en personbil och ett tåg tjockleken på fluidgränsskiktet. Gränsskiktet vid den bakre delen av ett tåg är betydligt tjockare än på taket hos en personbil. Skillnaden beror på längddifferensen mellan fordonen samt deras olika färdhastigheter. Frågan är om det tjocka gränsskiktet hos ett tåg kan manipuleras på samma sätt som ett tunnare.

1.2 Syfte och problemformulering

Ett stort problem med dagens höghastighetståg är att flödet runt dess kropp inte är optimalt, trots att de till hög grad är strömlinjeformade. Detta resulterar i ett alltför högt luftmotstånd.

Målet med kandidatarbetet är att minska luftmotståndet hos ett tåg genom att finna en bra form på virvelgeneratorer. Virvelgeneratorerna placeras på tågets yta och genererar virvlar vilket resulterar i att luftlagret närmast ytan tillförs energi. Därmed får detta luftlager kraft att följa ytan längre. Separationen fördröjs och vakens storlek minskas. Skälet till att man vill sänka luftmotståndet är att kunna minska energiförbrukningen.

Formen på virvelgeneratorerna är en viktig faktor eftersom den i hög grad påverkar vakens storlek och separationspunkt. Virvelgeneratorerna som appliceras kommer i sig att generera ett luftmotstånd. Den faktiska effekten av virvelgeneratorerna blir därmed skillnaden mellan

de positiva och negativa effekterna. De positiva kommer av att separationen fördröjs och de negativa av virvelgeneratorns egna luftmotstånd (Koike et al, 2004).

Kandidatarbetet ska besvara följande frågor, med syftet att minska luftmotståndet hos ett höghastighetståg:

- Är det möjligt att minska luftmotståndet med hjälp av virvelgeneratorer?
- Ifall virvelgeneratorerna minskar luftmotståndet, vilken kombination av höjd och attackvinkel på virvelgeneratorerna är optimal? Attackvinkeln är den vinkel som spetsen på virvelgeneratorn har, dvs. den vinkel som skapas mellan främre ytan på virvelgeneratorn och tågets yta.
- Kan luftmotståndet minskas utan att öka lyftkraften?

1.3 Avgränsningar

Studien genomförs med följande restriktioner. Tågets grundgeometri kommer vara densamma vid samtliga beräkningar. Geometrin är slät och saknar hjul, fönster och andra detaljer. Det tas inte heller hänsyn till tåg av annan längd än referensmodellens. Vidare är en förutsättning att tåget enbart färdas i en riktning med en hastighet av 200km/h.

Antal virvelgeneratorer, deras placering och hur dessa parametrar påverkar luftmotståndet kommer inte att utvärderas utan väljs i enlighet med tidigare forskning av Koike et al (2004).

Det tas inte hänsyn till eventuell instabilitet hos tåget som uppstår som följd av applicering av virvelgeneratorer, ej heller eventuella förändringar i ljudnivå.

Den estetiska aspekten läggs ingen vikt vid eftersom det inte anses vara det väsentliga i uppgiften. Huruvida tågets utseende efter applicering av virvelgeneratorer kommer att vara tilltalande eller inte lämnas därhän.

1.4 Metod

För att bestämma vilken form av virvelgeneratorer som är mest gynnsam utvärderas flertalet olika former. Strömningen runt en kropp och de krafter som påverkar denna brukar bestämmas genom vindtunnelförsök eller numeriska datorsimuleringar. I kandidatarbetet analyseras virvelgeneratorerna med hjälp av datorsimuleringar då det i detta fall är mindre komplicerat att realisera än genom vindtunnelförsök. Generellt sett blir det mer kostnads- och tidseffektivt med datorsimuleringar. Fördelen är att en modell eller vindtunnel fysiskt inte behöver konstrueras vid en datorsimulering. Det är även lättare att avläsa krafter och visualisera resultat.

För datorsimuleringarna används CFD-programvaran (eng. Computational Fluid Dynamics) Fluent. Beräkningsnät skapas med programmet ICEM-CFD och resultat visualiseras med hjälp av programmet Ensign. För att få en utgångspunkt beräknas luftmotståndet hos en referensmodell. Referensmodellen är ett höghastighetståg som finns på marknaden idag.

I ICEM-CFD utformas de virvelgeneratorer som ska fästas på tågytan. Därefter skapas ett beräkningsnät runt tåget med virvelgeneratorer. Beräkningsnätet exporteras till Fluent, där flödet runt tåget simuleras. Efter beräkningarna analyseras och utvärderas resultaten genom visualisering i Ensign. Resultaten som erhålls vid simulering på geometrierna med

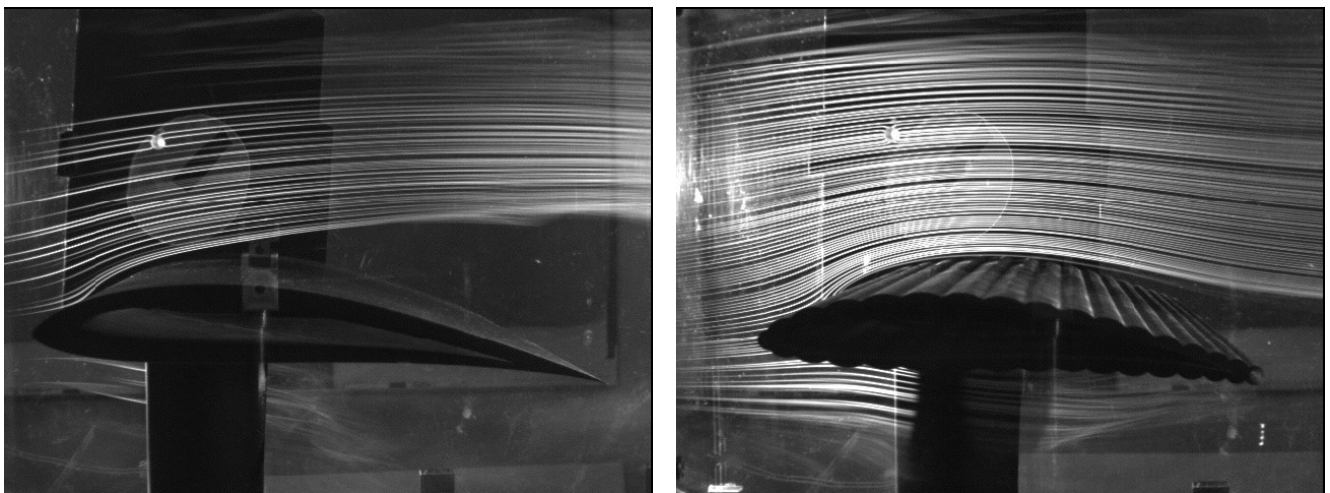
virvelgeneratorer jämförs med resultaten från referensmodellen. En ersättningsmodell som representerar resultaten från simuleringen skapas. Modellen används för att hitta den form på virvelgeneratorerna som minimerar tågets luftmotstånd.

1.5 Flödeskontroll

Instabila flöden uppkommer i diverse applikationer såsom motorinsug, bilar, flygplan och marina fordon. Genom att kontrollera flödena kan applikationernas effektivitet och prestanda ökas markant. Detta kallas för flödeskontroll (eng. flow control). Beroende på önskat resultat kan transition mellan laminärt och turbulent flöde behöva provoceras fram eller fördröjas. Samma sak gäller för separation. Förändringarna kan innebära ändringar i till exempel lyftkraft, luftmotstånd och ljudbild.

Ett flöde kan manipuleras på flera olika sätt. Metoderna brukar delas in i två grupper, passiv och aktiv flödeskontroll. Passiv flödeskontroll innebär generellt att ett statiskt arrangemang såsom virvelgeneratorer eller grader (eng. step) används. Luftstötter eller elektricitet som påverkar flödet är däremot exempel på aktiv flödeskontroll. Genom att rikta luftstötter mot områden där separation sker tillförs energi till flödet. På så sätt förskjuts separationen och luftmotståndet kan minskas.

Storskaliga ojämnheter som införs på ytan av en flygplansvinge är ett exempel på passiv flödeskontroll. Ojämnheterna stör luftströmmarna i närheten av ytan och får på så vis flödet att följa vingen längre nedströms. Figur 1.5.1 visar tydligt att flödet separerar senare hos en ojämn vinge. (Santhanakrishnan, Jacob)

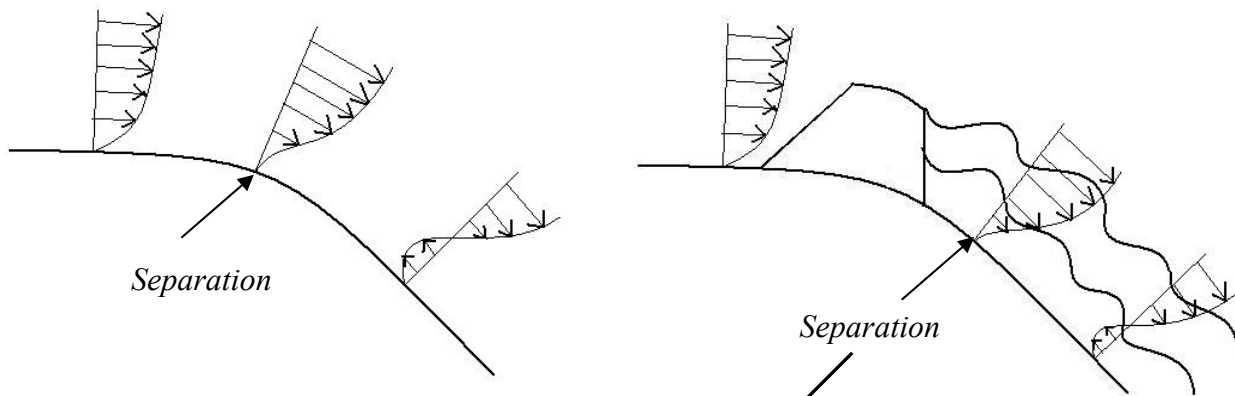


Figur 1.5.1 Visualisering av separation hos flygplansvingar. Notera den försenade separationen hos vingen med ojämnheter i den högra bilden. (bilder från Santhanakrishnan A - Jamey D. Jacob, Effect of Regular Surface Perturbations on Flow Over an Airfoil, Dept. of Mechanical Engineering, University of Kentucky, Lexington, KY 40506)

Passiv flödeskontroll är vanligtvis billigast. Aktiv flödeskontroll som generellt är mer komplex har istället större potential till att öka effektiviteten hos applikationen.

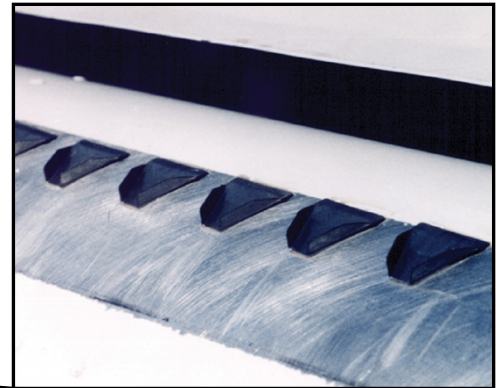
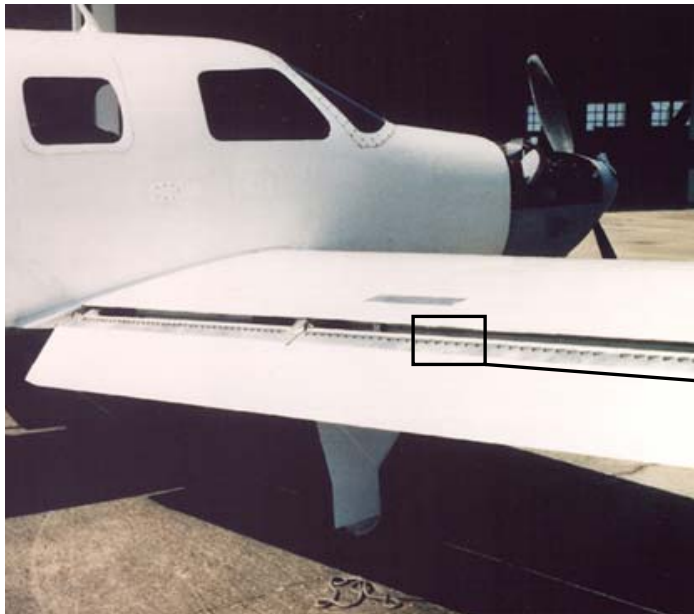
1.6 Virvelgeneratorer

En virvelgenerator är en kropp som påverkar strömningen runt ett föremål. Virvelgeneratoren interagerar med luftflödet och förändrar fluidgränsskiktet. Energin omdistribueras av de virvlar som virvelgeneratorerna skapar. Energirik luft från de övre delarna av gränsskiktet blandas med det betydligt energifattigare luftlagret närmast ytan. Luften blir därmed mer motståndskraftig mot separation och separationen förskjuts nedströms. Figur 1.6.1 visar schematiskt hur virvelgeneratorer kan fördröja separationen.



Figur 1.6.1 Separation förskjuts nedströms när virvelgeneratorer appliceras.

Virvelgeneratorer har länge används i flygplansapplikationer. Fördröjd separation på en flygplansvinge kan möjliggöra större klaffvinklar. Detta ger potential till ökad lyftkraft vilket ökar flygplanets manövrerbarhet vid landning. För att minska luftmotståndet under färd används så kallade mikrovirvelgeneratorer, se figur 1.6.2. Dessa generatorer förskjuter inte separationen i samma utsträckning som större virvelgeneratorer men bidrar istället med ett mindre eget luftmotstånd. (Gail S. Langevin)



Figur 1.6.2 Mikrovirvelgeneratorer på en flygplansvinge.

(Bild från http://oea.larc.nasa.gov/PAIS/Concept2Reality/flow_control.html, Gail S. Langevin, Langley Research and Development Centre, NASA Official)

1.7 Referensmodell

Referensmodellen som används är en förenklad modell av det tyska höghastighetståget InterCityExpress2, förkortat ICE2. Geometrin är av strömlinjeformad karaktär, liknande den franska motsvarigheten TGV (Train à Grande Vitesse) och det svenska X2000 (Bombardier,

2007). Formen på tågets bakre del är konstruerad för att förskjuta separation vid höga hastigheter. Den oregelbundna geometrin på undersidan, exempelvis hjulen med upphängningar, är borttagna för att förenkla både geometri och beräkningar. Fönster och dörrar har tagits bort av samma skäl. Den kvarvarande geometrin är således helt slät, se figur 1.5.1.



Figur 1.5.1 Tåggeometri utan hjul, dörrar och fönster sedd från sidan.

Tåggeometrin som används i detta arbete är 35,5 m lång, 3 m bred och 3,6 m hög. Beräkningar är baserade på hastigheten 200 km/h. Hastigheten anses vara normal för befintliga höghastighetståg i reguljär drift.



Figur 1.5.2 Referensmodellen sedd snett framifrån. Notera midjan till höger i bild.

Referensmodellens midja som visas i figur 1.5.2 motsvarar kopplingen mellan två vagnar. Istället för att först ha frontvagnen på tåget och sedan lägga till flertalet vagnar, har detta projekt enbart använt en vagn för att erhålla en kortare geometri. Följaktligen krävs ett mindre antal beräkningsceller. Då beräkningar på ett komplett tåg är av intresse, används nospartiet på en sista vagn till den bakre delen av geometrin. På så sätt hålls längden hos modellen nere. Resultatet är en symmetrisk geometri med en enda avvikelse i form av den nämnda midjan.

2. Teori

Följande avsnitt presenterar och förklarar teorin som beskriver luftströmmarna runt en kropp. Samtidigt beskrivs de verktyg som används för att bestämma hur virvelgeneratorerna påverkar luftmotståndet hos ett tåg.

2.1 Ekvationer som beskriver fluidrörelser

Alla fluidrörelser kan beskrivas med kontinuitetsekvationen tillsammans med Navier-Stokes ekvationer (Svenningsson, 2003). Kontinuitetsekvationen 2.1.1 visar att massan konserveras i en infinitesimal kontrollvolym (White, 2005).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1.1)$$

Navier-Stokes ekvationer i x-, y- och z-led beskrivs nedan av ekvationerna 2.1.2-4. Fluiden antas vara en inkompressibel Newtonsk fluid, vilket betyder att fluidens densitet är oberoende av trycket samt att dess viskositet endast varierar med temperatur och tryck (White, 2005).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.1.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dy} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.1.3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (2.1.4)$$

Ekvation 2.1.1-4 bildar ett ekvationssystem innehållande fyra okända variabler. Systemet kan lösas utan modellering då en komplett uppsättning av randvillkor finns tillgänglig. Dock innehåller turbulenta flöden turbulensstrukturer, virvlar, som täcker hela storleksspektrumet från minimala virvlar till strukturer i samma storleksordning som beräkningsdomänen. En numerisk simulering som löser upp variationen av turbulensstrukturer kräver enorma mängder datorkapacitet och kommer därför inte vara praktisk möjlig för industriella syften inom överskådlig framtid (Svenningsson, 2003).

2.1.1 Tidsmedelvärdering

I de flesta applikationer är turbulensens instantana fluktuationer inte intressanta i sig. Däremot är fluktuationernas effekt på medelflödets egenskaper av stor betydelse då de i högsta grad påverkar företeelser såsom luftmotstånd. Detta tillåter beräkningar där hänsyn till de turbulenta fluktuationerna tas genom statistiska metoder. Fluktuationerna representeras därmed av tidsmedelvärderade kvantiteter vilkas påverkan av huvudflödet uppskattas och beräknas utan att de minsta turbulensskalorna behöver lösas upp. På så sätt möjliggörs numerisk simulering som designverktyg inom industrin, trots de nackdelar som presenterats i föregående avsnitt (Svenningsson, 2003).

Hastighets- och trycktermerna delas upp i ett medelvärde och en fluktuerande del enligt ekvationerna 2.1.5-8 (White, 2005).

$$u = \bar{u} + u' \quad (2.1.5)$$

$$v = \bar{v} + v' \quad (2.1.6)$$

$$w = \bar{w} + w' \quad (2.1.7)$$

$$p = \bar{p} + p' \quad (2.1.8)$$

Termerna sätts in i Navier-Stokes ekvationer, ekvation 2.1.2-4 och i kontinuitetsekvationen, ekvation 2.1.1 vilka sedan tidsmedelvärderas. Då erhålls de så kallade tidsmedelvärderade Navier-Stokes ekvationer, ekvation 2.1.9-11 och tidsmedelvärderade kontinuitetsekvationen, ekvation 2.1.12 (White, 2005).

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\bar{p}}{dx} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial}{\partial x} \overline{u'u'} + \frac{\partial}{\partial y} \overline{u'v'} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{u'w'} \right) \quad (2.1.9)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\bar{p}}{dy} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial}{\partial x} \overline{v'u'} + \frac{\partial}{\partial y} \overline{v'v'} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{v'w'} \right) \quad (2.1.10)$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\bar{p}}{dz} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} \right) - \left(\frac{\partial}{\partial x} \overline{w'u'} + \frac{\partial}{\partial y} \overline{w'v'} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{w'w'} \right) \quad (2.1.11)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (2.1.12)$$

Denna procedur resulterar i att effekterna av turbulensens instantana fluktuationer representeras av tilläggstermerna i slutet av ekvationerna 2.1.9-11. Termerna vilka kallas Reynolds-spänningar är de okända statistiska termerna som nämnts ovan. Tidsmedelvärderingen genererar, eftersom de är symmetriska, sex Reynolds-spänningar. De måste relateras till andra kända variabler för att erhålla ett slutet ekvationssystem. Modellering av Reynolds-spänningar har varit ett av de största forskningsområdena inom CFD (Computational Fluid Dynamics) de senaste trettio åren (Svenningsson, 2003).

2.1.2 Turbulensmodellering

Den totala spänningen är summan av de viskösa skjuvspänningarna och Reynoldsspänningen. Reynoldsspänningen kallas för den turbulenta spänningen. En tvådimensionell spänningsterm i x-led kan studeras utifrån ekvation 2.1.13 (White, 2005).

$$\tau_{tot_x} = \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \overline{u'v'} \quad (2.1.13)$$

Genom att lägga till ytterligare en viskös term, en turbulent viskositet, kan turbulensen modelleras. Ekvation 2.1.13 skrivs om till ekvationerna 2.1.14-15 (White, 2005):

$$\tau_{tot_x} = (\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (2.1.14)$$

där

$$\mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = -\rho \overline{u'v'} \quad (2.1.15)$$

Ekvation 2.1.15 kallas Boussinesqs approximation. Den turbulenta viskositeten μ_t beror på flödet, till skillnad från den laminära μ och kan beskrivas av en turbulent längd- och hastighetsskala enligt ekvation 2.1.16 (White, 2005).

$$\mu_t \propto \rho U_t l_t \quad (2.1.16)$$

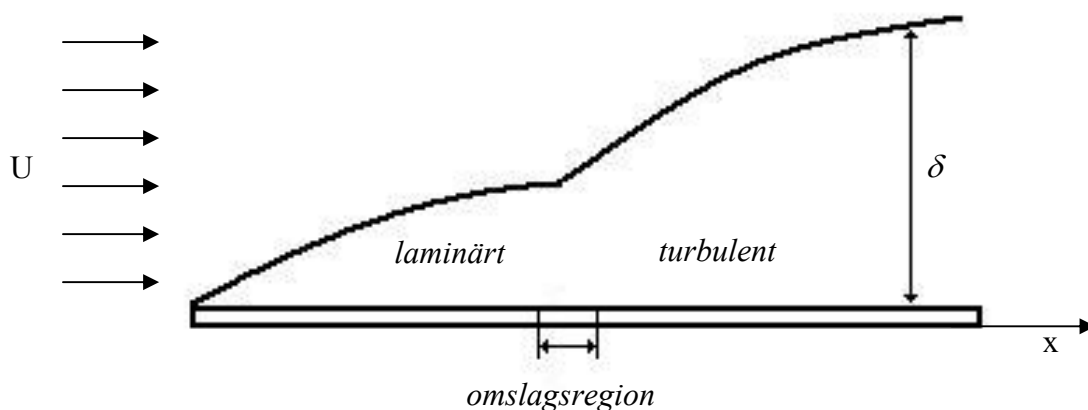
Turbulensmodeller använder olika metoder för att bestämma längd- och hastighetsskalan. Beroende på flödets karaktär väljs lämplig turbulensmodell.

2.2 Fluidgränsskikt

När en fluid strömmar längs en kropp byggs ett hastighetsgränsskikt upp. Fluiden som är i direkt kontakt med väggen står helt stilla, och bromsar upp fluidskiktet närmast väggen på grund av viskösa krafter. Gränsskiktstjockleken δ definieras så att ekvation 2.2.1 gäller (White, 2005).

$$u(\delta) = 0.99U \quad (2.2.1)$$

där U är friströmshastigheten.



Figur 2.2.1 Gränsskikt för en omströmd plan platta. (Egen bild, fritt från White, 2005)

Omslag mellan laminärt och turbulent gränsskikt sker vid det kritiska Reynoldstalet, se ekvation 2.2.2. Gränsskiktets tillväxt och omslag visas i figur 2.2.1.

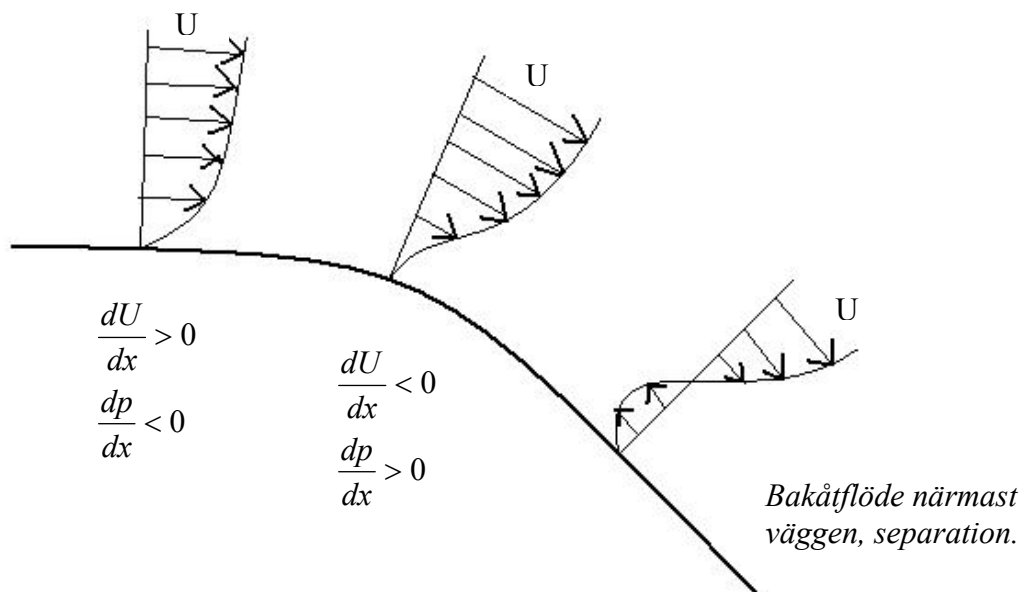
$$Re_{x,kr} = \frac{Ux}{\nu} \approx 5 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6 \quad (2.2.2)$$

Gränsskiktstjockleken varierar enligt ekvation 2.2.3 (White, 2005).

$$\frac{\delta}{x} = \begin{cases} \frac{5.0}{Re_x^{1/2}} & \text{Laminärt gränsskikt} \\ \frac{0.16}{Re_x^{1/7}} & \text{Turbulent gränsskikt} \end{cases} \quad (2.2.3)$$

2.2.1 Separation

En fluid som strömmar längs en kropp i riktning med positiv tryckgradient förlorar energi närmast väggen. Fluiden bromsas upp av de viskösa krafter som uppkommer närmast väggen. När de bromsande krafterna överstiger kraften som för fluiden framåt sker separation. Detta leder till att fluiden närmast kroppen rör sig i motsatt riktning jämfört med huvudflödet och områden med cirkulerande flöden uppkommer. Se figur 2.2.2 (White, 2005).



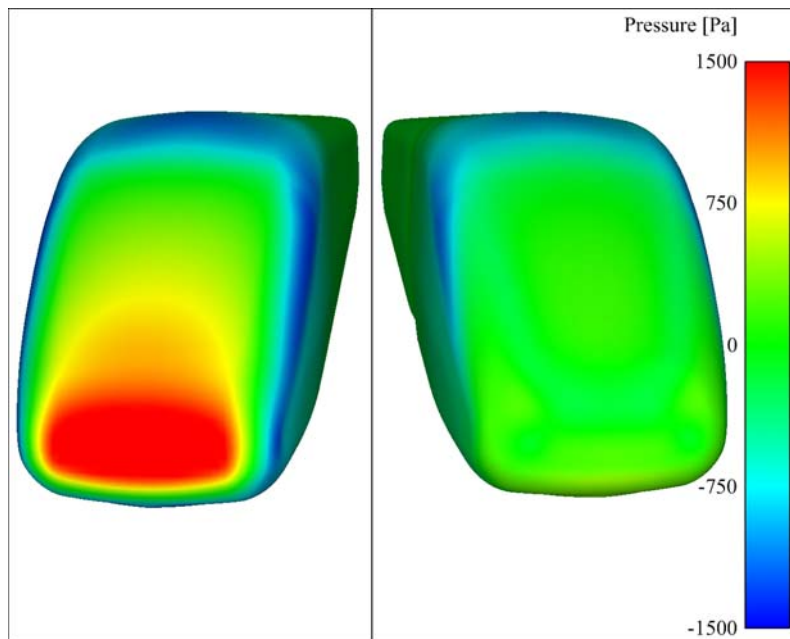
Figur 2.2.2 Hastighetsprofil hos en fluid som rör sig i riktning med positiv tryckgradient. (Egen bild, fritt från Koike et al, 2005)

Separation vid bakre änden av en kropp genererar ett område med recirkulerande strömmar, en så kallad vak. Vaken är ett område med mycket låga tryck vilket, tillsammans med det höga trycket fram, skapar en bromsande kraft på kroppen, luftmotstånd.

2.2.2 Krafter på en omströmmad kropp

En kropp som omströmmas av en fluid utsätts för en kraft som består av en skjuvkraft samt en tryckkraft. Fluidens viskositet åstadkommer en bromsande skjuvkraft som verkar på kroppens

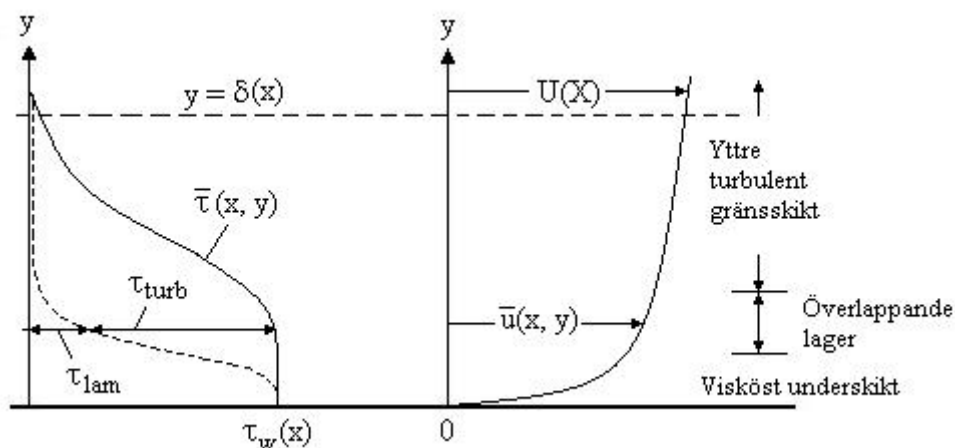
hela yta. Tryckkraften uppkommer på grund av tryckskillnader runt kroppen, se figur 2.2.3. Beroende på kroppens längd och frontarea så bidrar de båda krafterna olika mycket.



Figur 2.2.3 Tryck på front respektive bakdel hos ett tåg.

2.3 Det dimensionslösa väggavståndet, y^+

En turbulent hastighetsprofil kan delas in i tre olika regioner: viskösa underskiktet, överlappande lagret och yttre turbulenta gränsskiktet. Dessa presenteras i figur 2.3.1. I det viskösa underskiktet dominerar viskösa spänningar. I det yttre turbulenta gränsskiktet dominerar turbulenta spänningar. I det överlappande lagret är båda spänningarna viktiga. Därmed beskrivs hastighetsprofilen på olika sätt i de olika regionerna (White, 2005).



Figur 2.3.1 Till vänster visas typisk skjuvspänningsfördelning i turbulent flöde nära en vägg. Till höger visas hastighetsfördelningen. (Egen bild, fritt efter White, 2005)

Regionernas utsträckning definieras av y^+ vilket är det dimensionslösa avståndet till väggen i ett fluidgränsskikt. I det viskösa underskiktet där y^+ antar ett värde mellan 0 och 5 beskrivs hastighetsprofilen i dimensionslös form enligt ekvation 2.3.1 (White, 2005).

$$\frac{\bar{u}}{u^*} = \frac{yu^*}{\nu} = y^+ \quad (2.3.1)$$

där u^* definieras enligt ekvation 2.3.2 (White, 2005).

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2.3.2)$$

I det överlappande lagret gäller log-lagen, ekvation 2.3.3. Regionen definieras av ett y^+ mellan 30 och ca 100 (White, 2005).

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{yu^*}{\nu} + B \quad (2.3.3)$$

där de dimensionslösa konstanterna κ och B approximativt är 0,41 respektive 5,0 (White, 2005).

Buffertzonen är regionen mellan det viskösa underskiktet och det överlappande lagret. y^+ ligger därmed mellan 5 och 30. Här är det oklart vilken av ekvationerna 2.3.1 eller 2.3.3 som bäst beskriver hastighetsprofilen (White, 2005). För att bestämma vilken av ekvationerna som bäst beskriver strömningen utförs beräkningar enligt båda ekvationerna. Därefter undersöks Reynoldstalen för de båda fallen och den bäst lämpade ekvationen väljs.

2.4 Motstånds- och lyftkoefficienterna, C_D och C_L

Inom fluiddynamik är det av intresse att analysera värden på motstånds- och lyftkraften hos kroppen som studeras. Vid karakterisering av dessa krafter används två koefficienter som presenteras nedan. De kallas motstånds- respektive lyftkoefficienten (White, 2005).

2.4.1 Motståndskoefficienten, C_D

Motståndskoefficienten, C_D , är en dimensionslös kvantitet som beskriver den karakteristiska mängden av aerodynamiskt motstånd som orsakas av fluidens flöde. Motståndskraften på en komplex kropp kan approximeras med summan av motståndskrafterna på dess olika delar (Munson, Young, Okiishi, 1998).

Nettomotståndet uppkommer av tryck- och skjuvspänningseffekter. Ofta betraktas dessa två effekter tillsammans och en generell motståndskoefficient, C_D , används. Den beskrivs nedan av ekvation 2.4.1 (Munson et al, 1998).

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A_D} \quad (2.4.1)$$

där A_D är den projicerade frontarean [m^2]. Ju mer strömlinjeformad en kropp är, desto lägre värde på C_D . (White, 2005). För att bestämma kraften F_D behövs både tryck och väggskjuvspänning runt hela kroppen enligt avsnitt 2.2.2.

För strömlinjeformade kroppar ökar motståndskoefficienten då gränsskiktet övergår från laminärt till turbulent. Merparten av motståndskraften beror av skjuvkrafter. Dessa krafter är större för turbulenta flöden än för laminära. Motståndskoefficienten minskar dock när gränsskiktet blir turbulent för ett relativt trubbigt objekt, som en cylinder eller en sfär (Munson et al, 1998). Detta beror på att separationen förskjuts vilket medför att vaken minskar. Detta leder i sin tur till att tryckskillnaderna mellan fram- och baksida av kroppen blir mindre (White, 2005), se även avsnitt 2.2.1-2.

2.4.2 Lyftkoefficienten, C_L

Lyftkoefficienten, C_L , är en dimensionslös form av lyftkraften, och definieras av ekvation 2.4.2 nedan (Munson et al, 1998).

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho U^2 A_L} \quad (2.4.2)$$

där A_L är den projicerade bottenarean [m^2]. För att bestämma kraften F_L behövs både tryck och väggskjuvspänning runt hela kroppen enligt avsnitt 2.2.2.

2.5 Programvaran ICEM-CFD

ICEM-CFD är en kommersiell programvara där ett tredimensionellt beräkningsnät skapas. En beräkningsdomän är uppdelad i ett flertal celler. Visuellt kan detta liknas vid ett nät, därav benämningen beräkningsnät. Programmet kan användas till att skapa beräkningsnät för alla typer av geometrier. Programmet är kompatibelt med de flesta numeriska lösare (Ansys ICEM-CFD, 2007). Cellerna kan användas för att beräkna strömning enligt finit volymmetod (Versteeg, Malalasekera, 1995). ICEM-CFD används för att skapa en beräkningsdomän i form av till exempel en vindtunnel. Inuti domänen placeras de kroppar som kan påverka strömningen genom tunneln.

Block delar upp beräkningsdomänen. Dessa tilldelas egenskaper, solida block eller fluidblock. I ICEM-CFD skapas nät oberoende av undersökt kropps geometri. Blockens kanter och sidor associeras till den undersökta geometrin för att sedan projiceras på denna. Blocken behöver således inte vara direkt geometrianpassade för att skapa ett nät som beskriver rätt kroppar (Ansys ICEM-CFD, 2007).

I ICEM-CFD kan cellfördelningen i domänen styras. Genom att styra nodfördelningen utmed blockens kanter kan upplösningen varieras. Ett bra beräkningsnät har högre upplösning nära studerad kropp och lägre längre ut i domänen. Strömningen i domänen påverkas mycket runt aktuell geometri. Längre ut i domänen är strömningen mindre intressant för undersökningen och upplösningen tillåts vara lägre.

Ett bra nät möjliggör beräkningar i en numerisk lösare som exempelvis Fluent. I ett bra nät har cellerna i nätet positiv volym. Inverterade celler med negativ volym ger ett missvisande resultat, alternativt klarar lösningsprogrammet inte att utföra beräkningarna. I ICEM-CFD används en $3 \times 3 \times 3$ -determinant för att uppskatta nätets kvalitet. $3 \times 3 \times 3$ -determinanten undersöker cellers deformation. Jacobianen för varje hexaeder beräknas och dess determinant skalas så att värdet ett innebär helt odeformerade celler. Värdet noll innebär att cellen är

deformerad i ett eller flera hörn och negativa värden indikerar inverterade celler (Ansys ICEM-CFD, 2004).

2.6 Programvaran Fluent

Fluent är en CFD-mjukvara som används för en rad olika applikationer inom till exempel värmeöverföring och fluidströmning. Fluent används som ett simuleringsverktyg som iterativt bestämmer till exempel tryck- och hastighetsfält i en strömningsapplikation. Programmet löser de ekvationer som beskrivs i avsnitt 2.1.1-2. Inom fluidströmning kan Fluent använda ett antal olika turbulensmodeller, bland andra $k-\varepsilon$, $k-\omega$ och LES (Large Eddy Simulation). Den sistnämnda är en tidsberoende transient modell och är därför inte tidsmedelvärderad som de två tidigare. Den mest frekvent använda turbulensmodellen vid icke-roterande fluidströmning är $k-\varepsilon$.

2.6.1 $k-\varepsilon$ -modellen i Fluent

Turbulensmodellen $k-\varepsilon$, även kallad eddyviskositetsmodellen, är framtagen på ett halvempiriskt sätt. För att modellera hastighets- och längdskalorna i ekvation 2.1.16 ansätts k och ε till turbulent kinetisk energi respektive dess dissipationshastighet. Standard $k-\varepsilon$ -modellen är en av tre $k-\varepsilon$ -modeller. De andra två är RNG $k-\varepsilon$ (Renormalization Group) som är en snarlik modell av standard $k-\varepsilon$, samt Realizable $k-\varepsilon$. Den sistnämnda modellen är en relativt nyutvecklad version som skiljer sig genom en annan formulering av turbulensviskositeten, μ_t , samt av transportekvationen för ε (Fluent, 2007).

För att hitta k används transportekvationen 2.6.1 som i Fluent ser ut enligt följande.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.6.1)$$

Termerna G_b och Y_M tar hänsyn till kompressibelt flöde, vilka försummas vid underljudsströmning. På samma vis används en transportekvation för ε som i Fluent är uppställd till ekvation 2.6.2 (Fluent, 2007).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.6.2)$$

I Fluent är ekvationerna angivna på sin mest generella form. Användaren har möjlighet att skapa en egen turbulensmodell genom termerna S_k och S_ε . För att modellera generering av turbulent kinetisk energi används G_b och G_k .

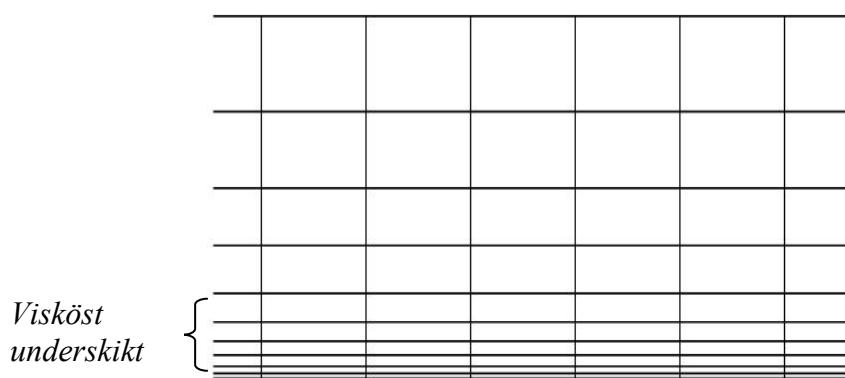
k och ε modellerar hastighetsskalan U_t och längdskalan l_t i ekvationen för turbulent viskositet 2.1.16. Modelleringen sker enligt ekvation 2.6.3.

Denna ekvation i sin generella form står därför att jämföras mot $k - \varepsilon$ -ekvationen för turbulent viskositet, ekvation 2.6.3 (Fluent, 2007).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.6.3)$$

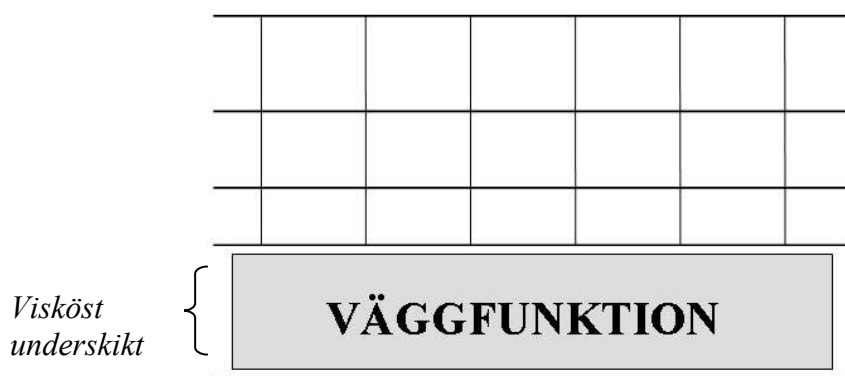
2.6.2 Väggfunktioner

I Fluent finns det i huvudsak två olika tillvägagångssätt för att simulera strömningen i det viskösa underskiktet, se avsnitt 2.3. Ett sätt är att lösa upp det viskösa underskiktet genom att ha en hög upplösning på beräkningsnätet precis vid ytan, se figur 2.6.1. Detta möjliggör beräkning av strömningen med hjälp av turbulensmodeller hela vägen till ytan. På så sätt tas det hänsyn till strömningen nära ytan där låga Reynoldstal förekommer. Metoden har nackdelar i form av att det krävs ett stort antal beräkningsceller som måste ligga helt jämnt över ytan. Detta ger i sin tur tyngre och mer tidskrävande beräkningar samtidigt som beräkningsnätet blir mer komplext (Fluent, 2007).



Figur 2.6.1 Beräkningsnätet löser upp det viskösa underskiktet.

En annan metod är att inte lösa upp det viskösa underskiktet med celler utan att istället använda så kallade väggfunktioner, se figur 2.6.2. Väggfunktioner är en form av semi-empiriskt framtagna formler som beskriver hur strömningen i underskiktet beter sig i normala fall. I de flesta strömningsfall erhålls på så sätt riktiga lösningar, men metoden kan ibland visa sig otillräcklig. Detta speciellt då flödet separerar eller då det förekommer låga Reynoldstal relativt högt upp i fluidgränsskiktet. Väggfunktioner är populära inom industrin då de innebär kortare beräkningstider samtidigt som de är robusta (Fluent, 2007).



2.6.2 Väggfunktionen modellerar strömningen i det viskösa underskiktet.

Ett tredje tillvägagångssätt kallas utökade väggfunktioner (eng. enhanced wall treatment) och är en kombination av de två ovanstående metoderna. Delar av underskiktet löses upp samtidigt som andra delar modelleras med hjälp av väggfunktioner. Metoden tar hänsyn till separation och kräver inte helt jämnt fördelade celler i gränsskiktet. På så sätt tillåts att antalet celler minskas vilket ger en kortare simuleringstid (Fluent, 2007).

2.6.3 Randvillkor

CFD-simuleringar kräver värden för fluidens egenskaper vid alla kroppar och ytor som påverkar strömningen. Då en vindtunnel simuleras definierar randvillkoren egenskaperna hos luften som strömmar in respektive ut ur tunneln. Andra randvillkor beskriver golvet, väggarna och taket. Kroppen som studeras behöver också ett randvillkor som redogör för hur dess yta påverkar fluiden.

2.6.4 Lösningsprocess

Fluent beräknar iterativt ekvationerna som beskriver k , ε , tryck och hastighet i varje cell. Fluidens egenskaper approximeras på randen av varje cell. Approximationen, även kallad diskretiseringen, kan ske på olika sätt men är vanligen en typ av medelvärde av angränsande cellers egenskaper.

Ekvationerna i alla celler beräknas tusentals gånger under en simulering. Mellan varje iteration jämförs cellernas nuvarande resultat (tryck, hastigheter, k och ε) med deras föregående. Skillnaden i resultat mellan två iterationer kallas för en residual. Itereringsprocessen fortsätter tills residualerna blir små och konstanta. Lösningen har då konvergerat. Differensen mellan två iterationer är därmed liten vilket medför att alla cellers egenskaper är bestämda. Motsatsen till konvergens är divergens. Residualerna ökar då okontrollerat eller hamnar i en resonant självsvängning och börjar oscillera med växande amplitud. Vid divergens avbryts iterationsprocessen på grund av en alltför instabil lösning.

2.7 Optimering

Resultat från ett fåtal experiment som utförs med samma förutsättningar kan användas för att skapa en matematisk modell som representerar resultatens variation, en responsyta. Givet denna modell kan funktionen som undersöks maximeras/minimeras för de värden som varierar.

2.7.1 Ersättningsmodellering

En ersättningsmodell är en kontinuerlig funktion, $\hat{y} = f(\mathbf{x})$, med designvariabler $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Modellen bestäms med hjälp av en relativt liten mängd data $g(\mathbf{x})$ i form av framtagna resultat. Eftersom modellen omöjligtvis kan vara exakt, består den approximerade responsytan \hat{y} av punktvis given data samt fel. Felen ε_f består av modelleringsfel samt slumpmässiga mätfel, se ekvation 2.7.1-2.

$$y = g(\mathbf{x}) \quad (2.7.1)$$

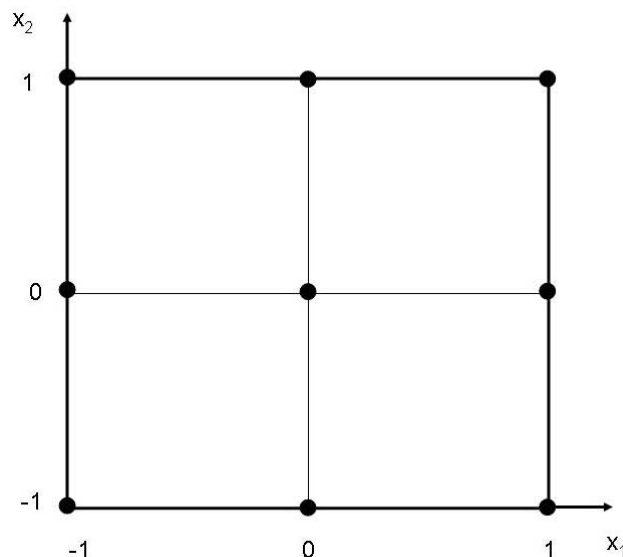
$$y = \hat{y} + \varepsilon_f \quad (2.7.2)$$

I numeriska experiment, simuleringar, är modelleringsfelet ett resultat av att vissa approximationer av ersättningsmodellen saknas, medan mätfelet är det numeriska felet (Krajnović, 2001).

2.7.2 Design of experiments (DOE)

Design of experiments (DOE) är en beskrivning av den sekvens av experiment som utförs. Den bestämmer gränser för vilka designvariablerna tillåts variera samt antal observationspunkter som krävs för att få en bra ersättningsmodell. Kvaliteten på den approximerade responsytan beror av valet av punkter i designvariabelarean, från vilken modellen konstrueras. Det finns olika metoder för att välja observationspunkter, en sådan är Centered Composite Design (CCD). I CCD-metoden bestäms antal observationer, N , enligt ekvation 2.7.3 där n är antalet designvariabler. CCD-metoden visualiseras i figur 2.7.1, där $n = 2$.

$$N = 2^n + 2n + 1 \quad (2.7.3)$$



Figur 2.7.1 Exempel på DOE med två designvariabler vilket ger nio observationspunkter.

2.7.3 Konstruktion av ersättningsmodell

En ersättningsmodell konstrueras utifrån förhållandet mellan designvariabler och experimentella resultat. Modellen används för att skapa bättre uppfattning om förhållandet mellan variablerna och resultaten. Då modellen är ett andra gradens polynom beskrivs responsytan enligt ekvation 2.7.4, där n är antalet designvariabler (Krajnović, 2001).

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j < i}^n \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 \quad (2.7.4)$$

β -termerna i ekvationen ovan approximerar responsytan \hat{y} , och genereras med hjälp av minsta kvadratmetoden. Minsta kvadratmetoden är en metod att utifrån givna observationer ta fram skattningar av de okända storheter som uppträder i en viss statistisk modell. Antag att en

yta ska väljas som på bästa möjliga sätt ansluter till ett datamaterial. Minsta kvadratmetoden väljer just den yta som minimerar summan av de kvadrerade avstånden mellan punkterna och ytan.

För att mäta responsytans lämplighet används koefficienter för multipel bestämning: R^2 och den justerade R_a^2 , se ekvation 2.7.5 respektive 2.7.9. R^2 mäter variationsförhållandet som erhålls från responsytan enligt ekvation 2.7.5 (Krajnović, 2001).

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (2.7.5)$$

Både R^2 och R_a^2 varierar mellan noll och ett. Ju högre värde desto bättre stämmer modellen överens med de beräknade punkterna. Termerna i ekvation 2.7.5 beskrivs i ekvationerna 2.7.6-8 (Krajnović, 2001).

$$SS_E = \sum_{i=1}^{n_p} (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.7.6)$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^{n_p} (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.7.7)$$

$$SS_R = SS_T - SS_E = \sum_{i=1}^{n_p} (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (2.7.8)$$

SS_E är summan av de approximerade felen i kvadrat vid de n_p stycken observationspunkterna. SS_T är summan av variationerna från medelvärdet \bar{y} i kvadrat, och SS_R är summan av den approximerade ytans avvikelser från medelvärdet \bar{y} i kvadrat.

En bättre metod för att fastställa responsytans exakthet är att använda R_a^2 som beskrivs i ekvation 2.7.9 nedan (Krajnović, 2001). Till skillnad från R^2 tar R_a^2 hänsyn till antalet observationspunkter samt antalet koefficienter i ekvation 2.7.4. R_a^2 ger därför ett bättre mått på hur bra approximationen är.

$$R_a^2 = 1 - \frac{\frac{SS_E}{(n_p - n_\beta)}}{\frac{SS_T}{(n_p - 1)}} \quad (2.7.9)$$

n_β är antalet koefficienter β i ekvation 2.7.4.

Även om minsta kvadratmetoden indikerar att modellen stämmer bra överens med experimentella data, finns det en möjlighet att en annan modell kan vara överlägsen. För att eliminera eventuella felaktigheter bland termerna kan den så kallade bakåtvända eliminationsmetoden (eng. backward elimination procedure) användas. I proceduren beräknas det statistiska värdet t på varje koefficient β . Statistikan t definieras av koefficientens värde dividerat med ett uppskattat standardfel på densamma. Ett lågt värde på absolutbeloppet av t

indikerar ett stort standardfel, vilket betyder att tillhörande koefficient β inte bidrar till en bra approximation. De koefficienter β som tillhör de t med lägst värden elimineras en och en. Under processen noteras hur R^2 - och R_a^2 -värdena varierar. Om R_a^2 -värdet stiger skall tillhörande β -värde tas bort eftersom det då innehåller ett för stort standardfel. Om däremot R_a^2 -värdet sjunker, skall tillhörande β -värde behållas för att inte försämra approximationen. Genom denna process erhålls det antal β -termer som beskriver den bästa responsytan \hat{y} (Krajnović, 2001). Denna responsyta används för optimering.

Responsytan kontrolleras genom att utföra en CFD-beräkning av det beräknade optimala fallet. Resultatet från beräkningarna jämförs med resultatet från responsytan. Skillnader på ett par procent accepteras på grund av osäkerheter i beräkningarna. Om resultatet ligger inom denna gräns är responsytan en bra approximation av mätvärdena.

2.8 Programvaran Ensight

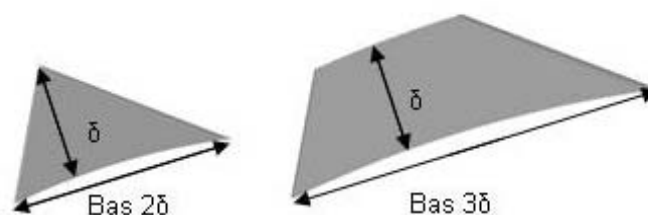
Ensign är en kommersiell visualiseringsprogramvara som används i samband med CFD-beräkningar. Programmet används för att visualisera exempelvis fluidströmningen runt en kropp. Ensight är kompatibelt med ett stort antal simuleringsprogram, däribland Fluent. Från dessa program importeras de resultat som skall analyseras. Eftersom Ensight endast är en programvara, specialiserad för visualisering, kan mer precisa bilder och filmer skapas än vad som är möjligt i exempelvis Fluent. Bilderna kan analyseras och jämföras med varandra på ett enkelt och rättvisande sätt.

3. Genomförande

Lösningsgången i projektet är uppdelad i flera steg. Kapitlet avser guida läsaren genom arbetets genomförande. Här beskrivs tillämpningarna av teorin i kapitel 2.

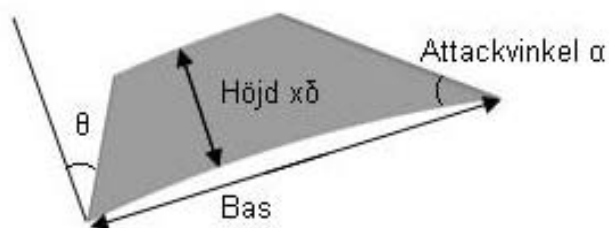
3.1 Virvelgeneratorer

Forskning som utförts av Koike et al (2004), utgör basen i projektet. Geometrivelet för undersökta virvelgeneratorer baseras på denna forskning. Ett antal ändringar görs för att underlätta nätgenereringen i ICEM-CFD. Den spetsiga överdelen kapas och basen förlängs. På så sätt undviks fria, skarpa hörn. Se figur 3.1.1.



Figur 3.1.1 Tidigare forsknings virvelgenerator enligt Koike et al, 2004, t.v. och vald beräkningsmodell t.h. Notera skillnaden i överkant samt basens längdändring.

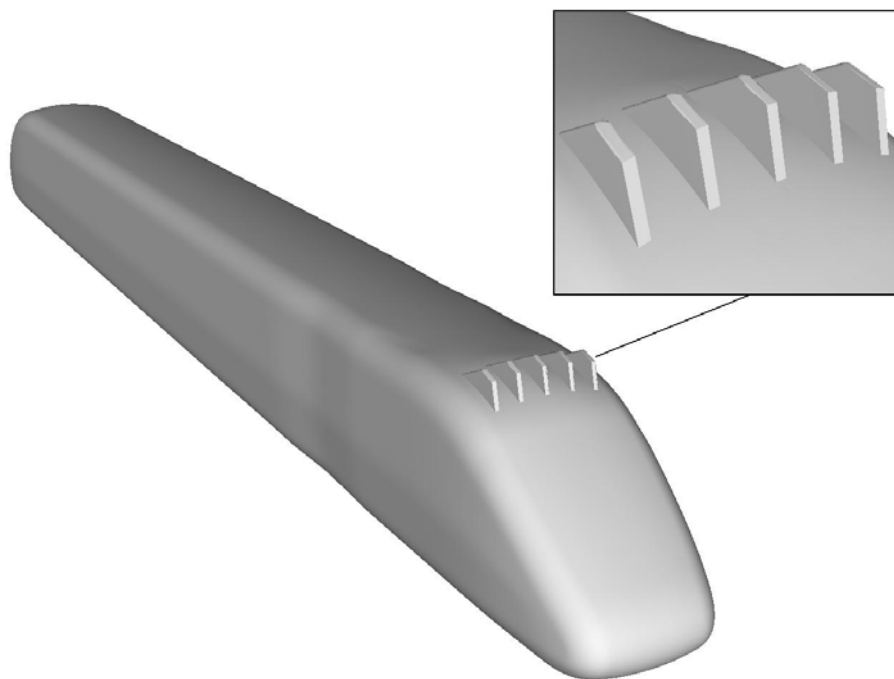
Enligt Koike et al (2004) skall virvelgeneratorernas höjd överensstämma med gränsskiktstjockleken δ . Då geometriens översta del skall vara plan samtidigt som attackvinkel och höjd inte ändras, krävs en längdändring av basen på ursprunglig virvelgenerator. Koike et al (2004) optimerar virvelgeneratorer där attackvinkeln är 35° . För att kunna variera både höjd och attackvinkel förlängs basen från 2δ till dryga 3δ , där δ är uppskattat enligt ekvation 2.2.3, turbulent strömning. Längden x i ekvationen baseras på den plana ytan på tågets tak. Gränsskiktets tjocklek kontrolleras i Fluent och bekräftas vara 30 cm.



Figur 3.1.2 Mått på undersökta virvelgeneratorer. Basen är förlängd till cirka 3δ eller 100 cm. Höjden $x\delta$ och attackvinkel α väljs som variabler för optimering.

Figur 3.1.2 visar en av de högre virvelgeneratorerna ($x\delta = 30$ cm och $\alpha = 35^\circ$). θ är oförändrad från grundgeometrin. Enligt Koike et al (2004) skall virvelgeneratorer placeras strax innan området där separation inleds. Efter strömningssimulering runt tåggeometrin utan virvelgeneratorer noteras separation strax efter den rundade kanten bak på tåget. Fem

virvelgeneratorer väljs att observera, vilket resulterar i ett mellanrum på 37 cm dem emellan. Virvelgeneratorerna placeras enligt figur 3.1.3.



Figur 3.1.3 De fem virvelgeneratorerna är placerade bak på tåggeometrin, framför separationspunkten.

För att finna en optimal virvelgenerator väljs ett antal variabler. Det finns ett antal variabler hos virvelgeneratorerna såsom höjd, attackvinkel, bredd, antal, och placering, som förväntas påverka strömningen. Enligt Koike et al (2004) påverkas luftmotståndet marginellt av antal virvelgeneratorer och avståndet dem emellan. Därför berörs dessa parametrar inte i detta arbete, se avsnitt 1.3. De tre återstående variablerna, höjd, bredd och attackvinkel, resulterar i 25 olika simuleringar, se avsnitt 2.7.2. Höjd och attackvinkel väljs av dessa tre variabler som de mer betydande faktorerna. Detta medger en minskning av antal krävda simuleringsfall till nio fall, se figur 4.2.1-4.2.3.

Attackvinkeln varieras mellan 24° , 35° och 46° . Höjden varieras inledande mellan 6, 18 och 30 cm. Detta bildar nio observationspunkter enligt CCD, se avsnitt 2.7.2. Efter inledande optimering befinner sig optimala värden för virvelgeneratorer av den undersökta typen på optimeringsytans ena sida, se figur 3.4.1. Observationspunkterna till optimeringen utökas genom att öka höjden på virvelgeneratorerna till ytterligare tre fall med höjden 38 cm. Då virvelgeneratorns höjd överstiger gränsskiktstjockleken resulterar detta i ett högre luftmotstånd enligt Koike et al (2004).

3.2 Beräkningsnät

ICEM-CFD är ett bra verktyg för att skapa beräkningsnät. Användaren tillåts enkelt arbeta i en tredimensionell miljö. ICEM-CFD används för att det är överlägset annan för projektet tillgänglig programvara, såsom exempelvis Gambit.

Beräkningar på ett nät kan resultera i olika svar beroende på hur beräkningsnätet är uppbyggt. För referensmodellen testas ett antal olika nät. Beräkningarna på näten visar små varianser i

resultat, varför det kan antas att en nätoberoende lösning har uppnåtts. För att ytterligare minska nätets betydelse för lösningen eftersträvas små variationer hos beräkningsnäten för de undersökta virvelgeneratorerna.

För att lägga en grund till beräkningsnätet skapas dels en vindtunnel och dels en tåggeometri i form av ett ICE2-tåg. Vindtunneln blir beräkningsdomänen i vilken alla beräkningsceller skall inrymmas, och tåget den kropp som påverkar strömningen. Ett block läggs runt hela beräkningsdomänen. Detta delas sedan upp i mindre block runt och i tåggeometrin. De block som representerar tåget ska inte innehålla några celler och läggs i en delgrupp som kallas vorfn. Gruppen innehåller solida delar inom beräkningsdomänen. Block utanför denna grupp innehåller fludelement där beräkningar skall utföras.

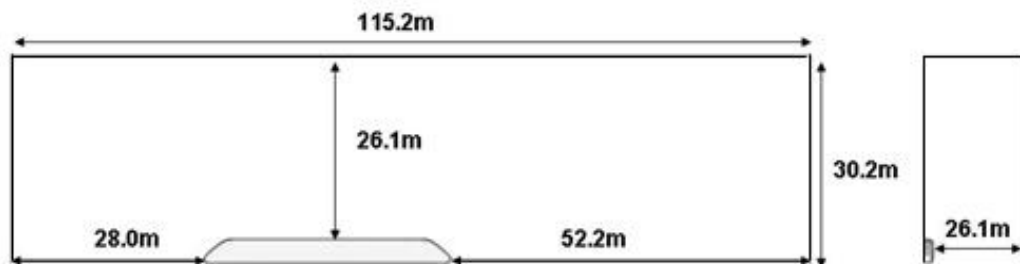
Blocken projiceras på ytor och läggs därför nära de ytor de ska projiceras på för att underlätta visualiseringen. Koncentrationen av celler i varje block kan väljas genom att specificera antalet noder på blockens kanter i x-, y- och z-riktning. Hur enkelt cellkoncentrationen kan styras påverkas i hög grad av blockens uppdelning, se avsnitt 3.2.1.

I ett första skede modelleras hela tåget. Beräkningsnätet innehåller ett stort antal celler, men med jämförelsevis dålig upplösning. En ökning av upplösningen skulle resultera i ökad beräkningstid. Därav genomförs simuleringar på halva tåget, se figur 3.2.1. Detta är möjligt genom att utnyttja symmetrin hos modellen och att tidsmedelvärderade RANS-beräkningar används.



Figur 3.2.1 Tåggeometrin sedd framifrån, ett vertikalt snitt läggs mitt i beräkningsdomänen.

Tåget delas och det plan som delar beräkningsmodellen tilldelas ett symmetrirandvillkor, se avsnitt 3.3. Resultaten baseras på halva geometrin men visar ändå representativt för hela tåget. Tack vare denna möjlighet kan antalet celler på halva geometrin vara högt för en ökad noggrannhet. Samma upplösning för hela geometrin resulterar i dubbelt så många celler. På grund av halveringen minskar beräkningstiden trots ökad noggrannhet.



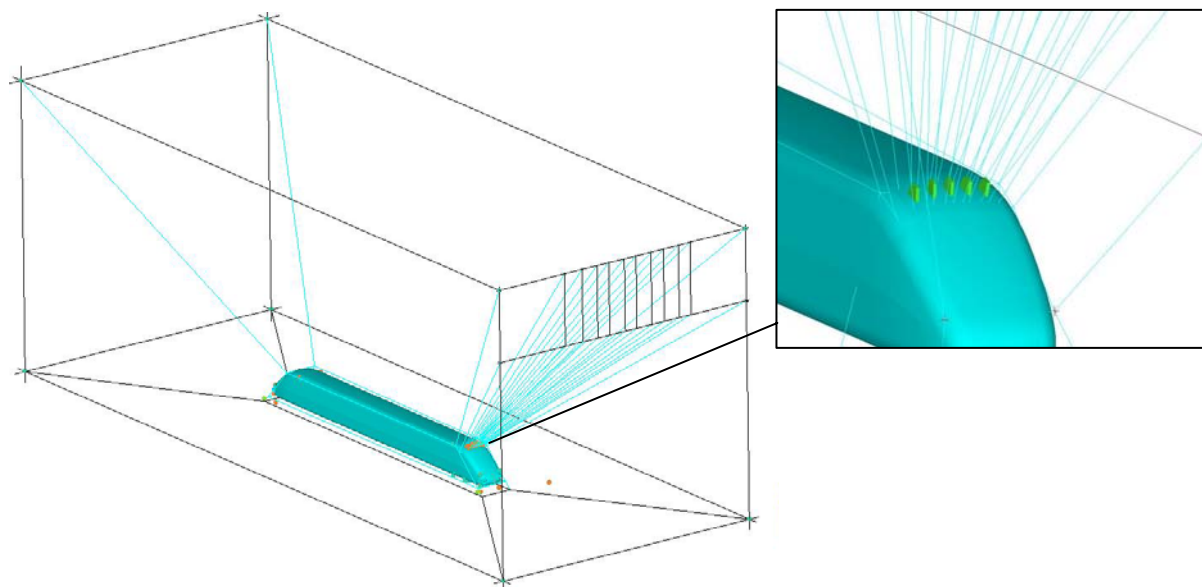
Figur 3.2.2 Halva vindtunneln och tågets placering. Notera de stora avstånden runt tåget. Syftet är att beräkningsdomänen långt ut ska rymma av tåget opåverkad strömning.

Då beräkningar utförs på hela tåget, används en alltför kort vindtunnel. Följden blir att all påverkad strömning inte ryms i beräkningsdomänen. Bilder från tidiga topologier i avsnittet nedan använder sig av denna kortare vindtunnel. Då all påverkad strömning inte ryms i beräkningsdomänen förlängs den så att egenskaperna hos strömningen vid utloppet är konstanta.

3.2.1 Topologi

Topologival påverkar mycket hur lättbearbetat ett beräkningsnät är. Olika metoder att dela blocken har olika för- och nackdelar som beskrivs nedan.

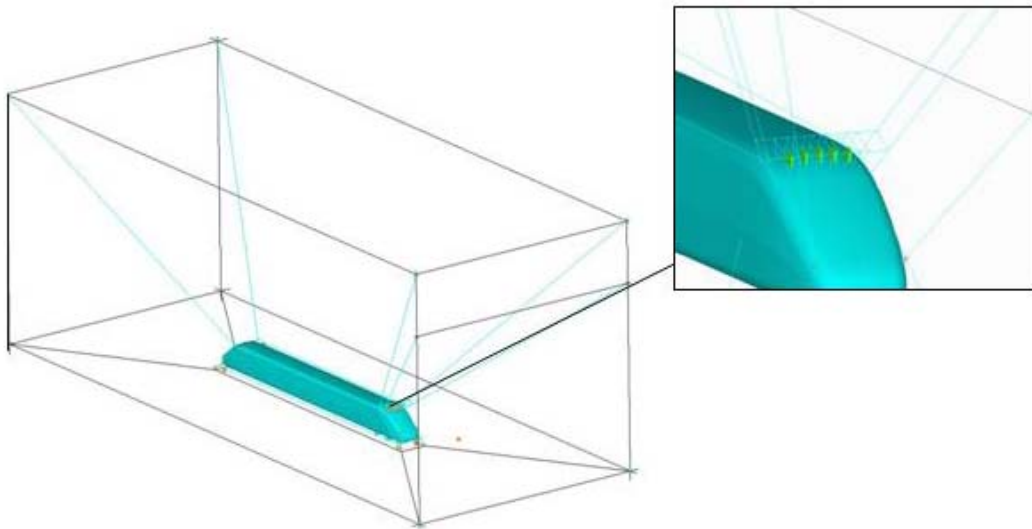
Inledande läggs ett stort block runt hela vindtunneln. I detta block skapas en så kallad C-grid runt tåggeometrin. C-griden gör det möjligt att erhålla fina celler med hög determinant nära tågkroppen, där strömningen påverkas mycket av tåget. Cellernas storlek ökar med avståndet från tågkroppen ut i domänen. På så sätt sprids inte många celler till områden där strömningen inte förväntas påverkas lika mycket.



Figur 3.2.3 Tågkroppen är startläget för C-griden och kanalen är slutmålet där cellerna är hexahedra. Det är i detta utförande svårhanterligt att styra noddistributionen utmed blockens kantlinjer. Figuren visar ett av de tidigare fallen med för kort vindtunnel.

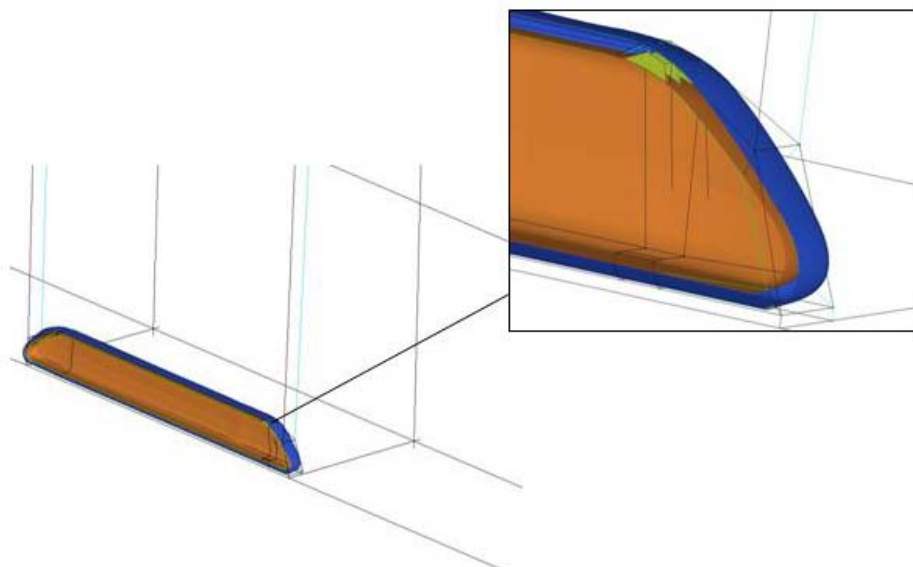
En av de tidigare topologierna visas i figur 3.2.3. Nackdelen med denna typ av tillvägagångssätt är att en relativt svårhanterad topologi erhålls. Då block behövs runt varje virvelgenerator resulterar detta i kantlinjer genom stora delar av domänen vilka kan förvirra användaren. Den största nackdelen är att cellspridning blir svår att styra, med dålig noggrannhet nära tåget och för hög långt ut i kanalen där strömningen påverkas lite eller inte alls av geometrin.

För att få ett mer lättbearbetat beräkningsnät, kan blocken begränsas från geometrin till vindtunnelns sidor. Notera skillnaden i antal linjer genom domänen mellan figur 3.2.3 och figur 3.2.4.



Figur 3.2.4 Blocken är begränsade för att undvika linjer genom stora delar av domänen. Figuren visar ett av de tidigare fallen med för kort vindtunnel.

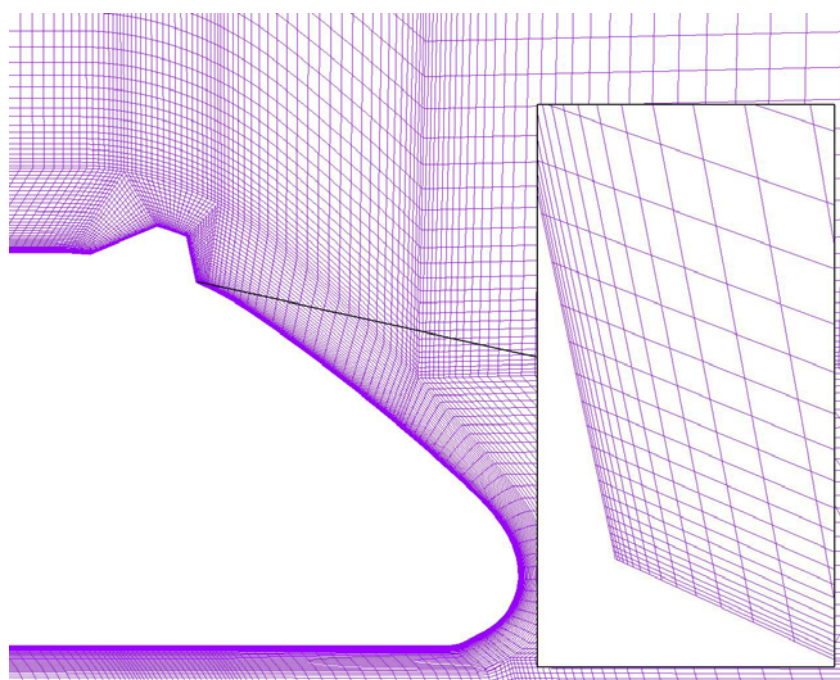
En nackdel med topologin i figur 3.2.4 är en ofördelaktig cellspridning utmed tågkroppen på grund av att C-griden sträcker sig genom hela domänen. I detta fall behöver användaren själv bestämma hur lång ut i domänen enskild C-grid skall sträckas. C-griden kan därför få annorlunda upplösning på olika positioner i beräkningsnätet.



Figur 3.2.5 C-griden verkar 40 cm ut i domänen, från tågekroppen till den yttre ytan.

För att få en jämn utbredning av C-griden från geometrin kan en yta skapas som begränsar C-griden. C-griden i figur 3.2.5 verkar mellan tåget och 40 cm ut i domänen. Detta för att enkelt begränsa antalet element långt ut i kanalen utan att försämra noggrannheten nära hela tåggeometrin.

För att nätet ska bli beräkningsvänligt behöver övergångar mellan celler vara jämna. Genom att ändra noddistribution kan man förhindra att celler blir mer än 50 % större eller mindre än deras grannar. Med topologin enligt figur 3.2.5 kan övergångar enkelt modifieras för att storleksskillnaden mellan närliggande celler skall vara liten och få jämna övergångar. Det är dessutom enkelt att få en hög noggrannhet nära tåget och färre celler långt ifrån geometrin, se figur 3.2.6.



Figur 3.2.6 Små celler är placerade närmast tåget och betydligt större celler längre ifrån.

Nätet i figur 3.2.6 visar tvådimensionellt hur beräkningscellerna kommer att se ut. Förstorat visas hur noggrannheten ökar nära tågkroppen. Celler nära tågkroppen är betydligt mindre än celler längre ut i domänen. Övergångar mellan olika celler är jämna, vilket resulterar i ett bra beräkningsnät.

Vid en inledande kontroll av lösningens rimlighet, upptäcks att y^+ är för högt. För att minska y^+ till log-lagområdet, se avsnitt 2.3, minskas cellernas storlek närmast tåget. På grund av övergångar mellan celler och till följd av en hög upplösning runt tåggeometrin används cirka 1 500 000 celler. Beräkningsnätet innehåller många celler och beräkningarna är relativt långsamma, men detta ger en noggrann lösning. Beräkning med samma upplösning för hela tåget skulle resultera i 3 000 000 celler vilket skulle öka beräkningstiden väsentligt.

När nätet ser bra ut med jämna övergångar och hög upplösning närmast tåget för att uppfylla kriterier för y^+ , görs en sista kontroll av determinanten, avsnitt 2.5. Enligt Ansys ICEM-CFD (2004) klarar de flesta beräkningsprogram av att hantera nät där cellernas determinanter är större än 0,25. I de beräkningsnät som används i arbetet överstiger determinantvärdet 0,5. När kontrollerna av nätet är genomförda exporteras nätet till det beräkningsprogram som skall utföra beräkningarna. I detta fall används CFD-programvaran Fluent.

3.3 Simulering

Beräkningsnätet importeras från ICEM-CFD i en så kallad mesh-fil som innehåller såväl geometri som det färdiga nätet. Skalan på nätet kontrolleras och ställs in manuellt till önskade värden, se avsnitt 1.5. Turbulensmodellen väljs till standardversionen av $k-\varepsilon$ -modellen, se avsnitt 2.6.1, då denna anses vara en av de mest stabila. Modellen är även den mest frekvent använda 2-ekvationsmodellen inom industrin. Utökade väggfunktioner väljs då nätet inte uppfyllt alla krav på jämnhet i det viskösa underskiktet, se avsnitt 2.6.2.

En referenspunkt väljs längst upp i ett hörn, nära inloppet av beräkningsdomänen, för att få en ostörd punkt att mäta referenstryck vid. Referenstrycket mäts efter varje iterering för att säkerställa att trycket inte eskalerar.

Randvillkoren bestäms enligt följande:

- Inlopp: Inkommande luft med hastighet $U = 56$ m/s.
- Utlopp: $\frac{\partial m}{\partial x} = 0$, $\frac{\partial u}{\partial x} = C_1$, $\frac{\partial v}{\partial y} = C_2$, $\frac{\partial w}{\partial z} = C_3$, där C_i är konstanter.

Strömningen extrapoleras förbi utloppet.

- Golv: Rörlig vägg med no-slip och $U = 56$ m/s.
- Väggar och tak: Alla variablers derivator = 0. Cellen närmast väggen får en exakt kopia av sig själv på andra sidan ytan.
- Tåg: Vägg med no-slip.

Underrelaxationsfaktorerna bestämmer hur stora steg lösningen får ta i någon riktning under itereringen. Ju större dessa faktorer är desto mer aggressiv lösning fås. Lösningen har lättare att divergera men samtidigt fås en kortare tid till konvergens om lösningen visar sig vara

stabil, se avsnitt 2.6.4. När virvelgeneratorerna undersöks får underrelaxationsfaktorerna sänkas för att erhålla konvergerande lösningar. En diskretisering av rörelseekvationerna är nödvändig då beräkningar utförs i celler istället för i ett kontinuerligt flöde. Diskretiseringen, se avsnitt 2.6.4, väljs till andra graden då den antas passa detta fall bäst (Fluent, 2007).

Kontrollerna för övervakning av iterationsprocessen ställs in för att ge en bra överblick under simuleringen. De variabler som övervakas är k , ε , C_D samt hastigheter i x-, y- och z-led. Konvergensvillkoren i Fluent sätter de gränser inom vilka itereringarna får fluktuera. Dessa stängs av, vilket får till följd att processen får fortgå tills antalet itereringar anses tillräckligt.

För att på ett rättvisande sätt kunna jämföra C_D för de olika geometrierna används samma värde på referensarean. Detta är något missvisande då storleken på virvelgeneratorerna förändrar frontarean. Med en gemensam frontarea ändras C_D proportionellt mot F_D , varför det lägsta värdet på C_D motsvarar den lägsta motståndskraften, se avsnitt 2.4.1.

De referensvärden som används för geometrin är:

- Projicerad frontarea, 5 m²
- Projicerad bottenarea, 52,4 m²
- Längd, 35 m
- Strömningshastighet, 56 m/s

Då simuleringen uppnått en till synes konvergerad lösning, analyseras beräknade värden och figurer för att fastställa om en tillfredsställande lösning uppnåtts. Analysen innehåller bland annat kontroll av y^+ , samt figurer av hastighets-, tryck- och turbulensprofiler i programvaran Ensignt.

3.4 Sökande efter optimal virvelgenerator

Beräkningarna av flödet för de nio olika formerna av virvelgeneratorer resulterar i ett värde på luftmotståndet samt ett värde på lyftkraften hos varje fall, se tabell 3.4.1. De låga värdena på C_L indikerar att virvelgeneratorernas påverkan av lyftkraften är liten. Jämfört tågets totala vikt är skillnaderna försumbara. Därför tas ingen hänsyn till virvelgeneratorernas påverkan av lyftkraften. Optimeringsprocessen blir således en fråga om att hitta den kombination av höjd och attackvinkel hos virvelgeneratorerna som minimerar tågets luftmotstånd, representerat av motståndskoefficienten C_D .

Fall	h (cm)	α	x_1	x_2	C_D	C_L
1	30	24°	1	-1	0,2350	0,0070
2	18	24°	0	-1	0,2466	0,0083
3	6	24°	-1	-1	0,2410	0,0084
4	30	35°	1	0	0,2322	0,0067
5	18	35°	0	0	0,2402	0,0075
6	6	35°	-1	0	0,2383	0,0077
7	30	46°	1	1	0,2329	0,0067
8	18	46°	0	1	0,2434	0,0078
9	6	46°	-1	1	0,2409	0,0078

Tabell 3.4.1 Centered Composite Design för design av virvelgeneratorer. Tabellen innehåller även simuleringsresultat för C_D och C_L .

Den optimala formen kan ligga i eller mellan observationspunkterna. För att utvärdera detta skapas en ersättningsmodell som representerar de beräknade värdena, se avsnitt 2.7.3. Först används en ersättningsmodell som är en responsyta av andra ordningen. Den generella formeln för responsytan ges av ekvation 2.7.4. I detta fall används två designvariabler och ytekvationen förenklas således till ekvation 3.4.1 nedan.

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 \quad (3.4.1)$$

Med minsta kvadratmetoden approximeras β_i och utifrån dessa termer skapas responsytan. Responsytans giltighet kontrolleras genom att studera R^2 och den justerade R_a^2 , se ekvation 2.7.5 respektive 2.7.9. Bakåtvända elimineringsmetoden, se avsnitt 2.7.3, används för att avgöra om responsytan kan förbättras genom att eliminera termer i ekvation 3.4.1 ovan. De koefficienter som motsvarar de till absolutbelopp lägsta värdena av t elimineras en i taget samtidigt som värdet på R_a^2 studeras, se tabell 3.4.2 respektive 3.4.3 nedan.

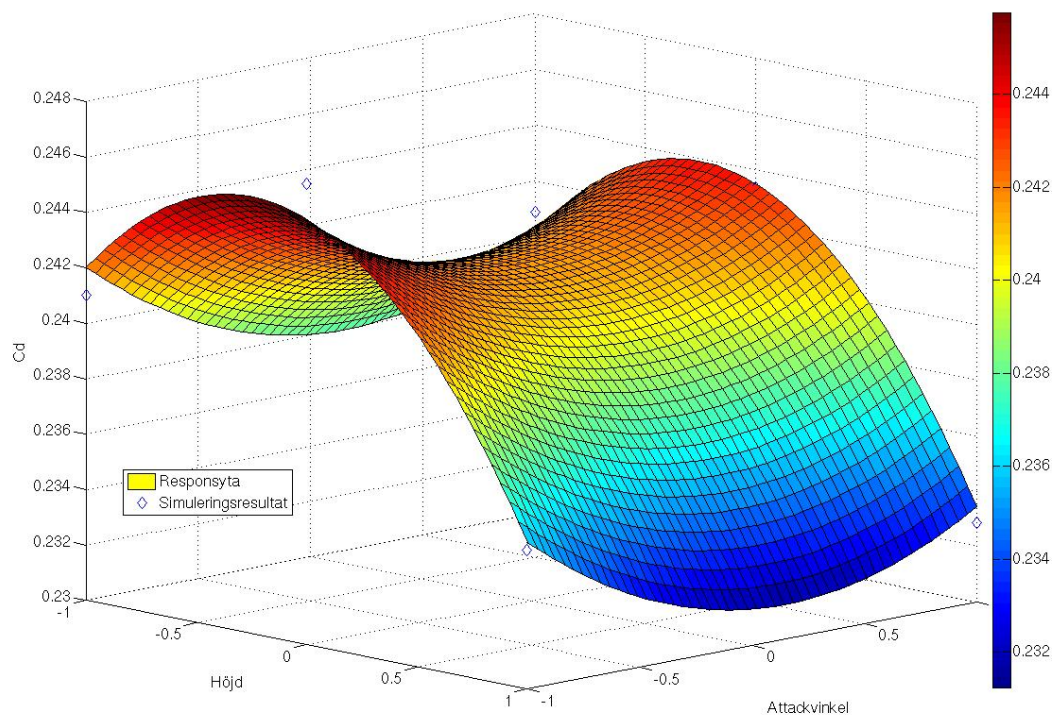
Koefficient	t(full)	t ($-\beta_{12}$)	t ($-\beta_2$)
β_0	255,22	268,93	218,24
β_1	6,48	6,83	5,54
β_2	1,78	1,90	-
β_{12}	-0,78	-	-
β_{11}	-7,44	-7,80	-6,36
β_{22}	3,41	3,59	2,91

Tabell 3.4.2 Det statistiska värdet av t , andra ordningens responsyta.

Borttagna koefficienter	R^2	R_a^2
-	0,974	0,931
β_{12}	0,969	0,938
β_2	0,941	0,906

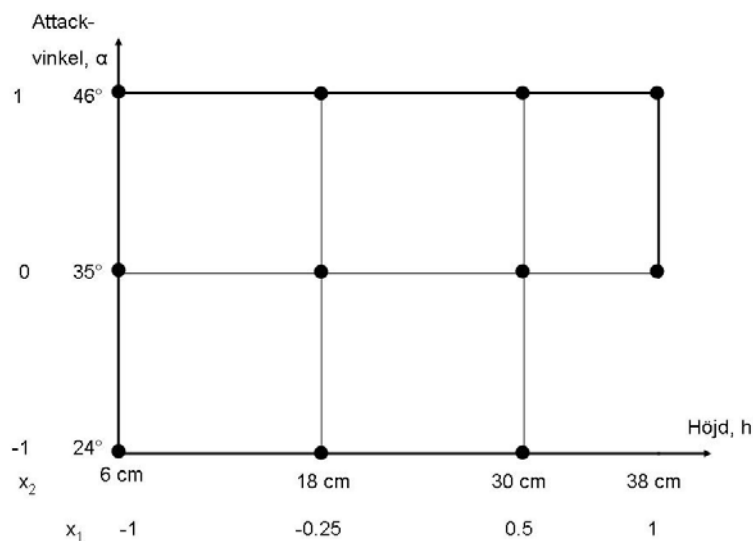
Tabell 3.4.3 Bakåtvända elimineringsmetoden för approximation av responsyta till funktionen av luftmotståndet. Andra ordningens responsyta.

Enligt tabell 3.4.3 ovan, ökar R_a^2 genom borttagning av termen innehållande β_{12} ($\beta_{12} x_1 x_2$) medan den sänks då koefficienten β_2 tas bort. Sänkningen av R_a^2 betyder att borttagandet av den sista koefficienten var felaktig och att denna bör vara kvar i ekvationen för att erhålla en så bra responsyta som möjligt (Krajnović, 2001).



Figur 3.4.1 Responsytan från ersättningsmodellering av nio mätpunkter. Minimum av C_D ligger på kanten av designarean.

Responsytan som erhålls av den mest gynnsamma kombinationen av β -koefficienter visas i figur 3.4.1. Figuren visar att det lägsta värdet på C_D är 0.2322 och erhålls då virvelgeneratorerna har form enligt koordinaterna (1,0), vilket motsvarar en höjd av 30 cm och en attackvinkel på 35° . Punkten med detta värde ligger på kanten av designarean. Följden av detta blir att det inte finns någon möjlighet att avgöra om den optimala formen ligger innanför eller utanför den undersökta arean. För att bestämma vilket som är fallet omarbetas designstrategin så att arean även innefattar höjden 38 cm, se figur 3.4.2. Därmed undersöks ytterligare tre fall av virvelgeneratorer.



Figur 3.4.2 Utvidgad designarean, innefattande höjden 38 cm. Notera att virvelgenerator med höjd 38 cm och attackvinkel 24° inte undersöks.

Den virvelgenerator som har koordinater (1,-1) blir på grund av sina geometriska krav nästintill helt spetsig i överkant. En sådan geometri undveks när virvelgeneratorerna designades, se avsnitt 3.1. En spetsig virvelgenerator och dess beräkningsnät är betydligt svårare att generera än en trubbig, vilket leder till att lösningen inte konvergerar. Små ändringar i beräkningsnätet genomförs samtidigt som olika inställningar för beräkningarna i Fluent undersöks för att om möjligt erhålla ett resultat. Det beslutas att inte undersöka den spetsiga virvelgeneratoren utan istället låta ersättningsmodellen bygga på övriga elva fall. Tabell 3.4.4 visar resultaten av beräkningarna för dessa elva fall.

Fall	h (cm)	α	x_1	x_2	C_D	C_L
1	30	24°	0,5	-1	0,2350	0,0070
2	18	24°	-0,25	-1	0,2466	0,0083
3	6	24°	-1	-1	0,2410	0,0084
4	30	35°	0,5	0	0,2322	0,0067
5	18	35°	-0,25	0	0,2402	0,0075
6	6	35°	-1	0	0,2383	0,0077
7	30	46°	0,5	1	0,2329	0,0067
8	18	46°	-0,25	1	0,2434	0,0078
9	6	46°	-1	1	0,2409	0,0078
10	38	24°	1	-1	-	-
11	38	35°	1	0	0,2307	0,0061
12	38	46°	1	1	0,2338	0,0063

Tabell 3.4.4 Utvidgad Centered Composite Design för design av virvelgeneratorer. Notera att virvelgenerator med höjd 38 cm och attackvinkel 24° inte genererar något resultat.

En ny responsyta av andra ordningen skapas med hjälp av minsta kvadratmetoden. Dess giltighet kontrolleras genom att studera R^2 och R_a^2 utan att någon koefficient elimineras, se tabell 3.4.5 nedan.

Borttagna koefficienter	R^2	R_a^2
-	0,748	0,517

Tabell 3.4.5 R^2 och R_a^2 från andra ordningens responsyta. Notera det låga värdet på R_a^2 .

Ett lågt R_a^2 betyder att responsytan är en dålig approximation av de uppmätta värdena (Krajnović, 2001). Andragradskurvan har svårt att följa variationerna hos mätvärdena. Av denna anledning skapas ytterligare en ersättningsmodell vilken beskrivs av en tredje ordningens yta, se ekvation 3.4.2. En sådan yta har tack vare de kubiska termerna större möjlighet att följa variationer hos de uppmätta värdena vilket ger den potential till att vara en bättre approximation.

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{112} x_1^2 x_2 + \beta_{122} x_1 x_2^2 + \beta_{111} x_1^3 + \beta_{222} x_2^3 \quad (3.4.2)$$

Responsytans giltighet kontrolleras med hjälp av R^2 och R_a^2 . Även bakåtvända elimineringsmetoden, se avsnitt 2.7.3, används för att se om responsytan kan förbättras genom att eliminera termer, se tabell 3.4.6. I den första approximationen blir koefficienten $\beta_{222} = 0$, responsytan beskrivs utan termen $\beta_{222} x_2^3$. Detta resulterar i att t-värdet motsvarande

koefficienten tilldelas värdet NaN (Not a Number). Den första koefficienten som elimineras blir därför β_{222} .

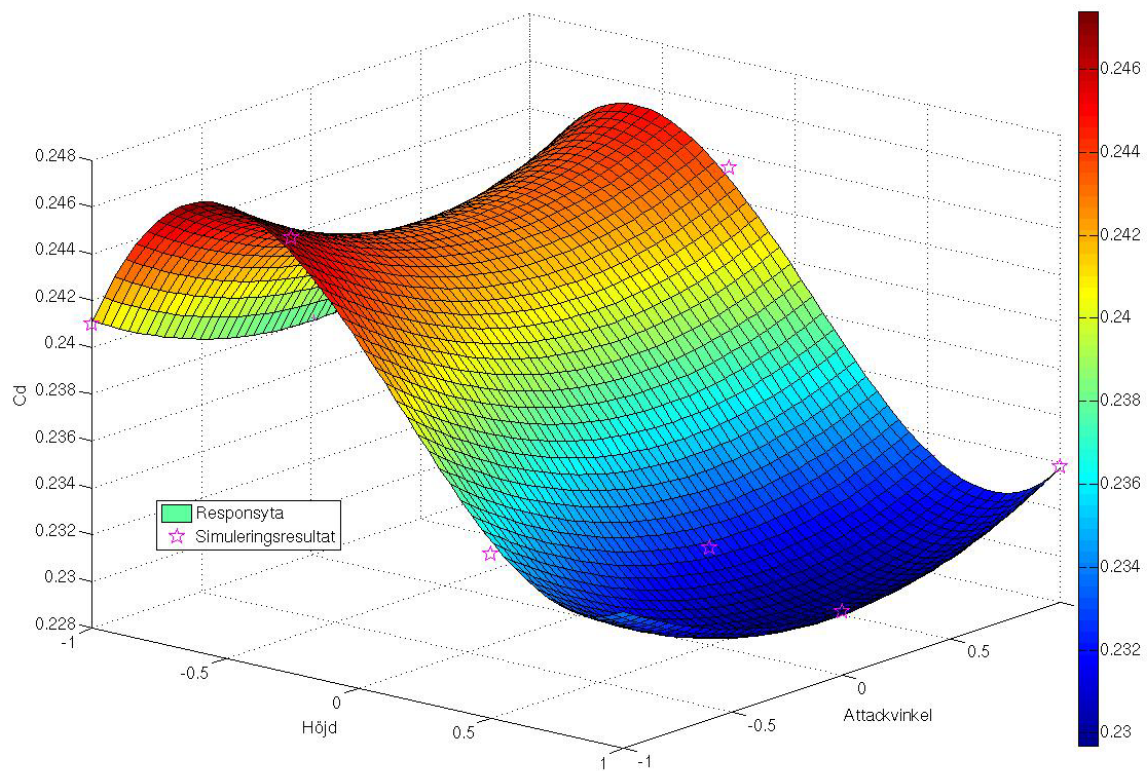
Koefficient	t(full)	t ($-\beta_{222}$)	t ($-\beta_{12}$)	t ($-\beta_{122}$)	t ($-\beta_{112}$)
β_0	190,04	268,76	341,20	388,31	325,83
β_1	-5,00	-7,07	-9,11	-11,74	-9,86
β_2	-1,56	-2,20	-2,59	-2,93	-1,98
β_{12}	0,26	0,36	—	—	—
β_{11}	-2,53	-3,58	-4,73	-5,39	-4,26
β_{22}	2,40	3,39	4,52	5,16	4,58
β_{112}	0,93	1,31	1,62	1,80	—
β_{122}	-0,29	-0,41	-0,32	—	—
β_{111}	3,68	5,21	6,88	7,93	6,88
β_{222}	NaN	—	—	—	—

Tabell 3.4.6 Det statistiska värdet av t. Tredje ordningens responsyta.

Borttagna koefficienter	R^2	R_a^2
—	0,988	0,883
β_{222}	0,988	0,941
β_{12}	0,988	0,958
β_{122}	0,987	0,968
β_{112}	0,977	0,953

Tabell 3.4.7 Bakåtvända elimineringsmetoden för approximation av tredje ordningens responsyta till funktionen av luftmotståndet.

Responsytan förbättras till och med eliminering av den tredje koefficienten β_{122} . De stora skillnaderna i R_a^2 mellan andra och tredje ordningens responsyta, visar tydligt på att ytan av tredje ordningen genererar en överlägset bättre approximation, se tabell 3.4.7 respektive tabell 3.4.5.



Figur 3.4.3 Responsytan från ersättsmodellering av elva mätpunkter. Responsytan följer simuleringsresultaten på ett tillfredställande sätt.

Genom att identifiera minimivärdet av funktionen som beskriver responsytan fås den höjd och attackvinkel hos virvelgeneratorerna som minimerar tågets C_D , se figur 3.4.3. För att kontrollera om responsytan är tillförlitlig simuleras resultatet av den påstått optimala virvelgeneratorn. Resultatet tillåts avvika ett par procent från det uppskattade värdet med anledning av osäkerheten hos simuleringen. En större skillnad ger en indikation på att responsytan inte representerar de experimentella värdena tillräckligt bra.

4. Resultat

Huvudfrågan som ställs projektet är huruvida luftmotståndet på en kropp kan minskas genom användning av virvelgeneratorer. Det visar sig möjligt för samtliga undersökta virvelgeneratorer. Optimeringsprocessen resulterar i en optimal virvelgenerator med höjd 34,5 cm och attackvinkel 36° . Virvelgeneratorerna medför endast försumbara förändringar av lyftkraften på tåget.

4.1 Referensmodell

Referensmodellen som beskrivs i avsnitt 1.5 består av tågkroppen till ett ICE2-tåg.



Figur 4.1.1 Referensmodellen som använts i arbetet.

Resultat från beräkningarna på referensmodellen visas i tabell 4.1.1.

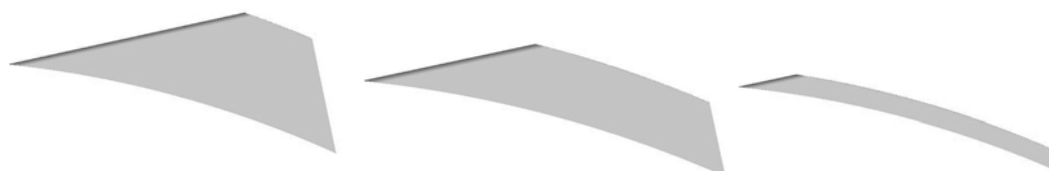
Referensmodell	
C_D	0.25785
F_D	4934,8 N
C_L	0.00696
F_L	1401,4 N

Tabell 4.1.1 Resultat från referensmodellen.

För att avgöra om virvelgeneratorerna ger en positiv effekt i form av minskat luftmotstånd jämförs alla beräkningar med värden från referensmodellen.

4.2 Modell med virvelgeneratorer

Figurerna 4.2.1-4.2.4 visar de 11 olika geometrier som C_D , F_D och C_L , F_L beräknas på.



Figur 4.2.1 Fall 1-3, gemensam attackvinkel på 24° och höjderna 30, 18 och 6 cm.



Figur 4.2.2 Fall 4-6, gemensam attackvinkel på 35° och höjderna 30, 18 och 6 cm.



Figur 4.2.3 Fall 7-9, gemensam attackvinkel på 46° och höjderna 30, 18 och 6 cm.



Figur 4.2.4 Fall 10 och 11, gemensam höjd på 38 cm och attackvinklar 35° och 46°.

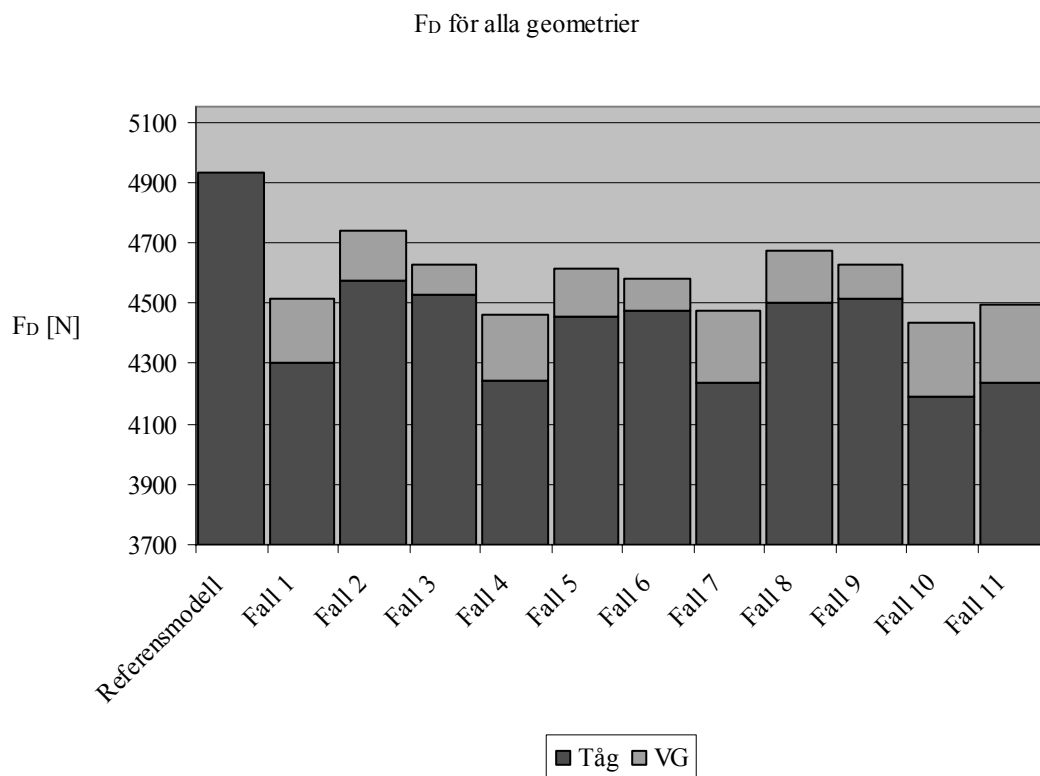
Resultaten från beräkningarna redovisas i tabell 4.2.1.

	C_L Lyftkoefficient	F_L Lyftkraft [N]	C_D Motståndskoefficient	F_D Motståndskraft [N]
Referensmodell	0,00696	1401,4	0,25785	4934,8
Fall 1	0,00702	1413,2	0,23501	4514,0
Fall 2	0,00826	1662,6	0,24663	4737,4
Fall 3	0,00839	1688,2	0,24102	4643,6
Fall 4	0,00674	1356,6	0,23219	4460,0
Fall 5	0,00751	1511,8	0,24018	4613,4
Fall 6	0,00765	1540,4	0,23833	4577,8
Fall 7	0,00667	1341,6	0,23287	4473,0
Fall 8	0,00777	1563,2	0,24335	4674,2
Fall 9	0,00776	1562,4	0,24085	4626,4
Fall 10	0,00716	1440,4	0,23346	4484,2
Fall 11	0,00605	1218,8	0,23072	4431,8

Tabell 4.2.1: Totala C_L , C_D , F_L och F_D för alla undersökta fall.

Notera skillnader i motståndskraft med och utan virvelgeneratorer. Om virvelgeneratorerna inte påverkar F_D på tåget bör F_D för samtliga fall vara lika med motståndskraften för

referensmodellen. Detta är inte fallet, utan F_D är mindre i beräkningar på fallen med virvelgeneratorer än i referensfallet. Applicering av virvelgeneratorer minskar alltså F_D för tåget. Virvelgeneratorerna bidrar med ett luftmotstånd i sig, men beräkningarna visar på ett minskat F_D totalt för tågkroppen. Detta visas i figur 4.2.5 nedan där virvelgeneratorernas bidrag till den totala motståndskraften illustreras.



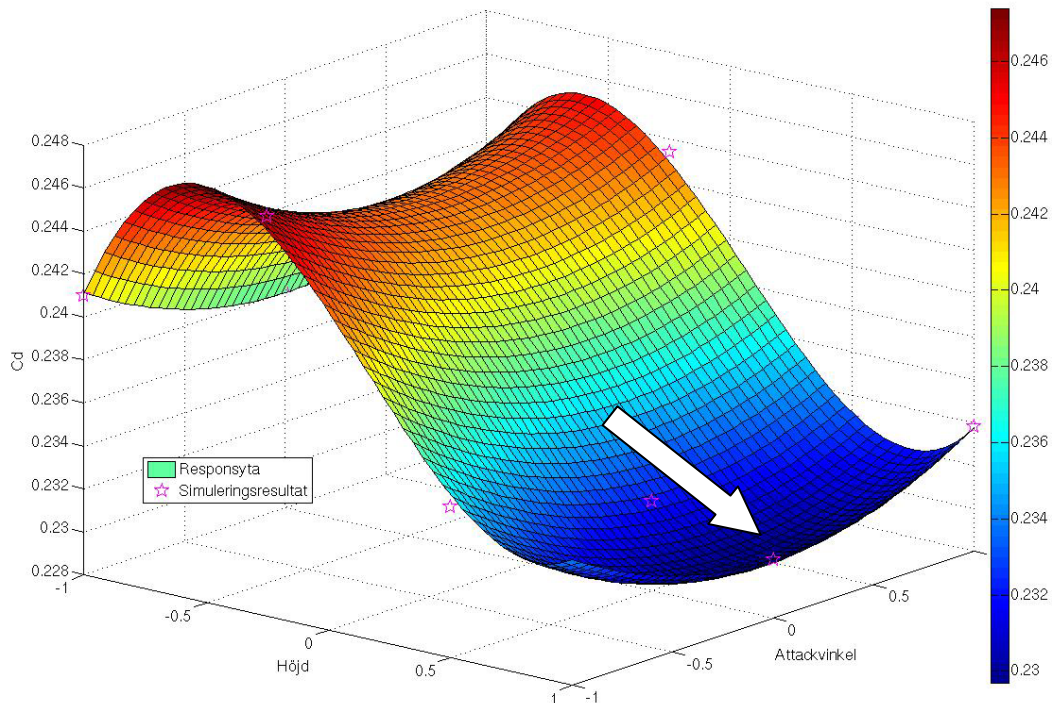
Figur 4.2.5 F_D för alla simulerade fall. Notera att skalan på y-axeln börjar på 3700 N.

Fallen 1, 4, 7, 10 och 11 visar på de största minskningarna av motståndskraften. Det är också dessa virvelgeneratorer som genererar mest motståndskraft i sig. Samtidigt minskas F_D för tåget så mycket att den totala motståndskraften sänks jämfört med F_D för referensmodellen.

C_L och F_L varierar relativt lite, se tabell 4.2.1. Lyftkraften varierar som mest 400 N mellan extremfallen (fall 3 och fall 11) vilket gör att instabilitet på grund av virvelgeneratorer kan uteslutas. Hade variationen hos lyftkraften varit större beroende på virvelgeneratorernas utseende, skulle optimeringen även tagit hänsyn till lyftkraften. Är lyftkraften stor, kan plötsliga sidovindar få tåget att spåra ur. Då lyftkraften för undersökt tåg ökar som mest med 287 N vilket är lite, relativt tåget, är detta inte ett bivillkor för optimeringen.

4.3 Den optimala virvelgeneratorn

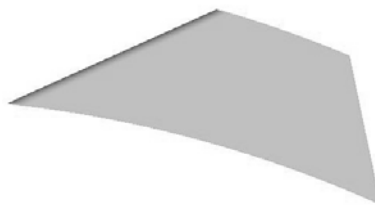
Efter genomförd optimering, se avsnitt 3.4, erhålls en responsyta. Denna visas i figur 4.3.1.



Figur 4.3.1 Baserat på 11 undersökningspunkter kan optimala värden avseende höjd och angreppsvinkel avläsas. Den minimerade punkten för C_D är här markerad med en pil.

Minimipunkten på ytan i figur 4.3.1 ger optimala värden på höjd och attackvinkel. Denna kombination minimerar luftmotståndet hos höghastighetståget. Givet vald geometrifamilj är följande värden optimala:

- Höjd: 34,5cm
- Angreppsvinkel: 36°
- C_D : 0,2300



Figur 4.3.2: Den optimala virvelgeneratoren enligt optimering.

C_L , F_L , C_D och F_D beräknas för den optimala virvelgeneratorn och genererar tabell 4.3.3 nedan.

Optimal virvelgenerator	
C_D	0,2334
F_D	4488,1 N
C_L	0,0064
F_L	1290,4 N

Tabell 4.3.3: Resultat för den optimala formen på virvelgeneratorerna.

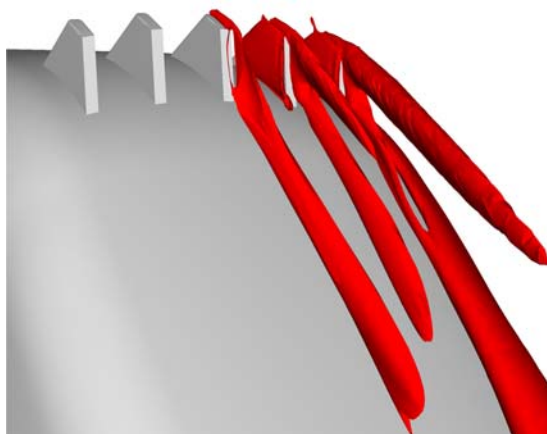
De simulerade resultaten skiljer sig med 1,7 % från de beräknade värdena. Skillnaden är acceptabel då den är såpass liten att den faller inom ramen för osäkerheten hos beräkningsmodellen. Den optimala virvelgeneratorn kan ändå anses ha de mått som responsytan anger.

5. Diskussion

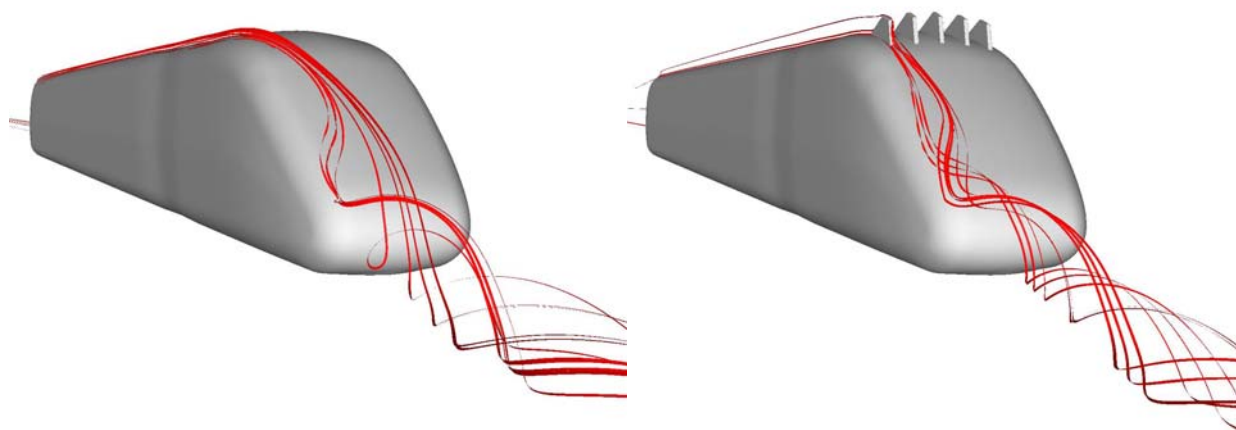
Detta kapitel innehåller förklaringar till de resultat som presenteras i föregående kapitel. Även reflektioner och förslag till vidare forskning behandlas.

5.1 Förändringar hos fluidgränsskiktet

Genom att applicera virvelgeneratorer påverkas strömningen runt en kropp på ett sådant sätt att luftmotståndet minskar. Virvelgeneratorerna skapar virvlar i strömningens huvudriktning vilka blandar luftlagren i närheten av tågytan, figur 5.1.1.

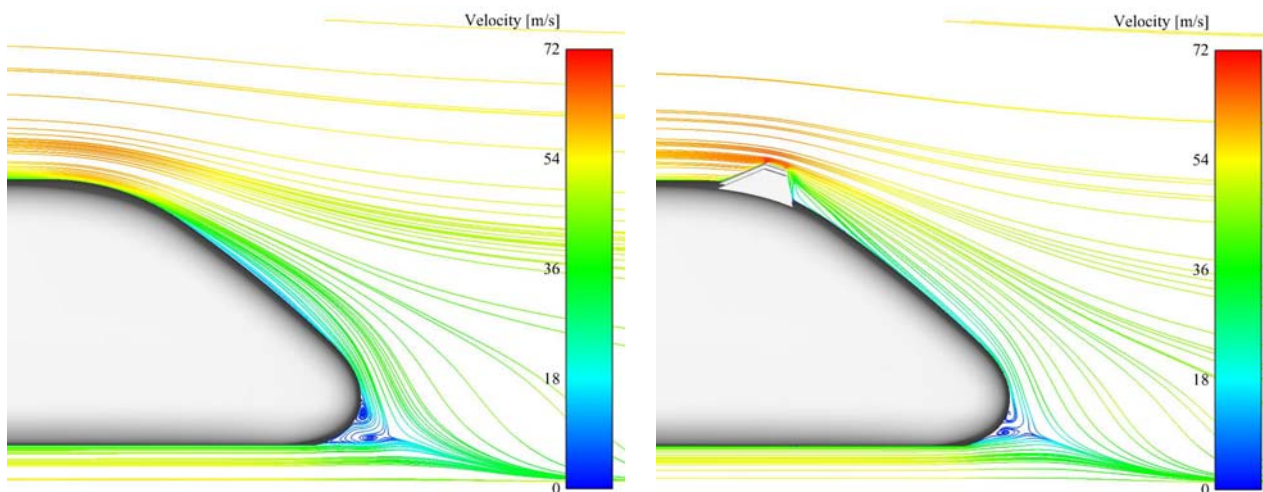


*Figur 5.1.1 Virvlar skapade av virvelgeneratorerna.
Virvlar visas endast på tågets högra sida..*



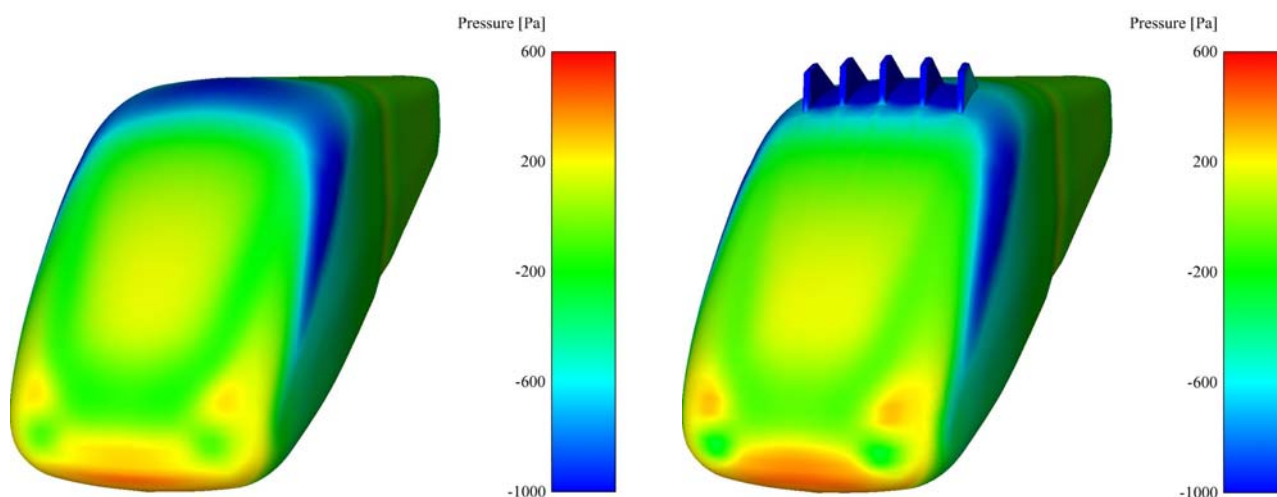
*Figur 5.1.2 De optimalt formade virvelgeneratorerna skapar virvlar som blandar luftlagren.
Strömlinjerna visar endast virvlarna från en av virvelgeneratorerna. Notera de stora
förändringarna hos strömlinjerna närmast tågekroppen i den högra bilden.*

Figur 5.1.2 visar hur strömningen runt tågekroppen ändras med virvelgeneratorer. Strömlinjerna som representeras i figuren får olika banor när virvelgeneratorer appliceras. Energi överförs från de energirika yttre luftlagren till fluiden nära tåget. Luften närmast ytan får kraft att följa tågytan längre och separationen förskjuts nedströms, se figur 5.1.3.



Figur 5.1.3 Strömlinjer bakom tåget. Linjerna är färgsatta efter luftens hastighet.

Vaken bakom tåget minskar då virvelgeneratorerna appliceras, se figur 5.1.3. Luftlagren nära tåggeometrin ligger tätare mot kroppen, vilket bidrar till den senare separationen. Vakens storlek minskar samtidigt som de lokalt låga hastigheterna bidrar till ett ökat tryck. Detta innebär att tryckskillnaden mellan fram- och baksida minskar vilket leder till ett minskat luftmotstånd, se även avsnitt 2.2.1-2.



Figur 5.1.4 Tryckfördelning på bakre änden av tåget, med och utan virvelgeneratorer. Notera det ökade trycket på geometrin med virvelgeneratorer.

Trycket på tågets bakre del påverkas av virvelgeneratorerna, se figur 5.1.4. Särskilt tydligt är tryckskillnaden på tågets nedkant. Runt virvelgeneratorerna skapas dock ett lägre tryck vilket ökar luftmotståndet. Detta visar på att virvelgeneratorerna själva ökar luftmotståndet. Samtidigt minskar luftmotståndet för hela geometrin. Beroende på virvelgeneratorernas utseende blir nettovinsten olika stor. Resultaten av de undersökta virvelgeneratorerna, se kapitel 4, visar att ändringen av formen hos virvelgeneratorerna påverkar luftmotståndet på två sätt. En del där luftmotståndet ökar med virvelgeneratorernas storlek och en del där luftmotståndet för tåggeometrin minskar. Den största nettovinsten erhålls då virvelgeneratorerna är cirka 35 cm höga. Separationen fördröjs längre med en högre virvelgenerator men nettovinsten blir mindre.

5.2 Reflektioner

Vi åstadkommer ett resultat som är mycket tillfredsställande i det avseende att målet med uppgiften har uppnåtts. Vi har funnit en form på en virvelgenerator som sänker tågets luftmotstånd trots att höghastighetståget ICE2 är relativt väl utformad ur aerodynamisk synvinkel. Det går alltså att manipulera det tjocka fluidgränsskiktet hos ett tåg på samma sätt som ett tunt gränsskikt. Även om en geometri är väl designat för att åstadkomma ett lågt luftmotstånd kan virvelgeneratorer bidra med ytterligare förbättringar.

Frågan är hur stor skillnad en minskning av motståndskraften på 483 N gör i praktiken. Är det värt att satsa på virvelgeneratorer av något slag till höghastighetståg, eller är skillnaden för liten för att dessa ska vara av intresse för marknaden? Resultaten visar att den bästa formen på virvelgeneratorerna ger en minskning med 9,8 % av det totala luftmotståndet. Det totala luftmotståndet på ett långt tåg med flera vagnar domineras dock av luftmotståndet orsakat av friktionskrafter. På ett längre tåg hade applicering virvelgeneratorer inte gjort en sådan stor skillnad då luftmotståndet orsakat av tryckskillnaden inte är lika betydande.

Det kan vara av intresse att titta på hur mycket den reducerade tryckskillnaden, orsakat av virvelgeneratorerna, kan minska energiförbrukningen på ett tåg. Det är rimligt att anta att det är möjligt att reducera energiförbrukningen lika mycket för ett X2000 som ett ICE2-tåg. Energiförbrukningen på ett X2000 är 11,7 kWh/km (SJ, 2007). Med våra resultat fås en reducerad motståndskraft på 483 N på grund av minskningen av tryckskillnaden. Detta ger en minskad energiförbrukning på 0,134 kWh/km, vilket motsvarar 1,15 %. Detta är ett intressant resultat då 1,15 % anses vara en stor reduktion.

Med större erfarenhet inom datorsimuleringar kan förmodligen resultatet i denna undersökning förfinas. Datorsimuleringar är en approximation av verkligheten och de simulerade resultaten är inte bättre än de antaganden modellen bygger på. Med ökad skicklighet och användarvana i de programvaror som används kan ett flertal felkällor undvikas. En av dessa är beräkningsnäten vars utseende ej ska påverka simuleringarna. Med mer erfarenhet kan celler koncentreras rätt från början. En annan möjlig felkälla är valet av turbulensmodell vid simuleringar i Fluent. Eftersom det finns ett stort antal olika modeller som passar till olika flödesfall är det svårt att besluta vilken av dessa som är mest lämplig att använda. Vi valde den turbulensmodell som vi ansåg vara bäst i vårt fall men rekommenderar att andra turbulensmodeller undersöks och sedan utvärderas mot experimentella resultat från en vindtunnel. Vi rekommenderar även att utföra simuleringar på hela tåget, istället för halva vilket är fallet i denna studie. Detta för att säkerställa att flödets karaktär över mittplanet ej förändras radikalt från våra simuleringar. Flödessimuleringar på tåg med full längd är även att rekommendera.

Koike et al (2004) har undersökt virvelgeneratorer till personbilar. Frågan vi ställde oss var om fluidgränsskiktet kunde manipuleras på samma sätt för höghastighetståg. Resultaten visar att för virvelgeneratorer som är lika höga som gränsskiktet erhålls liknande effekter som Koike et al (2004), vars virvelgeneratorer har en höjd som motsvarade gränsskiktet på en personbil. För virvelgeneratorer formade som en deltavinge är dessutom en attackvinkel på cirka 35° att föredra. Det finns dock ett stort utrymme för ytterligare studier inom området.

- I detta projekt optimerades delta-formade virvelgeneratorer. Andra former på virvelgeneratorer kan påverka strömningen annorlunda och kan vara av intresse att studera.

- Placeringen av virvelgeneratorer och dess påverkan på strömningen ryms inte i detta arbete men kan ha stort inflytande på luftmotståndet.
- Placering av virvelgeneratorer på sidorna av geometrin, kan det ge en minskning av luftmotståndet? Hur inverkar detta på fenomenet slipstream?
- Antal virvelgeneratorer kan optimeras, flera set av virvelgeneratorer med olika placering kanske kan minska luftmotståndet ytterligare.
- Det kan vidare vara intressant att undersöka huruvida sidovindsstabiliteten påverkas vid användandet av virvelgeneratorer.
- Då tåg ofta färdas i två färdriktningar är det intressant att undersöka hur virvelgeneratorer i båda ändar av tåget påverkar strömningen.
- Skapar virvelgeneratorerna oljud eller vibrationer som kan uppfattas som störande?

Referenser

Litteratur

Munson, Young Okiishi, 1998, Fundamentals of Fluid Mechanics 3 ed., John Wiley & Sons Inc

Versteeg H.K, Malalasekera W., 1995, An Introduction to fluid dynamics: the finite volume method, Longman

White, Frank M., 2005, Fluid Mechanics 6 ed., Boston, McGraw-Hill

Ansys ICEM-CFD, 2004, ICEM-CFD 5.1 Help Manual

Ansys Fluent, 2007, Fluent 6.3 Documentation

Artiklar

Hadenius Patrik, 2003, Virvlar ingen sett förut, Forskning & Framsteg
<http://www.fof.se/?id=03124>

Krajnović S, Aerodynamic Optimization of Vehicles Using Computational Fluid Dynamics and Response Surface Methodology, XXI International Automotive Conference SCIENCE & MOTOR VEHICLES Beograd 2001. Paper NMV0724.

Masaru Koike – Tsunehisa Nagayoshi – Naoki Hamamoto , 2004, Research on Aerodynamic Drag Reduction by Vortex Generators, Mitsubishi Motors

Santhanakrishnan A - Jamey D. Jacob, Effect of Regular Surface Perturbations on Flow Over an Airfoil, Dept. of Mechanical Engineering, University of Kentucky, Lexington, KY 40506

Svenningsson Andreas, 2003, Analysis of the Performance of Different Turbulence Models in a Stator Vane Passage_Flow, Chalmers University of Technology

Internetadresser

<http://www.ansys.com/products/icemcfd.asp>
Ansys ICEM-CFD, 2007

<http://www.bombardier.com/>
Bombardier, 2007

<http://www.ensight.com/>
Ensign, 2007

http://oea.larc.nasa.gov/PAIS/Concept2Reality/flow_control.html
Gail S. Langevin, Langley Research and Development Centre, NASA Official

<http://www.sj.se/>
Statens Järnvägar, 2007

Bilder

Figur 1.5.1 Santhanakrishnan A - Jamey D. Jacob, Effect of Regular Surface Perturbations on Flow Over an Airfoil, Dept. of Mechanical Engineering, University of Kentucky, Lexington, KY 40506

Figur 1.6.2 http://oea.larc.nasa.gov/PAIS/Concept2Reality/flow_control.html
Gail S. Langevin, Langley Research and Development Centre, NASA Official

Filförteckning

Det har producerats en mängd filer som använts i arbetet. Dessa filer är samlade på tre DVD-skivor. Skiva nummer ett innehåller beräkningsnät. Skiva två innehåller Fluent-simuleringar, .cas- och .dat-filer. Skiva tre innehåller de beräkningsnät projektet utgått ifrån.

- [-] DVD1 mesh och blocking
 - [+] Fall 00 Utan Virvelgeneratorer
 - [+] Fall 01 1delta 24grader
 - [+] Fall 02 0,6delta 24grader
 - [+] Fall 03 0,2delta 24grader
 - [+] Fall 04 1delta 35grader
 - [+] Fall 05 0,6delta 35grader
 - [+] Fall 06 0,2delta 35grader
 - [+] Fall 07 1delta 46grader
 - [+] Fall 08 0,6delta 46grader
 - [+] Fall 09 0,2delta 46grader
 - [+] Fall 10 1,25delta 24grader
 - [+] Fall 11 1,25delta 35grader
 - [+] Fall 12 1,25delta 46grader
- [-] DVD2 Fluent-simuleringar case och dat
 - [+] Fall 00 Utan Virvelgeneratorer
 - [+] Fall 01 1delta 24grader
 - [+] Fall 02 0,6delta 24grader
 - [+] Fall 03 0,2delta 24grader
 - [+] Fall 04 1delta 35grader
 - [+] Fall 05 0,6delta 35grader
 - [+] Fall 06 0,2delta 35grader
 - [+] Fall 07 1delta 46grader
 - [+] Fall 08 0,6delta 46grader
 - [+] Fall 09 0,2delta 46grader
 - [+] Fall 10 1,25delta 24grader
 - [+] Fall 11 1,25delta 35grader
 - [+] Fall 12 1,25delta 46grader
- [-] DVD3 Originalgeometri och mesh till transienta beräkningar
 - [-] Geometri utan och med Optimal virvelgenerator för transienta beräkningar
 - [+] Med virvelgeneratorer
 - [+] Utan Virvelgeneratorer
 - [-] Original geometrier
 - [+] Fungerande geometri
 - [+] Icke fungerande geometri