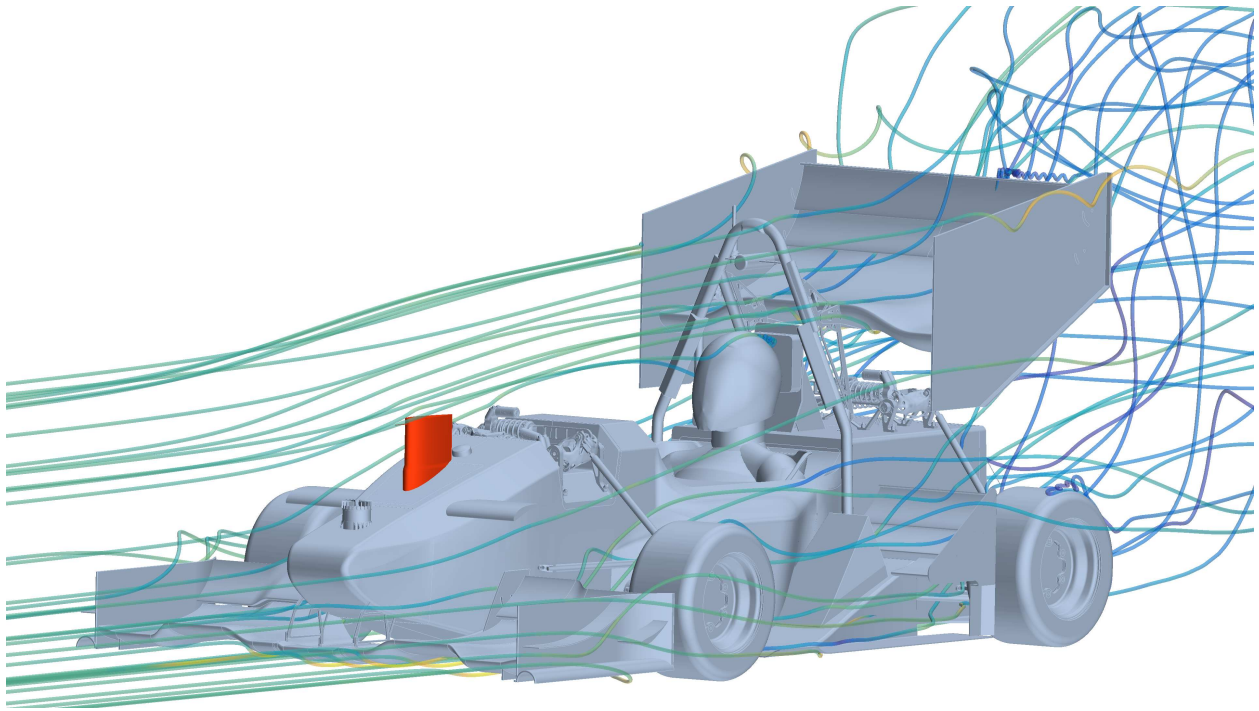




CHALMERS



Design, tillverkning och testning av yaw-prob för formelbil

Kandidatarbete inom mekanik och maritima vetenskaper

Hjalmar Lindqvist
Charlie Nilsson
Rasmus Olausson
Björn Olsson
Per Samuelsson
Marcus Varvne

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2022

www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2022:01

Design, tillverkning och testning av yaw-prob för formelbil

Hjalmar Lindqvist
Charlie Nilsson
Rasmus Olausson
Björn Olsson
Per Samuelsson
Marcus Varvne



CHALMERS

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2022

Design, tillverkning och testning av yaw-prob för formelbil
Hjalmar Lindqvist, Charlie Nilsson, Rasmus Olausson, Björn Olsson,
Per Samuelsson, Marcus Varvne

© Hjalmar Lindqvist, Charlie Nilsson, Rasmus Olausson, Björn Olsson,
Per Samuelsson, Marcus Varvne, 2022.

Handledare: Erik Josefsson, avdelningen för fordonsteknik och autonoma system
Examinator: Professor Simone Sebben, avdelningen för fordonsteknik och autonoma
system

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Avdelningen för fordonsteknik och autonoma system
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslag: Yaw-prob monterad på CFS-bilen i simuleringsprogrammet STAR CCM+.

Typsatt i L^AT_EX
Göteborg, Sverige 2022

Abstract

During race car development there is a large focus on the car's aerodynamic capabilities whether it is drag or lift. The aim is to use the overall shape of the car when moving through the air to enhance the performance of the vehicle. One instrument which guides this development is the yaw probe. A yaw probe measures the yaw (the angle of attack in the horizontal plane) against the car which can vary depending on wind, corner radius, speed and more. The data gathered by this instrument is useful for knowing which yaw angles are most common on a race track which can be used for further CFD analysis and development of the car.

The purpose of this study is to design, manufacture, calibrate and test a yaw probe to be used by the Chalmers Formula Student team. Since the team develops a formula car each year the aim is to produce a functioning yaw probe which can be used by the team during development of future cars. This is done by validating a concept probe using multiple flow simulations in CFD and then 3D-printing the probe. Electronics are then installed, and finally the probe is calibrated using the Chalmers wind tunnel.

The results show a functioning yaw probe which can measure yaw with high precision despite the low manufacturing cost of 1700 SEK. The measurements are done without influencing the Chalmers Formula Student car's aerodynamic properties. The design is made with component accessibility in mind which is important as the data has to be easily retrievable and the battery easily replaceable.

Keywords: CFD, Chalmers Formula Student, yaw, yaw probe, wind tunnel

Sammandrag

Under fordonsutveckling inom motorsport läggs stort fokus på bilens aerodynamiska prestanda vare sig det är bilens luftmotstånd eller lyftkraft. Målet är att använda bilens utformning för att förbättra dess prestanda när den rör sig genom luften. Ett instrument som vägleder denna utveckling är yaw-proben. En yaw-prob mäter luftens anfallsvinkel mot bilen i det horisontella planet, som kan variera beroende på vind, kurvradie, hastighet med mera. Datan som insamlas av proben är användbar för att veta vilka vinklar som är mest förekommande på en bana för vidare analyser i CFD-mjukvara och utveckling av bilen.

Syftet med studien är att designa, konstruera, kalibrera och testa en yaw-prob för att användas av Chalmers Formula Student-lag. Eftersom laget utvecklar en formelbil varje år är målet att konstruera en fungerande yaw-prob som kan användas vid utveckling av framtida bilar. Detta görs genom att en konceptprob valideras med flödessimuleringar i CFD, och sedan skrivs ut med 3D-skrivare. Elektronik installeras och slutligen kalibreras proben i Chalmers vindtunnel.

Resultatet visar en fungerande yaw-prob som kan mäta yaw-vinkeln med en hög noggrannhet trots den låga konstruktionskostaden på 1700 SEK. Mätningarna görs utan att påverka Chalmers Formula Student bils aerodynamiska egenskaper. Designen är gjord för att möjliggöra enkel åtkomst till alla delar, vilket är viktigt då det ska vara lätt att extrahera data och byta batteri.

Nyckelord: CFD, Chalmers Formula Student, yaw, yaw-prob, vindtunnel

Förord

Författarna vill rikta ett stort tack till vår handledare Erik Josefsson, doktorand på mekanik och maritima vetenskaper, avdelningen för fordonsteknik och autonoma system. Erik har varit till stor hjälp genom sin kunskap och stora vilja att lära ut och vägleda gruppen. Detta har underlättat arbetet oerhört.

Vidare vill vi också tacka vår examinator professor Simone Sebben, avdelningschef för fordonsteknik och autonoma system. Under arbetet har Simone kommit med upplysande kunskap under inspirerande föreläsningar och deltagit på handledarmöten med nya synvinklar på studien.

Avslutningsvis vill vi tacka CFS för deras engagemang under konstruktionsprocessen. CFS har bidragit med både material, kunskap och lokal för att underlätta arbetsprocessen. Denna assistans har varit mycket värdefull.

Hjalmar Lindqvist
Charlie Nilsson
Rasmus Olausson
Björn Olsson
Per Samuelsson
Marcus Varvne
Göteborg, maj 2022

Förkortningar och nomenklatur

Airfoil	Term på engelska som kan översättas till vingprofil, alternativt en vingformad kropp.
CAD	Computer Aided Design
CATIA V5	CAD-mjukvara
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFS	Chalmers Formula Student
CPU-timmar	Beräkningstimmar som utförs av processorkärnor.
DD	Decimal Degrees
DDM	Degrees Decimal Minutes
Downforce	Den kraft som trycker ett fordon mot underlaget som följd av fordonets aerodynamiska utformning.
NMEA	National Marine Electronics Association
PLA	Polylactic acid, en vanlig plasttyp.
STAR CCM+	CFD-mjukvara för simulering av strömningsmekanik.
θ	Yaw-vinkel
v	Flödeshastighet
ΔP	Tryckskillnad över en vingprofil.
C_D	Luftmotståndskoefficient
C_L	Lyftkoefficient
Re	Reynoldstal
y^+	Dimensionslös längdfunktion för beskrivning av gränsskikt.
μ	Viskositet
ν	Kinematisk viskositet

Innehåll

1	Introduktion	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	2
1.3	Avgränsning	2
2	Teori	3
2.1	Navier-Stokes och RANS-ekvationer	3
2.2	Reynoldstal	3
2.3	Gränsskikt	4
2.4	Randvillkor	4
2.4.1	No-slip	5
2.4.2	Inlopp och utlopp	5
2.4.3	Symmetri	5
2.5	Pitot-rör	6
2.6	Lyft- och luftmotståndskoefficient	6
2.7	Separation	7
2.8	Metoder för mätning av yaw-vinkel	7
2.8.1	Vindflöjelprob	7
2.8.2	Multihålsprob	8
2.8.3	Airfoil-prob	8
3	Förstudie och konceptval	11
3.1	Konceptkrav och mätmetoder	11
3.2	Val av koncept	11
4	2D-simuleringar och val av vingprofil	15
4.1	Metod och genomförande	15
4.1.1	Mesh- och fysikinställningar samt validering av modellen	15
4.1.2	Simulering av de tre vingprofilerna	16
4.2	Resultat samt val av vinge	16
5	3D-simulering och slutgiltigt konceptval	23
5.1	3D-simulering av airfoil-prob och multihålsprob	24
5.1.1	Mesh- och fysikinställningar	24
5.1.2	Resultat och slutgiltigt konceptval	25
5.2	Simulering av CFS:s bil med prob	26

6	Elektronik och mjukvara	29
6.1	Arduino	29
6.2	Trycksensorer	29
6.3	GPS-modul och SD-kortläsare	31
6.4	Mjukvaruutveckling	31
6.4.1	Mjukvara till tryckmätning	31
6.4.2	Mjukvara till GPS	32
6.4.3	Loggning av data	33
6.5	Kod och kopplingsschema	34
7	Tillverkning	35
7.1	CAD-modellering	35
7.2	3D-skrivning, gängmontering och slipning	37
7.3	Montering	38
8	Kalibrering i vindtunnel	41
8.1	Kalibrering av sensorer	41
8.2	Vindtunnelns utformning och påverkan	42
8.3	Placering och rotation av prob	42
8.4	Vindtunnelsvep	44
8.5	Parametrisering av mätdata	46
9	Resultat och diskussion	49
9.1	Färdig produkt	49
9.2	Validering av krav och önskemål	50
9.3	Felkällor och mätfel	51
9.3.1	Felkällor i konstruktion	51
9.3.2	Kalibreringsfel	51
9.4	Vidareutveckling	52
9.5	Samhälleliga och etiska aspekter	53
9.6	Slutsats	53
	Referenslista	55
A	Arduinokod	I
B	MATLAB-kod	VII

1

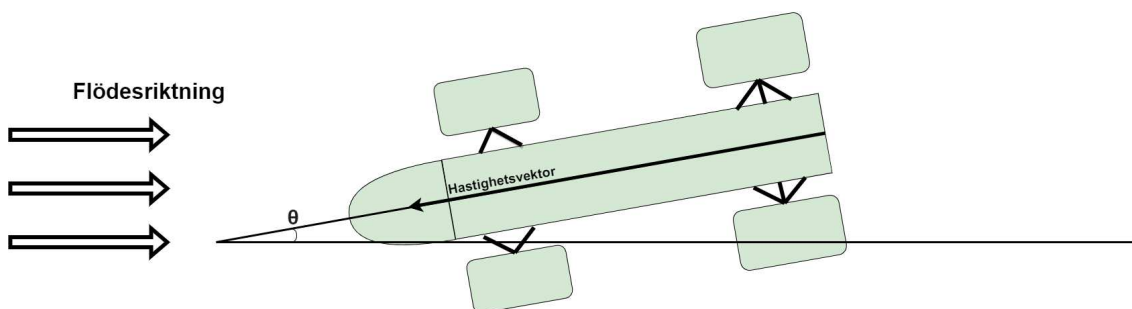
Introduktion

1.1 Bakgrund

Fenomenet ”downforce”, kraften som skapas vid ledning av luftflöde över en ving används flitigt inom motorsport. Kraften kan skapas genom att använda en upp- och nervänd flygplansvinge vilket genererar ett undertryck under vingen. Därmed sugs bilen ned i marken och skapar en större normalkraft mellan däck och underlag [1]. Större normalkraft leder i sin tur till en större friktionskraft, vilket gör att bilen kan bibehålla högre hastighet vid kurvtagning.

1968 nyttjades vingar för första gången i Formel 1 av stallet Lotus i Monacos Grand Prix [2]. Banan som var liten med många kurvor krävde maximalt grepp mellan däck och vägbana. Vingar som några år tidigare hade introducerats i andra racingklasser användes nu för att öka bilens kurvtagningshastighet på den slingrande banan. Stallens förståelse för aerodynamik var primitiv jämfört med idag, men utvecklades i högt tempo och vid början av 2000-talet kunde bilar producera upp emot 3g lateral acceleration i stabilt luftflöde vid kurvtagning [3].

Ett fördelaktigt luftflöde över bilen är väsentlig för maximal samt stadig downforce. Det finns många faktorer som måste tas i åtanke, däribland yaw-vinkel. Yaw-vinkel kan förklaras som luftflödets anfallsvinkel mot bilen i ett horisontellt plan och kan variera beroende på specifika svängradier och sidvind. Se figur 1.1.



Figur 1.1: Yaw-vinkel θ mot flödesriktning

Oväntade yaw-vinklar under körning kan försämra bilens aerodynamiska effektivitet och minska bilens downforce vilket resulterar i instabilitet vid kurvtagning. För att minska risken för detta är det därför viktigt att en bil testas och simuleras med olika

yaw-vinklar för att reducera risken för oväntade effekter vid körning. Detta görs i CFD-programvara eller i en vindtunnel där vinkeln på luftflödet kan ändras och på så sätt mäta variationerna i downforce och luftmotstånd hos bilen. Ett användbart instrument för att hjälpa design och utveckling för detta problem är yaw-proben. En yaw-prob mäter bilens yaw-vinkel under körning och ger information om fördelningen av yaw-vinklar, vilket sedan kan användas vid vidare simuleringar.

Prestandan hos bilen CFS konstruerar är i stor utsträckning beroende av downforce, och laget kan därför gynnas av en yaw-prob vid utvecklingen. Tävlingarna som bilen ska köras i testar bland annat bilens kördynamik samt kurvtagning och i dessa fall är det viktigt att bilens aerodynamiska design fungerar korrekt för att kunna uppnå så snabba varvtider som möjligt [4]. Komplicerade yaw-prober används av dagens Formel 1-stall men är dyra och därför inte ett alternativ för CFS att använda sig av. Därför behövs ett billigare alternativ som kan utföra samma grundläggande mätning [5].

1.2 Syfte

Syftet med projektet är att designa och konstruera en yaw-prob som kalibreras och testas i Chalmers vindtunnel. Målet är att den fungerande yaw-proben ska presenteras för Chalmers Formula Student som sedan ska kunna nyttja den som stöd vid utveckling av bilar.

1.3 Avgränsning

Projektet genomförs på en termin (från 21 januari 2022 till 25 maj 2022). Detta innebär att projektets alla delmoment måste begränsas för att hålla tidsplanen. Till exempel behövs ett flertal tyngre CFD-simuleringar i programvaran StarCCM+ göras. Dessa simuleringar kan ta lång tid och därför bokades tid på Chalmers studentkluster för att kunna utföra dessa beräkningar inom projektets tidsram. Totalt kunde 5000 CPU-timmar per månad nyttjas.

Idag finns det flera lösningar för mätning av yaw-vinkel, men dessa är ofta kostsamma. Kandidatarbetets budget är flytande och en exakt summa som kan spenderas är inte bestämd. Dock kräver alla inköp ett godkännande från examinatorn.

Eftersom CFS:s bil ej är färdigställd finns det ingen tillgång till en fysisk bil under utvecklingen av proben. Därför begränsas arbetet till CAD-modeller av bilen vid utveckling yaw-proben. Proben utvecklas som en fristående, separat enhet från bilens inre system. Det innebär att proben inte kommer att integreras i CFS-bilens dator och elsystem som redan finns ombord. Istället kommer en fristående processor och strömkälla användas vid mätning och loggning av data.

2

Teori

I detta kapitel beskrivs olika teorier som är kopplade till strömning. Samtliga av dessa teorier används för att kunna genomföra simuleringar och test i vindtunnel.

2.1 Navier-Stokes och RANS-ekvationer

Navier-Stokes ekvationer är ett system av differentialekvationer inom strömningsmekanik [6]. Ekvationerna förklarar fluidens rörelsemängd i relation till tryckkrafter och viskösa krafter och kan tillsammans med kontinuitetsekvationen användas för att bestämma flödesfältet. Navier-Stokes samt kontinuitetsekvationen lyder

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} \right) = -\vec{\nabla} p + \mu \vec{\nabla}^2 \vec{v} + \rho \vec{g} \text{ och}$$
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\vec{\nabla} \cdot \rho \vec{v}) = 0.$$

I ekvationerna är \vec{v} hastighetsfältet, $\vec{\nabla}$ är divergensen, p tryckfältet, μ och ρ fluidens viskositet respektive densitet. \vec{g} är gravitationsaccelerationen.

Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) är en tidsmedelvärdering av Navier-Stokes ekvationer och skrivs

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\bar{v}} = 0$$
$$\rho \frac{\partial \vec{\bar{v}}}{\partial t} = -\vec{\nabla} p + \mu \nabla^2 \vec{\bar{v}} + \rho \vec{g}.$$

Ekvationerna är mycket lika Navier-Stokes med skillnaden att $\vec{\bar{v}}$ är det tidsmedelvärdade hastighetsfältet. Syftet med dessa ekvationer är att urskilja de turbulenta delarna av flödet för att därefter tillämpa en turbulensmodell [7]. Detta förenklar beräkningsarbetet, då beräkningar för samtliga transienta komponenter i den numeriska lösningen av Navier-Stokes ekvationerna kan undvikas. CFD-mjukvara löser dessa förenklade ekvationer.

2.2 Reynoldstal

Reynoldstalet är ett dimensionslöst tal som används för att kategorisera olika former av viskösa flöden [8]. Ett flöde med högt Reynoldstal är ostrukturerat och kaotiskt

och kan på så vis kategoriseras som ett turbulent flöde. Ett lågt Reynoldstal tyder istället på ett ordnat och strukturerat flöde, det vill säga ett laminärt flöde. Reynoldstalet kan även användas för att förutse övergången från laminärt till turbulent flöde. Ekvationen för Reynoldstal (Re) skrivs som

$$Re = \frac{vL}{\nu} = \frac{\rho v L}{\mu}.$$

Där v är flödets typiska hastighet, L den karakteristiska längden, μ fluidens viskositet, ν fluidens kinematiska viskositet och ρ fluidens densitet.

2.3 Gränsskikt

När en fluid strömmar längs en yta ger det upphov till tre gränsskikt. Gränsskikten består av det viskösa underskiktet, bufferlager-skiktet och det logaritmiska skiktet. I figur 2.1 kan variabeln y^+ observeras. y^+ är ett dimensionslöst avstånd från ytan. De olika gränsskikten avgränsas beroende på vilket värde y^+ har vid olika höjder från ytan. Detta beräknas enligt följande formel [9]:

$$y^+ = \frac{y \cdot v_T}{\nu}$$

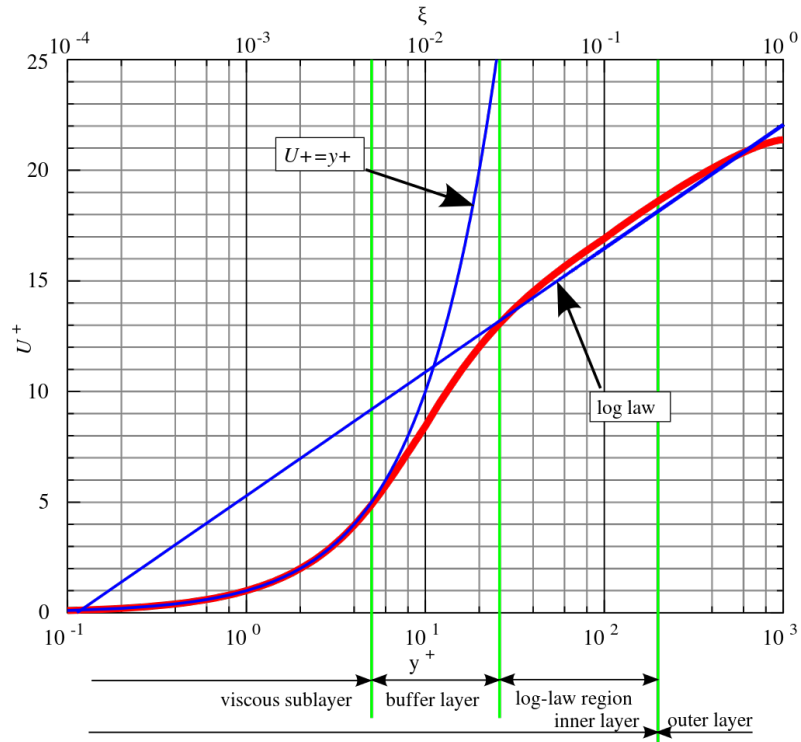
Där y är höjden över ytan, v_T är friktionshastigheten och ν är den kinematiska viskositeten. Det är viktigt att flödet antingen befinner sig i det viskösa underskiktet där u^+ , som är den dimensionslösa hastigheten som är parallell med väggen, är lika med y^+ eller i det logaritmiska skiktet. Dessa områden kan modelleras med ekvation 2.1 inom det viskösa underskiktet och ekvation 2.2 inom det logaritmiska skiktet, där κ är Kármáns konstant och B är en konstant. Figur 2.1 visualiserar modellernas uppskattning av den dimensionslösa parallella flödehastigheten u^+ för olika y^+ [9].

$$u^+ = y^+ \tag{2.1}$$

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B \tag{2.2}$$

2.4 Randvillkor

För att lösa de partiella differentialekvationerna från Navier-Stokes behövs randvillkor. Flera sorters randvillkor används inom strömningsmekanik och CFD för att beskriva verkligheten.



Figur 2.1: Modeller av u^+ (blå linjer) jämfört med sanna värdet (röd linje) för olika y^+ i gränsskikten [10].

2.4.1 No-slip

Randvillkoret "No-slip" beskriver fluidens beteende nära en vägg. Randvillkoret sätter krav på att hastigheten i övergången mellan väggen och fluiden inte kan vara diskontinuerlig [11]. Detta leder till följande villkor:

$$v_{\text{fluid}} = v_{\text{vägg}}.$$

2.4.2 Inlopp och utlopp

Vid alla inlopp och utlopp måste hastigheten V , trycket p och temperaturen T vara kända för alla tidpunkter. Ofta sätts dessa randvillkor på ytor placerade långt ifrån objekten som ska simuleras [11]. Detta underlättar också då fördelningarna för V , p och T kommer vara homogena över hela inloppet eller utloppet.

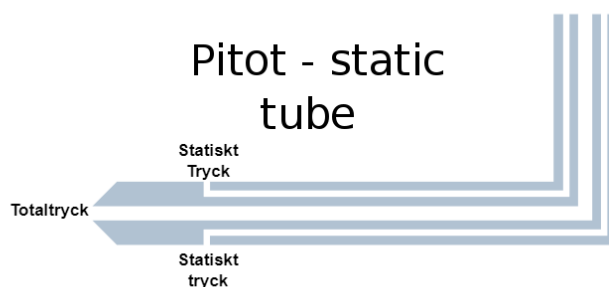
2.4.3 Symmetri

Ytterligare ett användbart randvillkor är symmetrivillkor. Ett symmetrivillkor på en yta innebär att flödet på båda sidor av ytan kommer att vara symmetriskt [11]. Ofta används detta på ytor i en vindtunnel som inte utgör inlopp eller utlopp.

2.5 Pitot-rör

Pitot-rör används för att mäta hastigheten i ett luftflöde. Längs rörets mantelyta finns flertal hål. Ytterligare ett hål hittas vid rörets spets. Figur 2.2 ger exempel i form av en skiss på ett typiskt Pitot-rör. Från hålen på mantelytan kan det statiska trycket mätas. Från centrumhålet uppmäts det totala trycket (stagnationstrycket). Detta tryck kan tillsammans med det statiska trycket användas för att räkna ut det dynamiska trycket. Dynamiskt tryck (Δp) är skillnaden mellan totalt och statiskt tryck vilket kan användas för att beräkna hastigheten v [12].

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$



Figur 2.2: Skiss av ett Pitot-rör [13].

2.6 Lyft- och luftmotståndskoefficient

De två dimensionslösa koefficienterna för lyftkraft samt luftmotståndskraft för en vinge formuleras enligt följande två ekvationer [8].

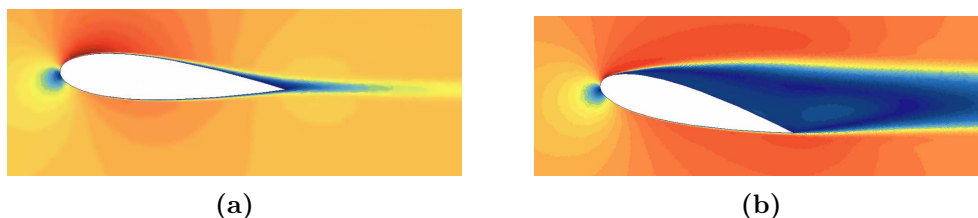
$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho v^2 A_p}$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho v^2 A_p}$$

Där C_L , C_D är lyft- och luftmotståndskoefficienter, F_L vingens lyftkraft, F_D luftmotstånd, A_p är vingens frontalarea, ρ luftens densitet, v luftflödets hastighet.

2.7 Separation

För höga anfallsvinklar kommer luftflödet runt en vinge att separera och bilda en turbulent vak bakom kroppen [8]. Detta illustreras i figur 2.3. Vid separation kommer C_L att sjuka kraftigt samtidigt som C_D ökar markant.



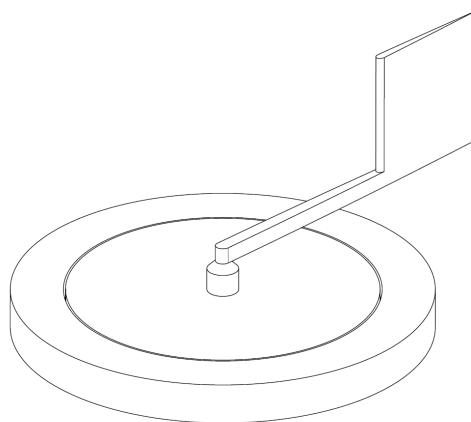
Figur 2.3: Taget ur CFD: Figur (a) visar hastighetsfältet runt en vinge som inte har separerat. I figur (b) visas hastighetsfältet runt en vinge som har separerat.

2.8 Metoder för mätning av yaw-vinkel

Det finns flera sätt att mäta anfallsvinkeln på det inkommande flödet. Här beskrivs tre metoder som ansågs relevanta för arbetet.

2.8.1 Vindflöjelprob

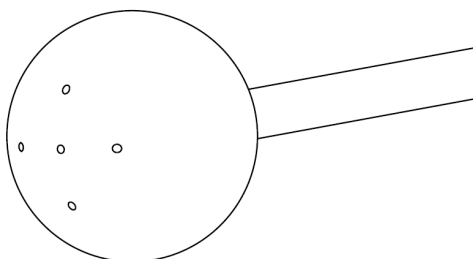
En vindflöjelprob består av en fast del och en roterande del, ofta utformad som en mindre vinge. Den roterande delen placeras i luftflödet och orienteras därefter. Därmed kan flödet relativt fordonet uppskattas i en riktning genom att mäta vinkeln mellan den fasta och roterande delen [14].



Figur 2.4: Vindflöjelprob.

2.8.2 Multihålsprob

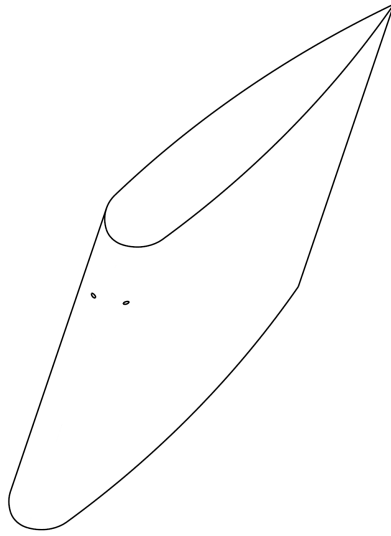
Framändan på en multihålsprob består oftast av en sfär eller halvsfär. På ytan av framändan finns mindre hål som kopplas till tryckmätare. När proben placeras i ett flöde bildas en tryckprofil på ytan. Beroende på flödets riktning och hastighet ändras tryckprofilen, och genom att mäta tryck och tryckskillnader på olika områden av ytan kan flödesriktning bestämmas. Mätområde och exakthet på mätningar kan anpassas genom att variera antalet hål samt yt- och hålgeometri. Multihålsprober kan utformas för att mäta det relativa flödet i flera riktningar samtidigt [14].



Figur 2.5: Multihålsprob.

2.8.3 Airfoil-prob

Airfoil-proben fungerar på ett liknande sätt som flerhålsproben. På airfoil-proben placeras hålen på en vingprofil. Detta görs eftersom vingprofilen kan skapa stora tryckdifferenser även vid låga hastigheter, vilket kan underlätta mätning. Eftersom hålen placeras på en profil kan flödet endast mätas i ett plan. Med hjälp av tryckskillnaden mellan de två hålen och lufthastigheten som mäts med ett Pitot-rör kan man räkna ut yaw-vinkeln. [14].



Figur 2.6: Airfoil-prob.

3

Förstudie och konceptval

Innan utvecklingsarbetet av proben kunde påbörjas, skapades en överblick över arbetsprocessen. Det innefattade att undersöka vad som var möjligt att åstadkomma och hur detta skulle åstadkommas, samt vilka restriktioner som fanns i form av budget, kunskap med mera. Dessutom behövdes olika metoder för mätning av yaw-vinkel identifieras samt utvärderas.

3.1 Konceptkrav och mätmetoder

Kravspecifikationen togs fram för att skapa en konceptutvärderingsgrund. Kraven och önskemålen baseras i huvudsak på avvägningar och samtal med handledare. Listan på kraven kan ses i figur 3.1. Kraven delades upp i sex olika kategorier. I figuren syns också önskemål och kontrollmetod för de olika kraven, förutsatt att dessa finns. Tre koncept för mätning av yaw-vinkel valdes ut som möjliga metoder i förstudien. Dessa var vindflöjelproben, multihålsproben samt airfoil-proben som finns beskrivna i sektion 2.8.

3.2 Val av koncept

Baserat på kravet om att proben ska vara okänslig till dynamik som ej är relaterad till vindriktning, uteslöts vindflöjelproben. Detta på grunden att det fanns en potentiell risk att proben skulle kunna ge utslag vid kurvtagning eller på grund av vibrationer. Vindflöjelproben, som innehöll rörliga delar, ansågs även vara mer komplicerad i konstruktionen jämfört med prober vars vinkeluppskattningar baseras på mätningar av lufttryck. Den komplicerade konstruktionen ansågs förhindra kostnadsminimering och vindflöjelproben uteslöts därför också av denna anledning.

Baserat på konstnadsönskemålet fastställdes att så få tryckmätningssensorer som möjligt skulle användas. Detta kombinerades med problemformuleringen som uppgav att endast yaw-vinkeln skulle mätas. Med andra ord behövdes bara vinkeln mätas i det horisontella planet. Av denna anledning anpassades flerhålsprobkonceptet genom att endast ta hänsyn till mätpunkterna belägna till höger och vänster om det centrala hålet.

För att minimera kostnaderna önskades användandet av billiga sensorer. Det var av denna anledning viktigt att formen på proben gav upphov till tryckprofiler med så stora tryckdifferenser som möjligt, särskilt vid lägre hastigheter eftersom billigare

sensorer i regel har en sämre noggrannhet. Det var även viktigt att validera att proben kunde ge goda mätningar i hela vinkelomfånget.

För att avgöra om airfoil-proben eller multihålsproben var bäst lämpad genomfördes simuleringar på båda koncepten. Detta redovisas i kapitel 5, men först behövde den bästa vingprofilen för airfoil-proben, som skulle jämföras mot multihålsproben, hittas. Detta gjordes med hjälp av 2D-simuleringar och förklaras i kapitel 4.

Kategori	Kriterie	Krav	Önskemål	Kontroll	Kommentar
Prestanda					
	Mätningsofång.	±15°	±20°	Validering i simulering.	Mätningsofång uppskattat av handledare.
	Accepterat mätningfel.	≤1°	Minimering.	Sensorkravställning i simulering.	Accepterat mätningsofel uppskattat av handledare. I simulering av probprofiler under olika förhållanden avläses tryckdifferential, utifrån detta bestäms upplösningskrav för sensorer.
	Kontinuerlig mätning och loggning.	Ja.			Data ska kunna samlas flygande och vid avläsning återges för en hel körning. Tiden mellan mätningar ska vara tillräckligt liten för ge användbar data vid godtyckligt tillfälle.
	Batteridrift.	Ja.			
	Batteritid.	30 minuter.	En testdag (ca 4h).	Test.	30 minuter anses vara den absolut lägsta tiden som krävs för att genomföra mätningar.
	Okänslig för dynamik ej relaterat till relativ vindriktning.	Ja.			Mätningar ska exempelvis inte påverkas av vibrationer, lateral acceleration eller dagligt lufttryck.
Funktion					
	Demonterbar.	Ja.			Hölje ska kunna separeras och återmonteras, åtkomst till komponenter ska inte kräva destruktion.
	Strömbrytare.	Ja.			Batterisparande syfte.
	Informationsavläsning.	Inom 15 minuter.	Minimering.		
	GPS-modul.		Ja.		Kan underlätta för att identifiera var en mätning gjordes, hastighet etc.
	Accelerometer.		Ja.		Kan exempelvis underlätta analys vid kurvtagning.
	Möjlighet att byta batteri.	Ja.	Ja, utan omfattande sårmontering.		
	Uppladdningsbart batteri.		Ja.		
	Monteringslösning.	Enkel på- och avmontering.			
Vikt, utformning					
	Vikt.	<3 kg (1% av bilvikten).		Vägning.	Lös uppskattning. I syfte att inte alltför mycket påverka fordonsdynamiken.
	Utformning och placering.	Får ej märkbart störa förarsikten.			
Miljö					
	Vattentålighet.	Ska kunna användas i lättare regn.			
	Vibrationer.	Mätningar skall ej märkbart påverkas av vibrationer.			Ska kunna klara det typiska underlaget som finns på banor, exempelvis asfalt. Ska inte påverkas av motorvibrationer.
	Lägsta arbetstemperatur.	>0 °C			Fordonet antas endast användas i plusgrader.
	Högsta arbetstemperatur.	40 °C			
	Högsta hastighet.	80 km/h.			Banorna saknar långa raksträckor och fordon optimeras efter accelerationsprestanda.
Användning					
	Informationsavläsning.	Måste gå att avläsa på testbanan.		Test.	Exempelvis i en bärbar dator direkt efter genomförd körning.
Kostnad					
	Kostnad för inköp.	Minimering.			

Figur 3.1: Kravspecifikationslista.

4

2D-simuleringar och val av vingprofil

Innan flerhålsproben kunde jämföras med airfoil-proben, behövdes den bästa vingprofilen till airfoil-proben väljas. Med "den bästa" menas den vingprofil som ger upphov till störst tryckskillnad över vingen samt är tillräckligt stor för att rymma elektroniken som krävs. Dessutom behövde vingens separationsvinkel vara stor för att maximera mätområdet enligt kraven. Detta gjordes genom CFD-simuleringar i 2D.

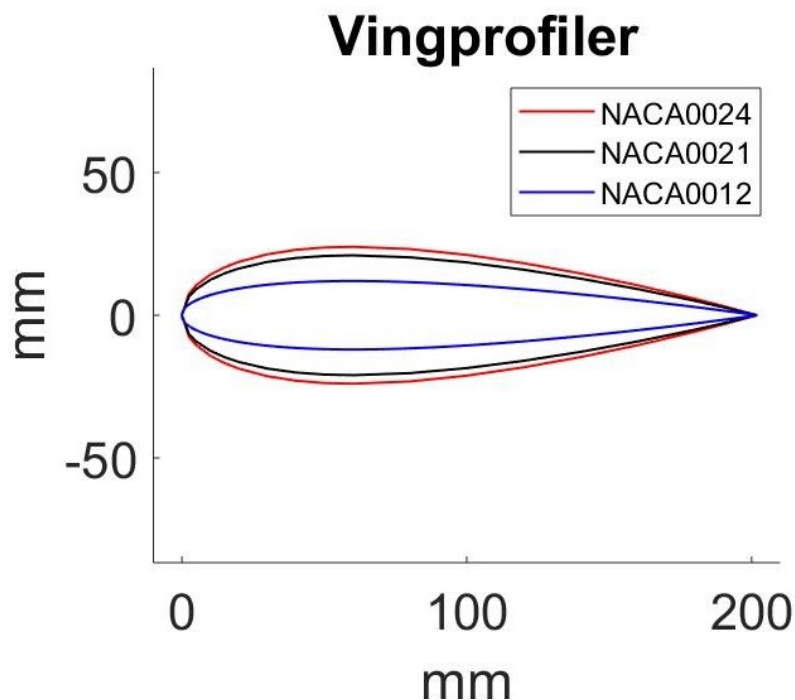
4.1 Metod och genomförande

De tre vingprofilerna som testades var: NACA0012, NACA0021 och NACA0024, dessa visas i figur 4.1. Dessa profiler valdes för att de är symmetriska samt de har varierande bredd där NACA0024 är den största bland de symmetriska NACA profilerna. Information om vingprofilerna samt deras geometri hämtades från *airfoiltools.com* [15]. Geometrin som hämtades bestod av en mängd koordinater som importerades till Excel och överfördes till CAD-programmet CATIA V5 med ett makro.

4.1.1 Mesh- och fysikinställningar samt validering av modellen

Inställningarna som användes för meshen kan ses i tabell 4.1. En bild på meshen kan hittas i figur 4.2. y^+ sattes till 1 vilket resulterade i att "Prism Layer Near Wall Thickness" blev 0,01947 mm. Sedan sattes "Surface Growth Rate" till 1,5 och då kunde både "Number of Prism layers" samt "Prism Layer Total Thickness" beräknas med geometriska serier. De fysikinställningar som användes för simuleringarna kan ses i tabell 4.2.

För att validera modellen jämfördes grafer över C_D och C_L för olika θ hämtade från *airfoiltools.com* med simuleringens resultat från NACA0012-profilen. Både det hämtade resultatet och resultatet från simuleringarna kan ses i figur 4.3 och figur 4.4. De två graferna har samma form och ger samma separationsvinkel. Därför kunde simuleringarna härefter antas vara korrekta, samt att mesh-inställningarna kunde antas vara bra.



Figur 4.1: Tre vingprofiler som testades.

4.1.2 Simulering av de tre vingprofilerna

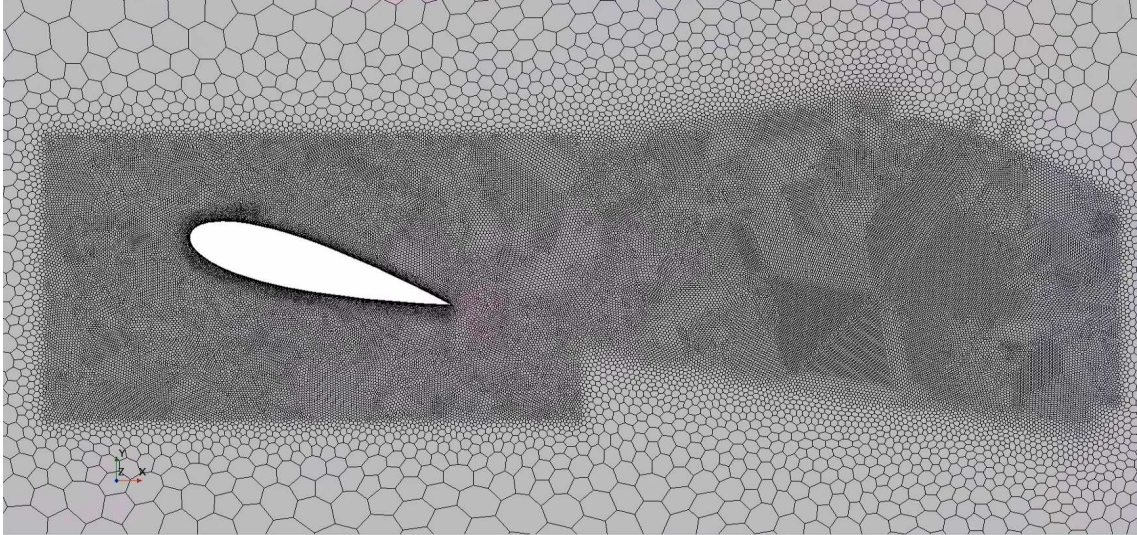
För att bestämma vilken av vingprofilerna som skulle väljas kördes en simulering för varje vingprofil där både yaw-vinkeln θ samt hastigheten v sveptes över för området $5 \text{ m/s} \leq v \leq 25 \text{ m/s}$ och $0^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$. Eftersom modellen behövde meshas om för varje yaw-vinkel gjordes simuleringarna systematiskt med syfte att tidsoptimera svepet. Först valdes en yaw-vinkel och modellen meshades, sedan sveptes alla hastigheter inom hastighetsspannet innan en ny yaw-vinkel valdes och processen repeterades. För varje mätpunkt mättes tryckskillnaden och dokumenterades.

Det var också viktigt att bestämma var på vingen tryckmätningarna skulle ske. I figur 4.5 visas trycket över vingen vid en viss yaw-vinkel. På bilden syns ett högttrycksområde och ett lågttrycksområde vid fronten på vingen. För att maximera tryckskillnaden över vingen bör mätpunkterna placeras inom dessa områden. Det beslutades därför att mätpunkterna skulle placeras på avståndet motsvarande 1% av vingens totala längd från framkanten.

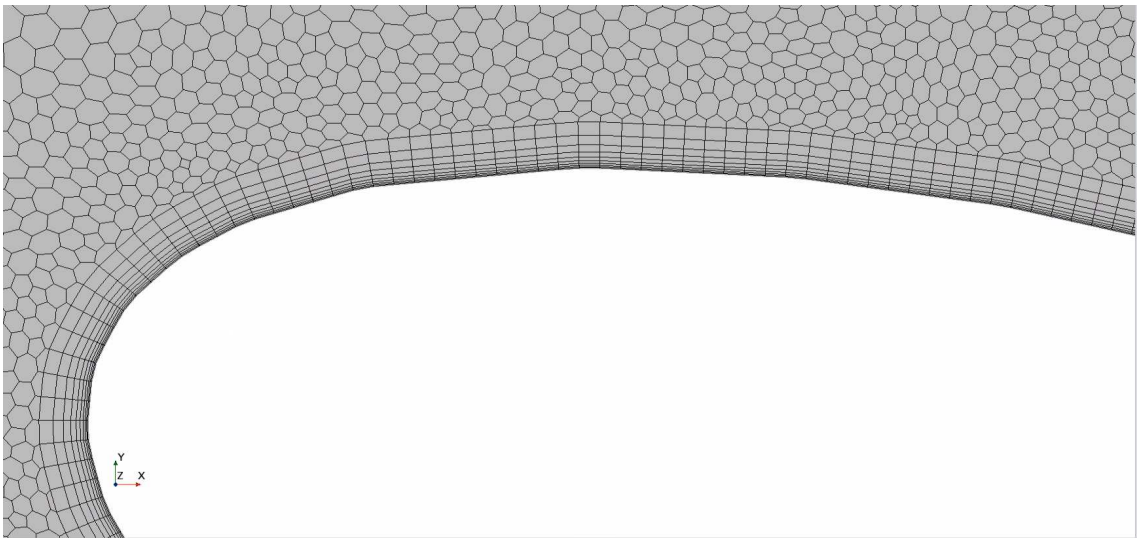
4.2 Resultat samt val av vinge

Resultaten från simuleringarna av de tre vingprofilerna visas i tre figurer. I figurerna presenteras tryckskillnaden som en funktion av både vinkel och hastighet. Resultaten för NACA0012-profilen hittas i figur 4.6, NACA0021-profilen i figur 4.7 och NACA0024-profilen i figur 4.8.

I resultatet kan både storleken på tryckskillnaden samt separationsvinkeln för olika



(a) Meshen runt modellen. Runt vingen finns en förfiningsvolym i formen av en rektangel. Dessutom finns en "Wake refinement" bakom vingen. Meshen behöver förfinas i dessa områden för att fånga detaljer när flödet separerar, detta syns i figur 2.3 flödet



(b) En inzoomad bild av meshen där prismalagren syns.

Figur 4.2: De två bilderna visar hur meshen är uppbyggd. Figur (a) ger en helhetsbild över meshen, figur (b) visar de små prismalagren.

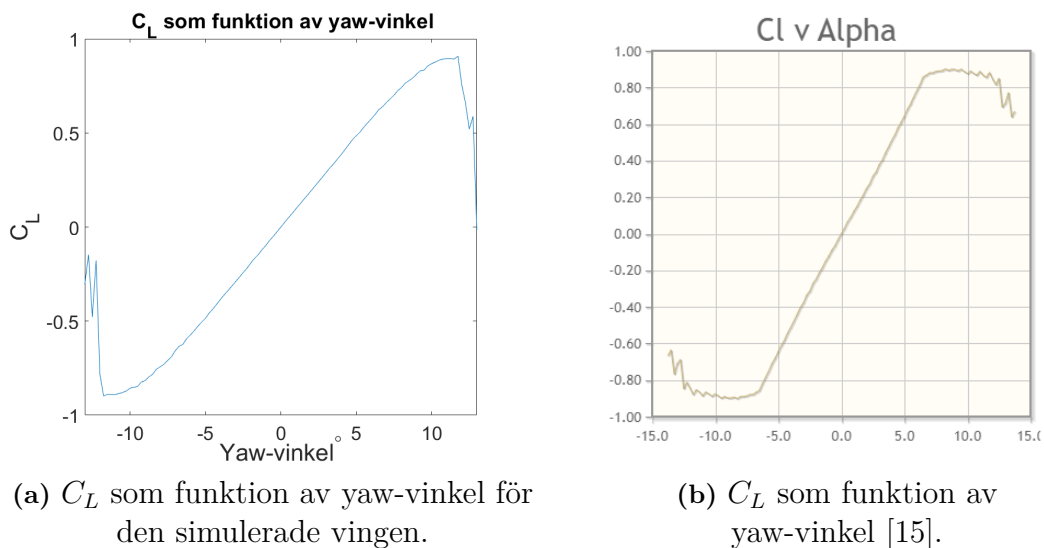
Base Size	10 mm
Target Surface Size	5% of Base Size
Minimum Surface Size	1% of Base Size
Surface Curvature	50 Pts/circle
Surface Growth Rate	1,5
Number of Prism Layers	10
Prism Layer Near Wall Thickness	0,01947 mm
Prism Layer Total Thickness	1,2 mm
Custom size	10% of Base Size
Distance	50 cm
Spread Angle	10 deg
Isotropic Size	10% of Base Size
Growth Rate	1,5

Tabell 4.1: Inställningarna som användes för 2D-meshen. I sektion ett syns inställningarna för "Default Controls", i sektion två en förfiningsvolym och i sektion tre inställningar för "Wake refinement".

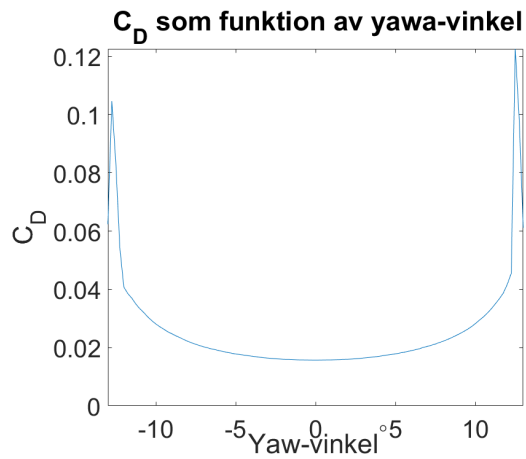
hastigheter avläsas. Separation sker vid den drastiska tryckminskningen som syns i alla tre figurer. Den vingprofil som presterade sämst var NACA0012 då den hade lägst tryckskillnad samt lägst separationsvinkel på cirka 8° . Både NACA0021 och NACA0024 hade liknande tryckkytor och separationsvinkel på runt $10^\circ - 14^\circ$ beroende på hastighet. NACA0024-vingprofilen ansågs vara bäst eftersom den presterade lika bra som NACA0021-profilen samtidigt som den gav mer utrymme för sensorer och annan elektronik.

Two Dimensional
Steady Flow
Coupled Flow
Constant Density
Turbulent Flow
Reynolds-Averaged Navier-Stokes
K-Omega Turbulence
All y^+ Wall Treatment

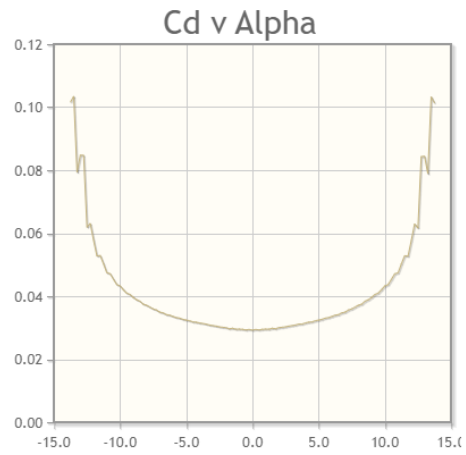
Tabell 4.2: Fysikinställningarna som användes för 2D-simuleringarna i STAR CCM+.



Figur 4.3: C_L som funktion av yaw-vinkel för NACA0021-profilen. Båda graferna har liknande form och ger en separationsvinkel på cirka 10° vid ett Reynoldstal på cirka 50 000.

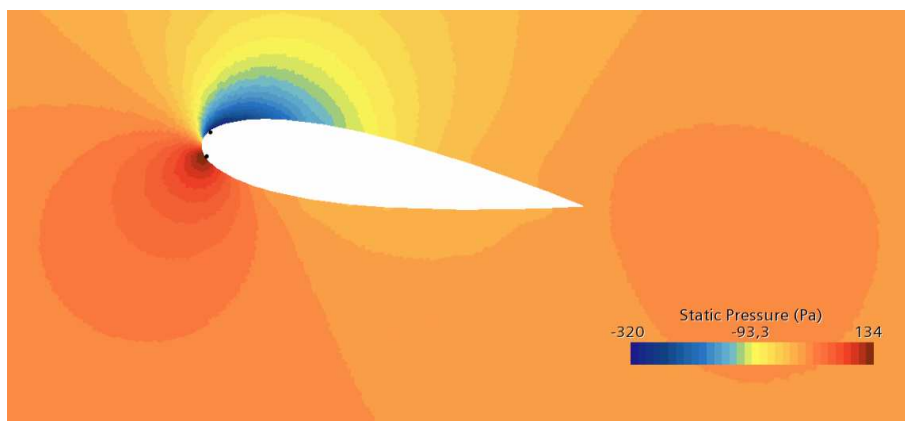


(a) C_D som funktion av yaw-vinkel för den simulerade vingen.

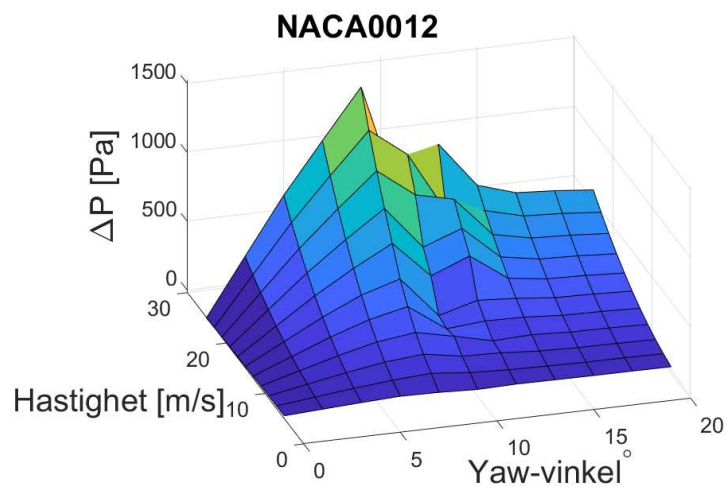


(b) C_D som funktion av yaw-vinkel [15].

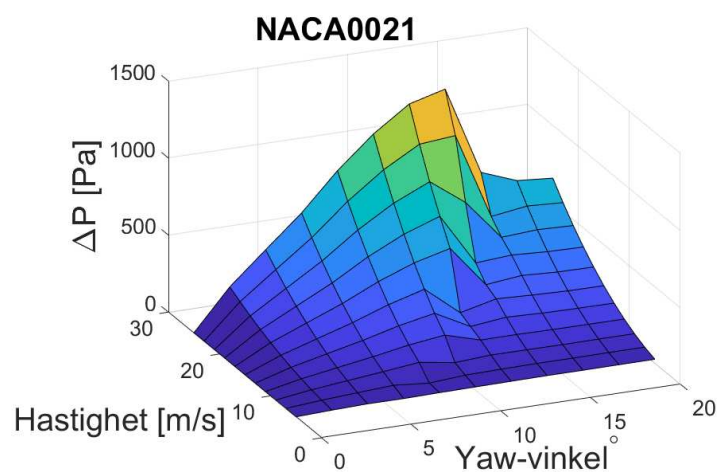
Figur 4.4: C_D som funktion av yaw-vinkel för NACA0021-profilen. Båda graferna har liknande form och ger en separationsvinkel på lite mer än 10° vid ett Reynoldstal på cirka 50 000.



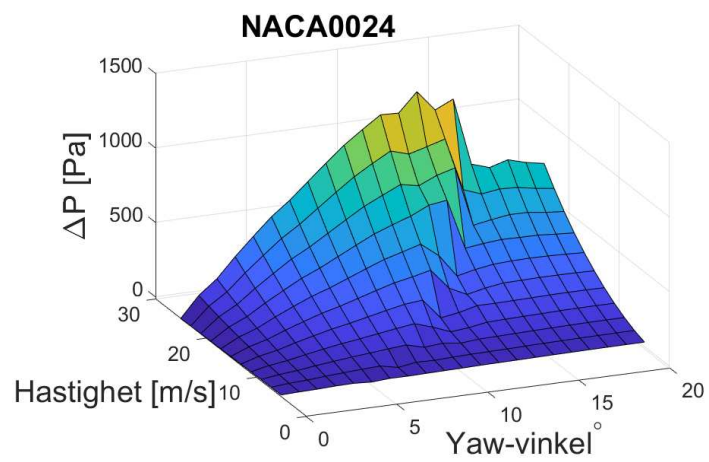
Figur 4.5: Tryckprofilen över en NACA0021-vinge med en yaw-vinkel på 5° . Mät-punkterna är markerade med svarta punkter.



Figur 4.6: Tryckskillnad över NACA0012-profilen som funktion av hastighet och yaw-vinkel.



Figur 4.7: Tryckskillnad över NACA0021-profilen som funktion av hastighet och yaw-vinkel.

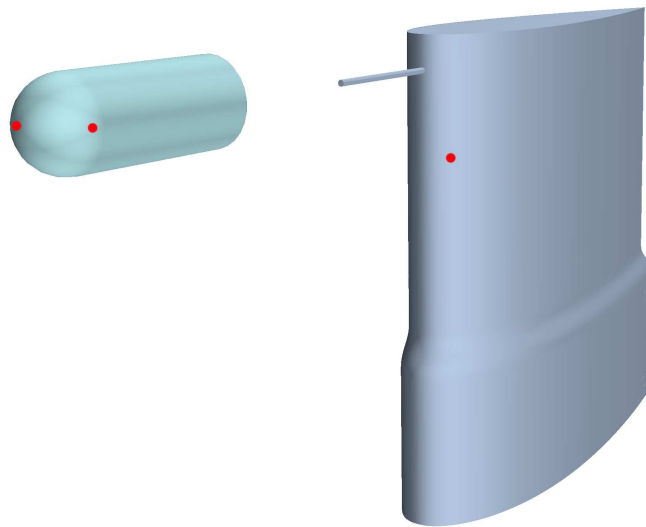


Figur 4.8: Tryckskillnad över NACA0024-profilen som funktion av hastighet och yaw-vinkel.

5

3D-simulering och slutgiltigt konceptval

När den bästa vingprofilen för airfoil-proben hade valts jämfördes den mot multihålsproben. Multihålsproben bestod av en halvsfär med en diameter på 50 mm, placerad på en cylinder. Tre hål placerades på halvsfärens yta. Samtliga hål var placerade på det centrala horisontalplanet, med ett hål centrerat mitt på halvsfärens yta och två hål placerade symmetriskt på halvsfärens sidor. Diametern på halvsfären uppskattades vara lämplig för billig tillverkning och enkel montering av elektronik, och speglar inte diametern på kommersiellt tillgängliga prober. Båda proberna med tryckhål visas i figur 5.1. Jämförelsen gjordes på samma sätt som för vingprofilerna i kapitel 4.



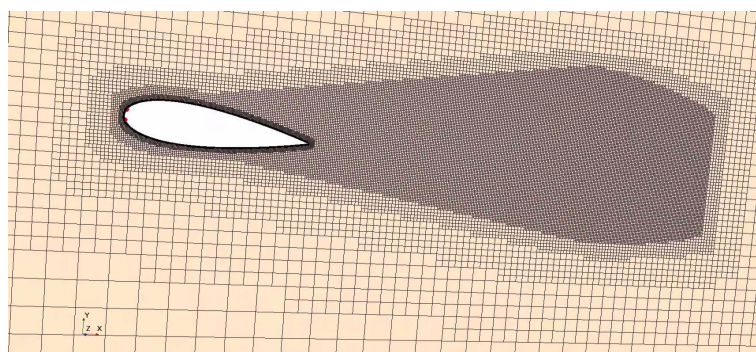
Figur 5.1: Till vänster multihålsproben, till höger airfoilproben. I rött visas tryckhålen, båda proberna är symmetriska och har ett tryckhål även på den dolda sidan.

5.1 3D-simulering av airfoil-prob och multihålsprob

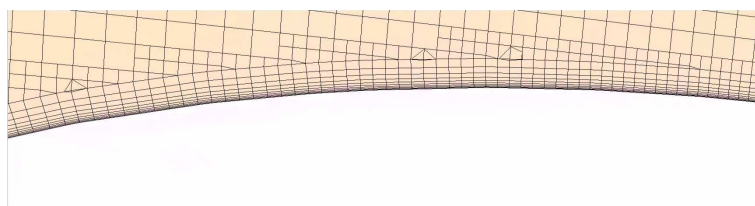
Simuleringarna gjordes likt de 2D-simuleringar som användes för att välja vingprofil, med skillnaden att simuleringarna gjordes i tre dimensioner för att säkerställa att inga oförväntade 3D-effekter uppstod. I likhet med valet av vingprofil söktes en maximering av uppskattade tryckskillnader vid olika vinklar och hastigheter.

5.1.1 Mesh- och fysikinställningar

Eftersom CAD-modellerna för 3D-simuleringarna var mer komplicerade och bestod av flera ihopsatta delar, gjordes en "Surface Wrap" för att stänga eventuella hål i modellen. Inställningarna som användes hittas i tabell 5.1. Meshen för 3D-simuleringarna utgick från samma inställningar som för 2D-simuleringarna som beskrivs i 4.1.1. Inställningarna som användes kan hittas i tabell 5.2. Meshen samt en förstoring av prismalagren kan ses i figur 5.2. Fysikinställningarna som användes för 3D-simuleringarna är exakt samma som för 2D-simuleringarna, vilket kan ses i tabell 4.2 med skillnaden att flödet är i tre dimensioner.



(a) Helhetsbild över 3D-meshen där "Wake Refinement" kan ses.



(b) Förstoring av prismalagren

Figur 5.2: De två figurerna visar 3D-meshen. I figur (a) listas hela meshen. I bild (b) visas prismalagren tydligare.

Base Size	5 mm
Target Surface Size	100% of Base Size
Minimum Surface Size	10% of Base Size
Surface Curvature	36 Pts/circle

Tabell 5.1: Inställningarna som användes för en "Surface Wrapper" för 3D-modellerna som simulerades.

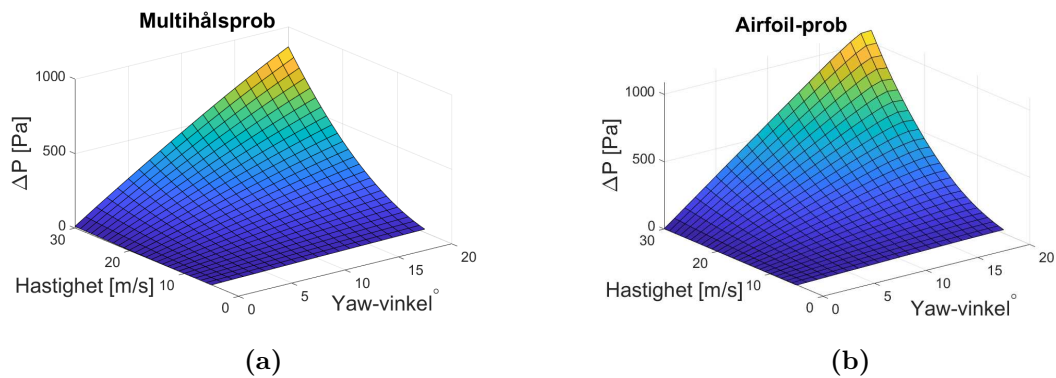
Base Size	10 mm
Target Surface Size	5% of Base Size
Minimum Surface Size	1% of Base Size
Surface Curvature	50 Pts/circle
Surface Growth Rate	1.5
Number of Prism Layers	10
Prism Layer Near Wall Thickness	0.01947 mm
Prism Layer Total Thickness	12% of Base Size
Maximum Cell Size	1000% of Base Size
Custom size	10% of Base Size
Distance	50 cm
Spread Angle	10 deg
Isotropic Size	30% of Base Size

Tabell 5.2: Inställningarna som användes för 3D-meshen. I sektion ett syns inställningarna för "Default Controls", i sektion två en förfiningsvolym och i sektion tre inställningar för "Wake refinement".

5.1.2 Resultat och slutgiltigt konceptval

Svepen som gjordes varierade yaw-vinkeln θ mellan $0^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$ och varierade hastigheten v mellan $5\text{m/s} \leq v \leq 30\text{m/s}$. Resultaten redovisas med tryckskillnaden ΔP på z-axeln, yaw-vinkeln θ på x-axeln och hastigheten v på y-axeln. De resulterande graferna kan ses i figur 5.3.

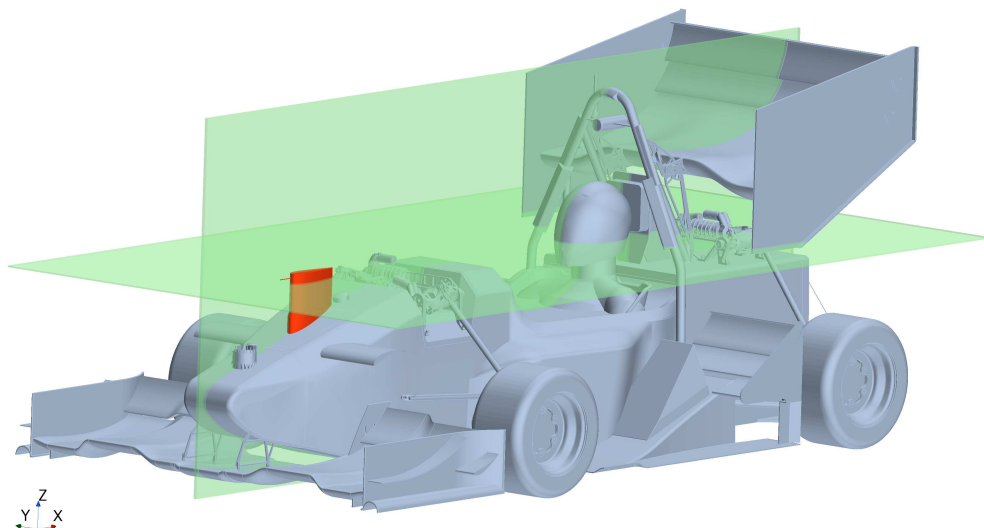
Resultatet visar att airfoil-proben skapar en högre tryckgradient, därför valdes airfoil-proben. Fortsättningen på detta kapitel kommer behandla airfoil-proben och CFS-bilens aerodynamiska påverkan på varandra. Resterande kapitel kommer att beskriva tillverkningen och kalibreringen av airfoil-proben.



Figur 5.3: De två figurerna visar resultaten från 3D-simuleringarna, tryckskillnaden ΔP visas på z-axeln, yaw-vinkeln θ på ses x-axeln och hastigheten v på syns y-axeln. I figur (a) syns resultatet för multihålsproben och i figur (b) ses resultatet för airfoil-proben.

5.2 Simulering av CFS:s bil med prob

När den övergripande designen på proben hade bestämts gjordes 3D-simuleringar med proben monterad på CFS-bilen. Syftet med simuleringarna var att se probens påverkan på luftflödet runt bilen och eventuella effekter på aerodynamiska prestandan, samt om fordonet påverkar luftflödet över proben. Proben placerades på fronten av bilen för att yaw-mätningen skulle ske i relativt ostörd luft. I figur 5.4 syns placeringen samt planen $y = 0\text{m}$ och $z = 0,675\text{m}$ där flödet kommer studeras.



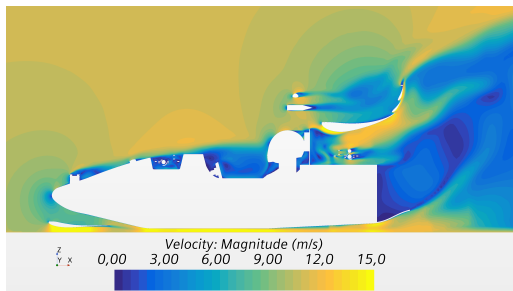
Figur 5.4: Placeringen av proben på CFS-bilen. Dessutom ses planen $y = 0\text{m}$ och $z = 0,675\text{m}$ där analyseras.

Totalt kördes fyra simuleringar. Resultaten visas i figur 5.5. Figur 5.5a och figur 5.5b visar hastighetsfältet i ett tvärsnitt rakt igenom bilen med och utan prob. I dessa simuleringar var yaw-vinkeln $\theta = 0^\circ$ och hastigheten $v = 40$ km/h. Figur 5.5c och figur 5.5d visar det resulterande hastighetsfältet i ett horisontellt tvärsnitt en specifik höjd över marken, positioneringen av tvärsnittet visas i figur 5.4. Dessa två simuleringar hade en yaw-vinkel $\theta = 10^\circ$ och en hastighet $v = 40$ km/h.

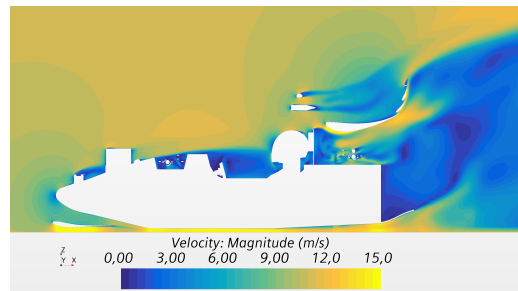
Från figurerna går det att se att flödet på bilen efter proben är nästan opåverkat. Efter endast några decimeter ser flödet likadant ut som i simuleringen utan prob. Detta antyder att proben inte har en negativ aerodynamisk effekt på komponenter längre bak. I tabell 5.3 ses värdena på C_L och C_D för bilen med och utan prob. Koefficienterna ändrades mycket lite och därför drogs slutsatsen att proben inte har en större negativ effekt på bilens dynamik. Utifrån simuleringen gjordes även bedömningen att tryckvärden vid mätåhlen inte påverkas negativt av aerodynamiska effekter från bilen i den valda positionen.

Simulering	C_L	C_D
Utan prob	3,626	1,422
Med prob	3,585	1,401

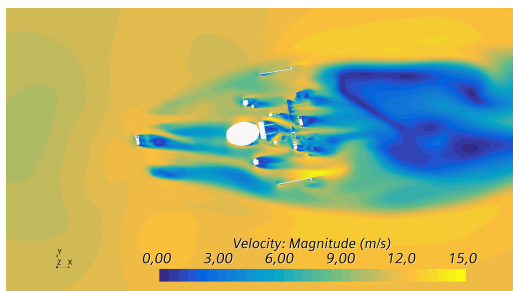
Tabell 5.3: C_L och C_D för CFS-bilen med och utan prob.



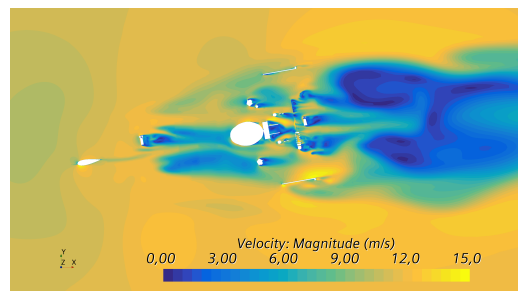
(a) Hastighetsfältet i ett tvärsnitt sett från sidan av bilen utan prob.



(b) Hastighetsfältet i ett tvärsnitt sett från sidan av bilen med prob.



(c) Hastighetsfältet i ett tvärsnitt sett ovanför bilen utan prob.



(d) Hastighetsfältet i ett tvärsnitt sett ovanför bilen med prob.

Figur 5.5: Resultatet från de fyra CFD-simuleringarna, figur (a) och (b) visar resultatet då $\theta = 0^\circ$ och $v = 15$ m/s för bil utan och med prob. Figur (c) och (d) visar resultatet då $\theta = 10^\circ$ och $v = 15$ m/s för bil utan och med prob.

6

Elektronik och mjukvara

Efter jämförelsen av multihålsproben och airfoil-proben i 3D-simuleringarna valdes airfoil-proben för fortsatt utveckling. Det bestämdes även att ett Pitot-rör skulle användas för att mäta den relativa flödes hastigheten. Utvecklingsarbetet inleddes med att undersöka och välja ut vilka elektroniska komponenter som skulle ingå i proben. Detta gjordes för att få en uppfattning om vilken storlek som vingprofilen behövde ha samt hur insidan skulle utformas. I samband med valet av komponenter studerades även hur dessa komponenter fungerade för att förstå hur de skulle kopplas ihop, samt hur mjukvaran till dessa skulle utformas.

6.1 Arduino

Elektroniken, med undantag för batteriet, har tre huvuduppgifter, det ska mäta trycket på vingprofilens höger- och vänstersida samt de dynamiska och statiska trycken i Pitot-röret. Elektroniken ska mäta yaw-probens position, och mätningar ska lagras kontinuerligt på ett microSD-kort.

Det konstaterades att användning av den lättanvända och billiga Arduino Uno-mikroprocessorn gav en bra lösning på dessa uppgifter. Med en Arduino Uno kunde man enkelt ansluta SD-kortläsare och GPS-modul, mäta trycket från sensorerna och förse alla komponenter med ström.

6.2 Trycksensorer

Med hjälp av tidigare genomförda CFD-simuleringar och beräkningar kunde kraven på probens sensorer formuleras.

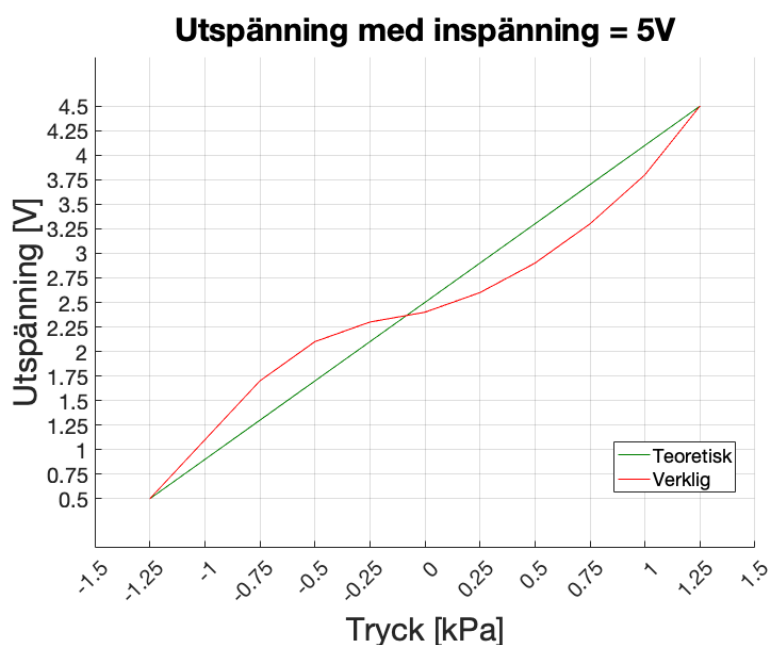
Proben antogs ej utsättas för hastigheter över 120 km/h, CFS-bilens topphastighet [16]. Eftersom kurvtagningshastigheten inte överskrider 60 km/h, uppskattades att sensorn måste klara av att mäta detaljerat upp till 1kPa.

Med simuleringar kunde även mätnoggrannheten på sensorer uppskattas. Det bedömdes att effekten av ett mätfel på $\pm 1,5\%$ inte resulterar i att felet på den uppmätta vinkeln överskrider probens noggrannhetskrav som bestämdes i kravspecifikationen. Därmed kunde ett krav på sensorernas noggrannhet sättas.

Till det valda konceptet behövde tryckmätningar utföras i fyra olika positioner. Trycket på vingprofilens två sidor och det dynamiska- och statiska trycket i Pitot-röret. Till dessa mätningar var det lämpligt att använda sig av differenstrycksensorer. Denna typ av trycksensor mäter skillnaden mellan trycket på två portar, port 'A' och port 'B', som sitter på vardera sida om sensorn. Om port 'A' har ett högre tryck än port 'B' uppger sensorn ett positivt värde. Om port 'B' har ett högre tryck än port 'A' uppger ett negativt värde.

För att kunna mäta utsignalen på sensorerna med en Arduino Uno behövde sensorernas utsignal vara "ratio-metric analog signal", det vill säga att utsignalen från sensorn är en andel av inspänningen. När sensorn går mot sin minimumbelastning utgör spänningen i utsignalen 10% av inspänningen, och när den går mot maximumbelastning utgör utspänningen 90% av inspänningen [17]. Detta betyder att endast spänningen i signalen behöver mätas. Spänningen kan sedan konverteras till ett tryck med hjälp av Arduino-mikroprocessorn.

I teorin är överföringsfunktionen mellan trycket och utspänningen linjär mellan maximum- och minimumbelastning. Se den gröna linjen i figur 6.1 som visar utspänningen mot trycket på en sensor som har en maximum- och minimumbelastning på $\pm 1,25\text{kPa}$ och en inspänning på 5V. Detta är inte fallet i verkligheten eftersom sensorerna inte är ideala. Det verkliga beteendet representeras av den röda linjen i figur 6.1. I kapitel 8 redovisas hur kalibrering för att avhjälpa detta problem utförs.



Figur 6.1: Exempel på en "ratio-metric analog signal".

Med informationen som samlats, formulerades krav för sensorerna, se tabell 6.1.

Mätomfång:	$\pm 1\text{kPa}$
Noggrannhet:	$\pm 1,5\%$
Utsignal:	Analog
Typ:	Differential

Tabell 6.1: Ställda krav på trycksensorerna

En analog differenstrycksensor från "Amphenol All Sensors Corporation" vid namn ELVH-MF12D-HAAH-C-NAA5 valdes. Denna sensorn har ett mätomfång på $\pm 1.25\text{kPa}$ och ett TEB på 1.5%. TEB står för "total error band" och är ett noggrannhetsmått som mäter skillnaden mellan den mest negativa och mest positiva avvikelsen från det sanna värdet. Detta mått är fastställt med en kombination av alla kända fel som sensorn kan ha inom dess mätomfång, till exempel extrema temperaturer eller långsiktigt slitage.

6.3 GPS-modul och SD-kortläsare

Till det valda prob-konceptet bestämdes det att en SD-kortläsare och en GPS-modul skulle implementeras. En SD-kortläsare behövs för att spara loggfilerna från mätningar till ett microSD-kort och GPS-modulen kan underlätta identifiering av var en mätning av en yaw-vinkel är gjord.

Valet att använda sig av en Arduino-mikroprocessor underlättade valet av GPS-modul och SD-kortläsare. Det finns mängder av kort som är framtagna för kompatibilitet med Arduino-mikroprocessorer. Därför valdes SD-kortläsaren HW-125 och GPS-modulen GY-NEOMV2.

6.4 Mjukvaruutveckling

Mjukvaran i proben ska mäta trycken, mäta GPS-koordinaterna och logga dessa på ett SD-kort. Koden som utvecklades kan ses i Appendix A.

6.4.1 Mjukvara till tryckmätning

Den analoga utsignalen från sensorerna är en spänning. För att mäta sensorernas tryck måste först utspänning mätas och konverteras till korrekt enhet. Arduinon kan mäta upp till 5V direkt på ett stift med hjälp av funktionen "analogRead()". Denna funktion ger tillbaka ett värde mellan 0 och 1023 (enheter) som i teorin motsvarar 0 till 5V.

För att mäta spänningen på ett stift måste beräkningar först genomföras för hur stor spänning varje enhet motsvarar. Detta beräknades till:

$$a = \frac{5}{1023} = 4.888 \cdot 10^{-3} \quad [V/enhet].$$

Då spänningen för en enhet är beräknad kan den totala spänningen på stiftet beräknas genom att multiplicera antalet enheter med spänningen per enhet. Detta ses i ekvation (6.4.1).

$$v_{stift} = a \cdot enheter \quad [V]$$

Då en spänning erhålls återstår det att konvertera den till tryck. Den valda sensorn hade ett mätomfång på $\pm 1,25\text{kPa}$. Om sensorn matas med 5V kommer sensorns utspänning variera från 0,5V till 4,5V vilket är mellan 10% och 90% av 5V. Antalet Pascal per volt räknas då ut som

$$b = \frac{1250 - (-1250)}{(4,5 - 0,5)} = 625 \quad [Pa/V].$$

För att konvertera spänningen till tryck är det viktigt att ta hänsyn till att minimumbelastningen sker vid 10% och inte vid 0, dvs. att den uppmätta spänningen skall subtraheras med minimumspänningen (ca 0,5V i detta fall) innan multiplikation med antalet Pascal per volt. Avslutningsvis måste det uppmätta trycket subtraheras med hälften av sensorns mätomfång eftersom differensstrycksensorn kan anta negativa tryck när port 'B' uppmäter större tryck än port 'A'. Det slutgiltiga trycket på sensorn blir då enligt följande:

$$p_{sensor} = (v_{stift} - v_{min}) \cdot b - 1250 \quad [Pa].$$

6.4.2 Mjukvara till GPS

GPS-modulen kan drivas direkt från Arduinons 5V-stift. När GPS:en mottar ström börjar den sända data på sitt sändarstift. Datan som sänds ut är strukturerad i NMEA-meningar vilket är en standardiserad formatering gjord för GPS:er av "National Marine Electronics Association" [18]. Meningarna innehåller bland annat tiden och koordinaterna. Se figur 6.2 för exempel på en NMEA-mening.

\$GPRMC,113033,A,5742.3447,N,01126.0041,W,0.0,076.2,050822,003.8,E*69

Time
Latitude
Longitude
(DDMM.MMM)
(DDDMM.MMM)

Figur 6.2: Exempel på ett NMEA-meddelande.

NMEA-formateringen använder koordinatnotationen grader:decimalminuter (förkortas DDM, från engelskans "Degrees Decimal Minutes"), men den vanligaste koordinatnotationen är decimalgrader (DD från "Decimal Degrees"). För att enkelt kunna tolka koordinaterna bör de därför konverteras till decimalgrader innan de sparas.

I DDM-notationen i figur 6.2 ser man att de två siffrorna till vänster om decimalpunkten tillsammans med alla decimaler, siffrorna som betecknas med 'M' i figur 6.2, är antalet minuter. Övriga siffror, dvs siffrorna som betecknas med 'D', är gradtalet.

I DD-notationen tillhör alla siffror ett gradtal, därför måste minuterna konverteras till grader vid konvertering från DDM- till DD-notation. Detta görs genom att dividera minuterna med 60.

I exemplet i figur 6.2, anges latitud 57 grader och 42,3447 minuter. För att konvertera detta till decimalgrader divideras decimalminuterna med 60 och adderas sedan till graderna.

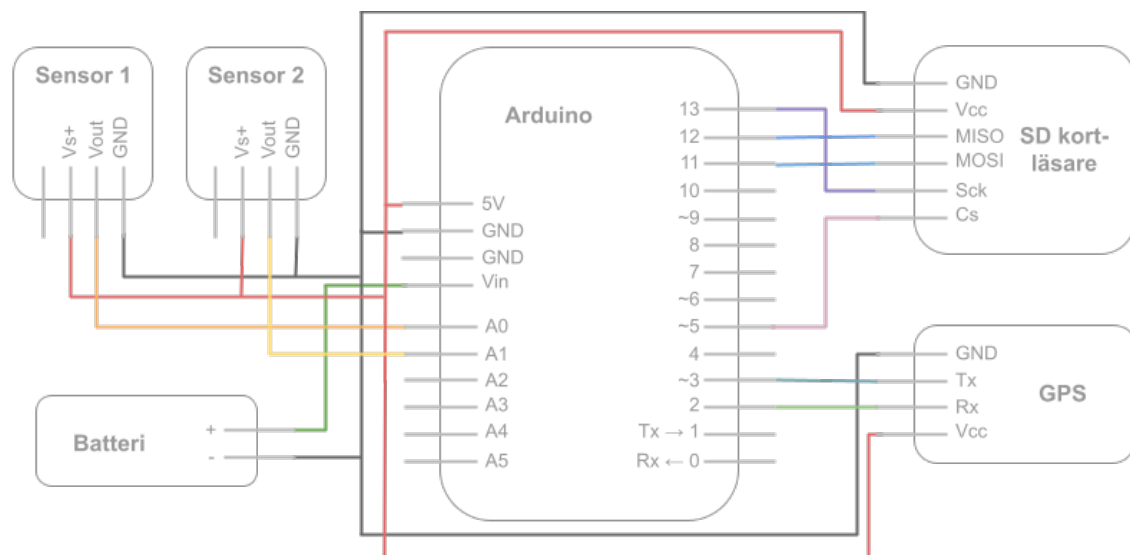
$$Lat = 57 + \frac{42,3447}{60} = 57,7057 \quad [DD]. \quad (6.1)$$

6.4.3 Loggning av data

När trycket och koordinaterna är uppmätta och konverterade sparas dessa tillsammans med tiden och sensorernas utspänningar. I koden sparas datan i form av strängar. Varje sträng innehåller tiden för mätningen och alla mätvärden. Variablerna i strängarna är separerade med kommatecken. Kommatecknet behövs för att kunna spara datan till en csv-fil ('comma separated values') vilket är en filtyp som enkelt kan läsas med Excel och Matlab. Denna fil lagras på ett SD-kort med hjälp av SD-kortläsaren. Eftersom GPS-modulen kan genomföra upp till fem platsuppdateringar per sekund (5Hz) så loggas datan fem gånger per sekund. Detta innebär att om CFS-bilen kör i 50 km/h uppdateras GPS-positionen med 2,7 meters mellanrum.

6.5 Kod och kopplingschema

Den slutliga Arduino-koden som skapades och en GitHub-länk till koden kan hittas i appendix A. I figur 6.3 nedan kan man se hur Arduinon och de olika komponenterna kopplades. Sensor 1 motsvarar trycksensorn som är kopplad till hålen på sidan av vingprofilen och sensor 2 är kopplad till Pitot-röret.



Figur 6.3: Kopplingschema för elektronik

7

Tillverkning

Detta kapitel beskriver stegen i tillverkningen och presenterar resultatet av tillverkningsprocessen.

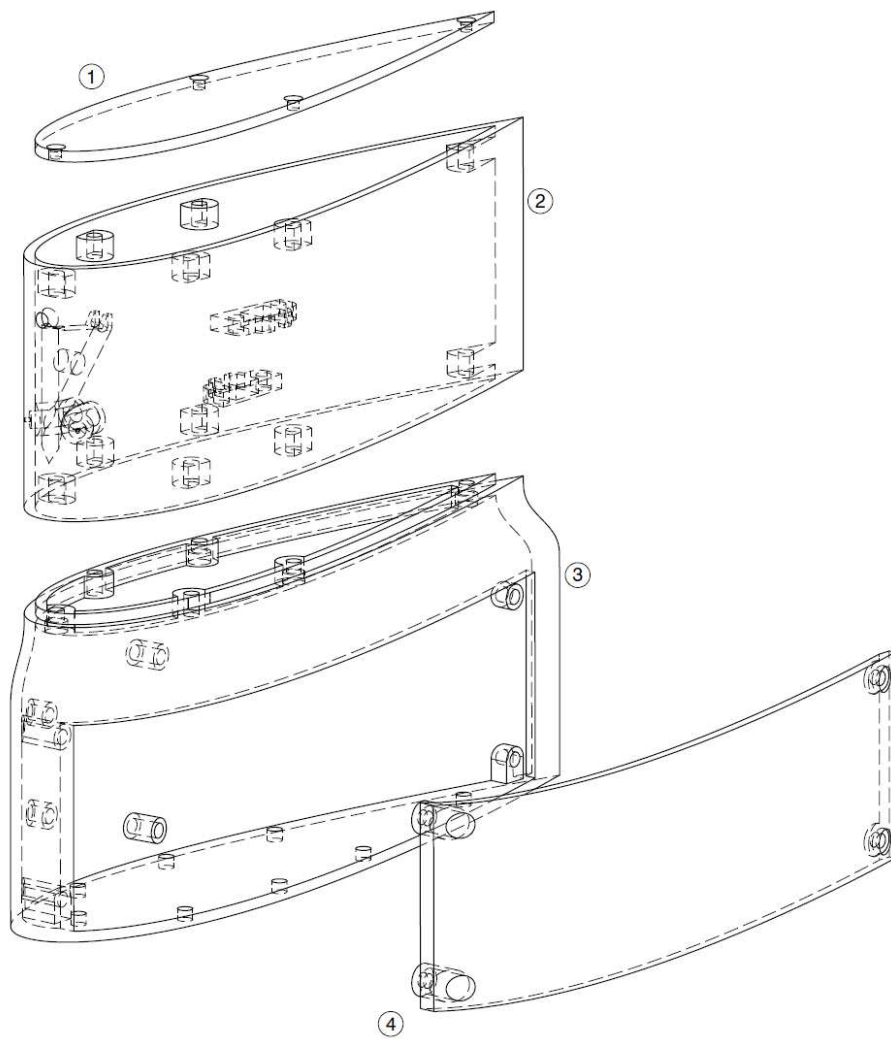
7.1 CAD-modellering

Det första steget i tillverkningsprocessen innefattade att skapa en digital CAD-modell av proben. De färdiga 3D-filerna finns uppladdade på följande webbsida i STL-format: <https://www.thingiverse.com/thing:5396181>

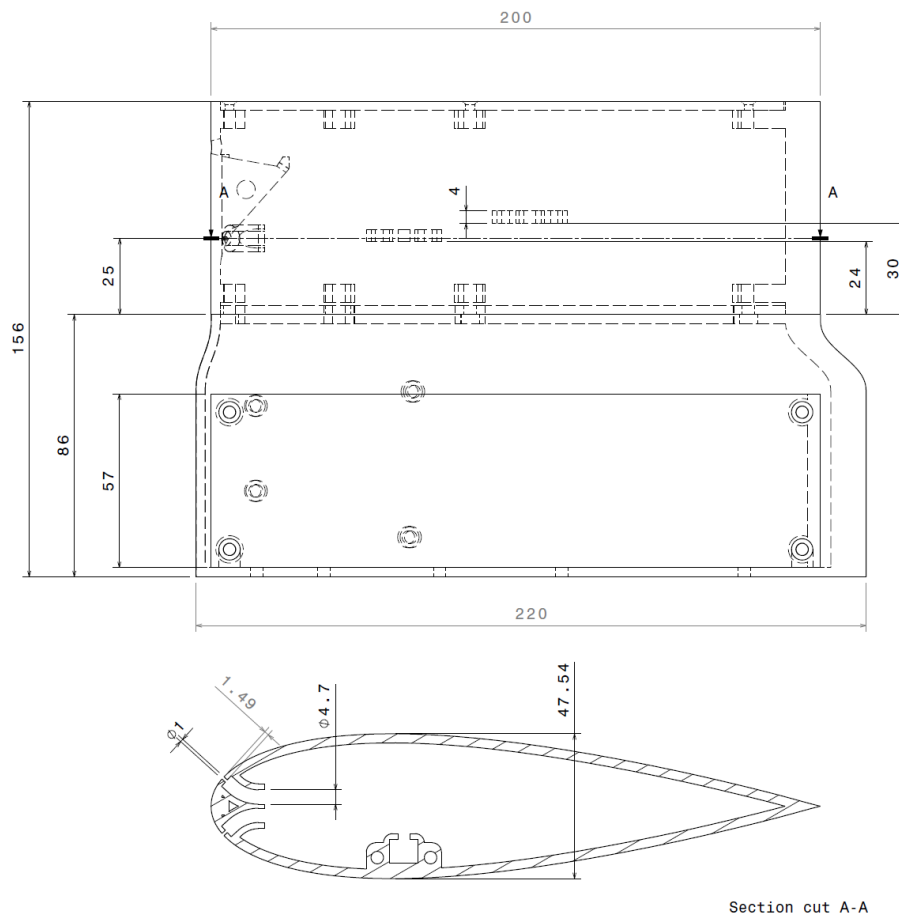
CAD-modellen framställdes i programmet CATIA V5 utifrån de designkrav som uppkom i simuleringen. Den slutgiltiga CAD-modellen är något lägre än modellen som testades i simuleringarna. Denna ändring genomfördes med syftet att minska upptagandet av förarens synfält. CAD-modellen består av fyra huvudkomponenter (se figur 7.1 och 7.2):

1. En övre del med plats för sensorer och Pitot-rör, separat från den nedre delen för att underlätta montering av sensorer. Innehåller mätningshål med fästordning för tillhörande silikonslangar.
2. Ett topplock som passar i den övre delen, stänger öppningen som används för att montera ihop den övre och undre delen, underlättar inspektion och montering av sensorer.
3. En undre del, något större än den övre delen för att ge plats åt mikroprocessor, batteri osv. Mjuk övergång i övre skarven för att undvika skapandet av luftflöden som stör mätningar i den övre delen. Innehåller monteringsplats för en mikroprocessor av typ Arduino Uno. Hål finns placerade i botten för att möjliggöra montering mot andra objekt.
4. En lucka tillhörande den nedre delen, tillåter enkel åtkomst till batteri, Arduino och andra komponenter som finns beläget i nedre delen. Den främre skarven för luckan/luckhål har placerats något vid sidan om vingens symmetrilinje för att undvika störningar i luftflödet över sensorhålen.

Utöver dessa delar skapades även två delar som fästs i botten av proben för att underlätta montering i vindtunnel.



Figur 7.1: Sprängskiss över probhöljet. (1) Toplock, (2) övre del, (3) nedre del, (4) lucka.



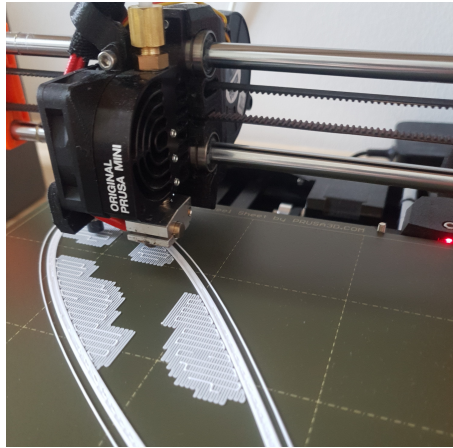
Figur 7.2: Ritning med valda mått.

7.2 3D-skrivning, gängmontering och slipning

För att skapa en fysisk modell av proben användes 3D-skrivning. Samtliga delar i CAD-filen skrevs ut i vit PLA-plast med 10% ifyllning och med en lagertjocklek på 0,15 mm. Figur 7.3 visar en ögonblicksbild av utskriftsprocessen.

Efter utskrivning av delarna installerades gänginsatser av mässing i storlek M3 för att tillåta montering av delarna i varandra med skruvar. Gänginsattserna värmdes med en lödpenna till 175 °C och trycktes ner i hål med något mindre diameter än insatsernas ytterdiameter. Detta fick plasten runt insatserna att smälta för att sedan stelna, vilket fixerade insatserna i plasten. Totalt installerades 29 gänginsatser.

För att bli av med ojämnheter i probens ytskikt som kan påverka luftflödet negativt slipades probens utsida. Detta gjordes för hand med blött sandpapper i tre omgångar, med gradvis finare sandpapper. Först slipades utsidan med papper av grovhet P240, sedan P800, och till sist med grovheten P1000.



Figur 7.3: Bild tagen under utskriften av den övre delen.

7.3 Montering

Slutligen monterades delarna ihop. Figur 7.4a visar resultatet från utsidan med lock och luckor monterade. Sensorer fixerades i proben med 3D-skrivna hållare, se figur 7.4b. Sensorerna kopplades med silikon slang till Pitot-röret och mätningshålen i den främre delen av proben. Övrig elektronik monterades också in i proben, se figur 7.4c och 7.4d. Kopplingsschema och andra detaljer rörande elektroniken redogörs för i kapitel 6.

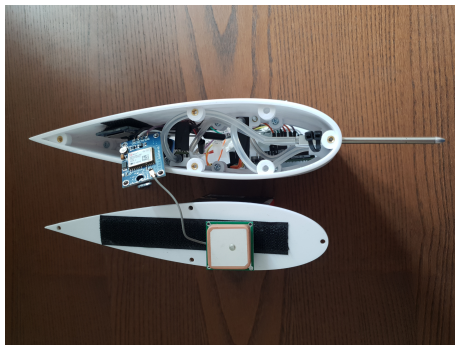
Varje trycksensor har en sida med text på, sida 'A'. Motsatt sida benämns 'B'. Den vänstra sensorn placerades med porten på sida 'A' orienterad nedåt. Denna port kopplades till den vänstra porten, benämnd '1'. Porten 'B' på motstående sida kopplades till den högra porten '2'. Den högra sensorn kopplades till Pitot-röret. Slangen kopplades mellan Pitot-rörets övre port '1' till sensorns övre port 'A'. Den nedre sensorporten 'B' kopplades till den nedre porten i '2' i Pitot-röret. Se figur 7.5 för förtydligande.



(a) Monterad prob från vänster.



(b) Närbild på sensormontering.

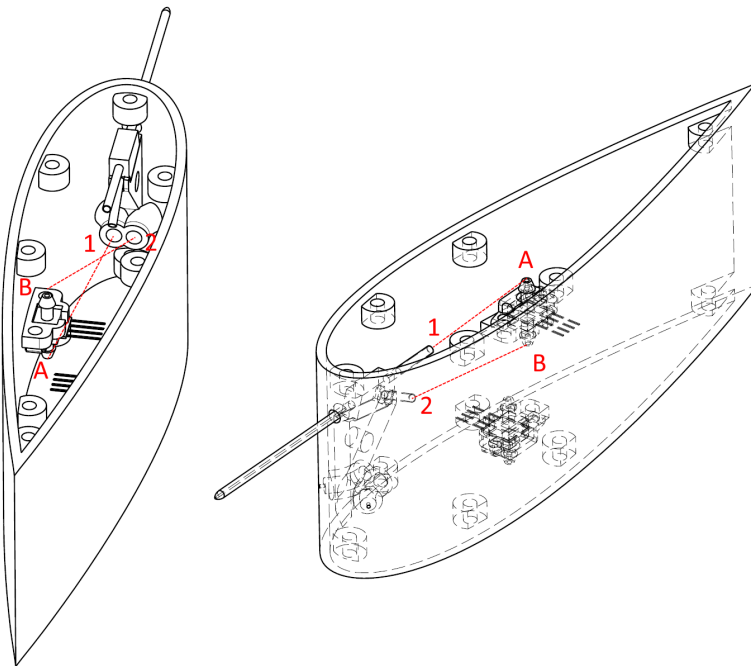


(c) Inmonterad elektronik, övre lock öppet.



(d) Inmonterad elektronik, nedre lucka öppen.

Figur 7.4: Färdigmonterad prob.



Figur 7.5: Kopplingsförtydligande, vänster avbildning visar kopplingar för den vänstra sensorn, höger avbildning visar kopplingen för den högra sensorn.

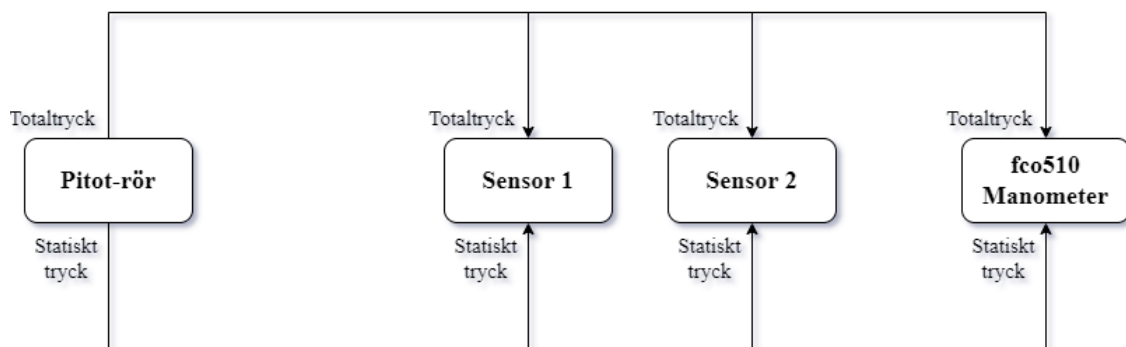
8

Kalibrering i vindtunnel

I detta kapitel dokumenteras arbetet som har genomförts med hjälp av Chalmers vindtunnel. Kapitlet inkluderar kalibreringar av trycksensorer och själva proben som har gjorts för att den ska kunna mäta yaw-vinkel.

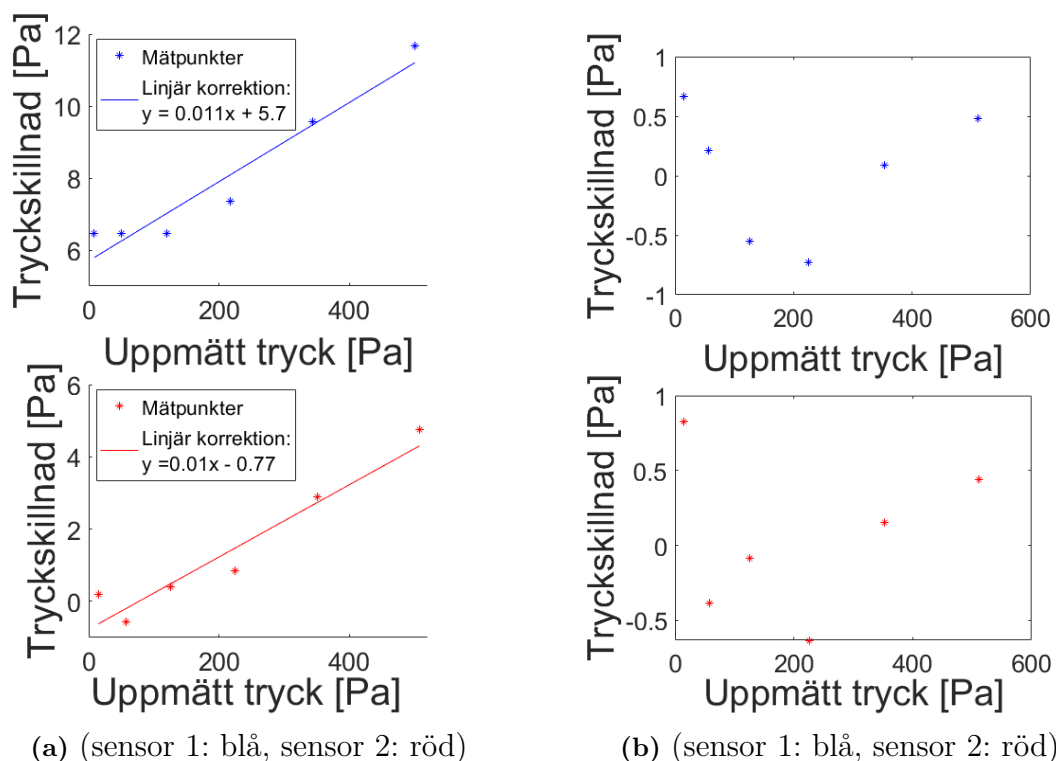
8.1 Kalibrering av sensorer

Då probens förmåga att mäta yaw-vinkeln beror på sensorernas exakthet är det viktigt att dessa två trycksensorer mäter rätt värden under användning. Sensorerna kalibrerades därför med hjälp av vindtunnelns egna instrument. Tunnelns manometer av modell fco510 har en mycket hög noggrannhet och användes som referens i kalibreringen [19]. Proben placerades utanför vindtunneln där slangarna mellan Pitot-rör i tunneln och dess manometer hade förgrenats och kunde kopplas in probens i sensorer. Se figur 8.1.



Figur 8.1: Förgrening av slangar från vindtunnelns Pitot-rör till sensorer och manometer

På detta sätt utsattes båda sensorerna och vindtunnelmanometern för exakt samma dynamiska och statiska tryck. Tunneln kördes sedan över ett intervall från 5-30 m/s i steg av 5 m/s, där sensorernas och den exakta manometerens data loggades. Resultatet från mätningen kan ses i figur 8.2a. Det syns att felet för sensorerna beror linjärt på trycket som mättes. Det gjordes därför en linjärisering som sedans användes för att kalibrera sensorerna. Resultatet från kalibreringen ses i figur 8.2b. Kalibreringen har minskat felet som från början nästan uppnådde ± 10 Pa, till endast ± 1 Pa.



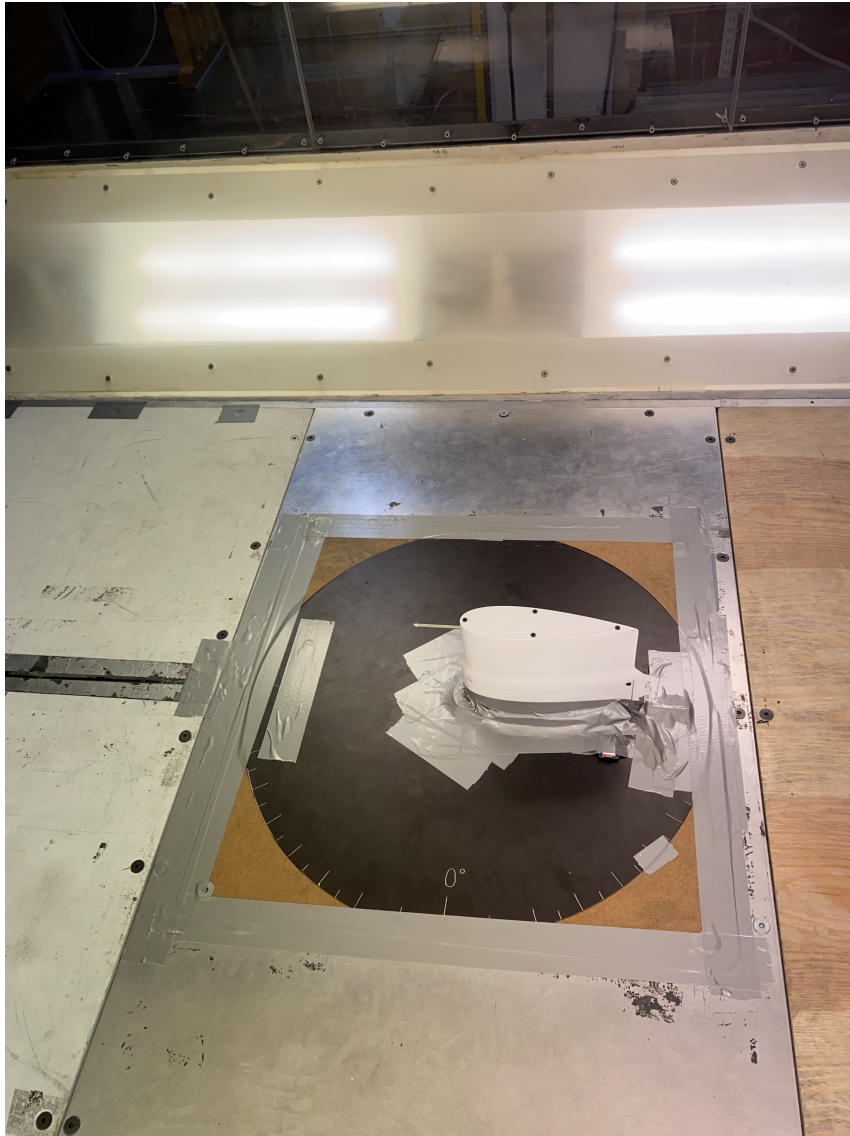
Figur 8.2: y-axlar: skillnaden mellan sensorns och manometerns uppmätta tryck, x-axlar: sensorns uppmätta tryck. a) Visar resultatet från vindtunneln med förgrening i tidigare figur 8.1. b) Visar kalibrerade sensorer där tryckskillnaden har reducerats till inom -1 till 1 Pa.

8.2 Vindtunnelns utformning och påverkan

Chalmers vindtunnel användes vid testerna. Storleken på på tunneln approximerades till 1,5 meter i bredd och 1,2 meter i höjd. För att komma in i tunnel behövde glasskivor från tunnels sidor lyftas bort. Inne i tunnel var en rotationsskiva placerad centrerat på botten av tunneln, se figur 8.3. För att undersöka att tunnelns gränsskikt ej påverkar testerna höjdes proben upp 250mm över botten. Där gjordes en omgång med tester som sedan jämfördes med liknande tester som genomfördes då proben var placerad på golvet. Resultatet visade ingen signifikant skillnad mellan testerna och proben placerades då på botten för alla resterande tester.

8.3 Placering och rotation av prob

För att få fram noggrann data var det viktigt att proben placerades med hög noggrannhet på rotationsskivan i vindtunneln. Detta gjordes genom att en platta monterades på proben, se figur 8.4. På undersidan av plattan finns en cylinderformad nedsänkning med en diameter på 5,5mm, som kunde placeras i ett hål i mitten av rotationsskivan. Nedsänkningen placerades i framkant relativt vingprofilen sådant att rotationspunkten hamnade i vingprofilens framkant mellan mätålen. Denna lös-



Figur 8.3: Prob fasttejp på rotationsplatta i Chalmers vindtunnel.

ning bidrog även till att proben blev centrerad i horisontalled i vindtunneln. För att fästa proben på rotationsskivan användes silvertejp. Sladdarna mellan proben och datorn, samt start- och stoppknappen för datainsamlingen drogs ut ur vindtunneln genom bottenplattan. Därmed kunde datainsamlingen övervakas samtidigt som den hämtades. Detta var fördelaktigt, då tiden var begränsad i vindtunneln. Om en mätning blev uppenbart fel kunde detta upptäckas omedelbart, och mätningen göras om utan fördröjning.

Proben placerades med en yaw-vinkel $\theta = 0^\circ$. Detta gjordes genom längdmätningar till sidan av vindtunneln. Mätningarna gjordes i framkant respektive bakkant av rotationsskivan. Först mättes hela vindtunnelns bredd vid de två punkterna. Anledning till att bredden är intressant att veta vid båda positionerna beror på att vindtunnelns bredd blir större mot den bakre delen. Vidare halverades båda värdena för att få fram avstånden som gav noll yaw-vinkel. För att validera probens position



Figur 8.4: Bottenplatta och prob.

kördes sju tester med olika hastigheter inom hastighetsspannet 5 m/s till 35 m/s. Detta för att se så tryckskillnaden mellan sidosensorena var nära noll. Resultatet av testerna blev att tryckskillnaden var 3-6 Pa för låga hastigheter och växte upp till 49 Pa vid 35 m/s. Tryckskillnaden ansågs vara tillräckligt liten för att inte påverka resultatet till en betydande grad. Därför ansågs metoden tillräckligt bra för att positionera proben med noll yaw-vinkel.

Rotationsskivan som proben var placerad på har vinkelmarkeringar på sidan, men dessa ansågs ej vara tillräckligt noggranna. Därför gjordes mätningar till vindtunnelns sidor och till rotationsbordets fram- och baksida för att beräkna avstånden som gav önskad rotationsvinkel. Följande formler användes för att beräkna positionen för en önskad vinkel (se figur 8.5 för förtydligande):

$$r = \frac{d}{2} = \frac{580}{2} = 290mm$$

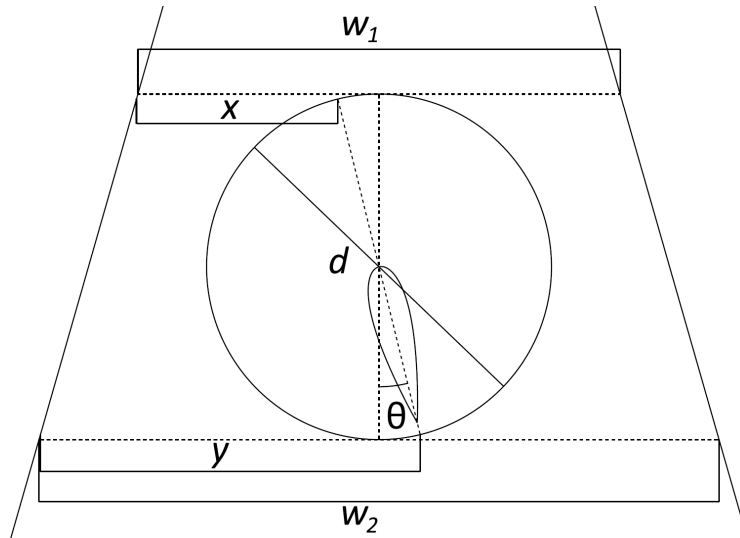
$$x = \frac{w_1}{2} + r \cdot \sin \theta$$

$$y = \frac{w_2}{2} - r \cdot \sin \theta$$

Mätningarnas som gjordes under de olika testerna antogs ha en noggrannhet på 1mm. Vinkelfelet kunde då uppskattas till $\arcsin(0,001) = 0,0573$ grader. Detta ansågs vara tillräckligt litet för att det inte skulle förekomma signifikant påverkan på resultatet.

8.4 Vindtunnelsvep

Svepen i vindtunnel gjordes över vindhastighet och rotationsvinkel mot vinden. De olika hastigheter och vinklar som testades var förbestämda. Sammanlagt gjordes 84 tester som användes för att kalibrera proben. Testningsförfarandet utfördes enligt följande procedur: Proben placerades med en specifik rotationsvinkel (se figur 8.4), då vinklen var satt kördes hela hastighetsspannet. Hastigheten startade på 5m/s och ökade med 5m/s för varje iteration, vilket resulterade i att sju hastigheter testades för varje vinkel. De olika vinklarna som testades var 2.5, 5, 10, 15 och 20 grader, samt deras negativa motsvarigheter. Anledningen till att fler tester gjordes vid små

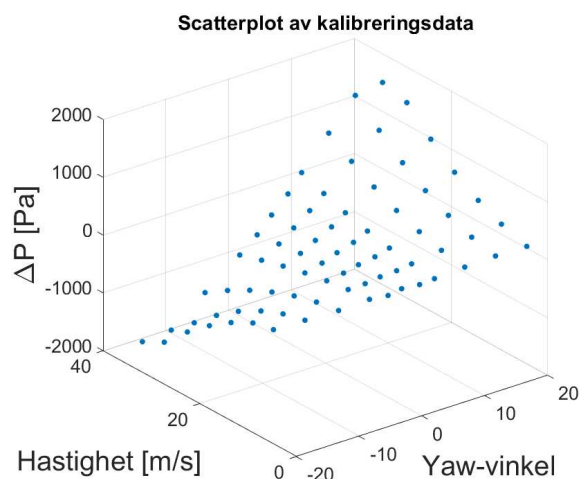


Figur 8.5: Mått för rotationsberäkning.

vinklar var att fordonet förväntas finna sig inom detta intervall under majoriteten av testkörningarna. Alltså kommer fler mätningar inom det området resultera i noggrannare resultat. Varje test utfördes under 30 sekunder och startades då vindtunnels hastighet hade stabiliserats på önskad hastighet.

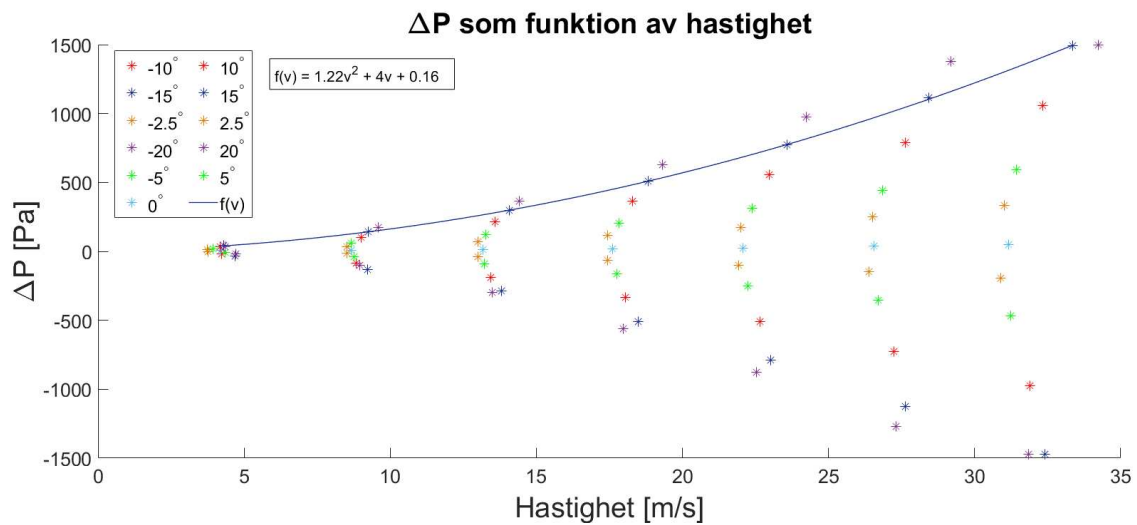
8.5 Parametrering av mätdata

Datan från vindtunnelmätningarna importerades in i MATLAB. Först gjordes ett sambandsdiagram över all data som kan ses i figur 8.6. Denna figur kan jämföras med figur 5.3 (b) från simuleringarna. Notera att svepen i simuleringarna endast gjordes på positiva yaw-vinklar, och att diagrammen liknar varandra för positiva värden. Eftersom datan såg bra ut fortsatte dataanalysen med att försöka parametrisera ytan.

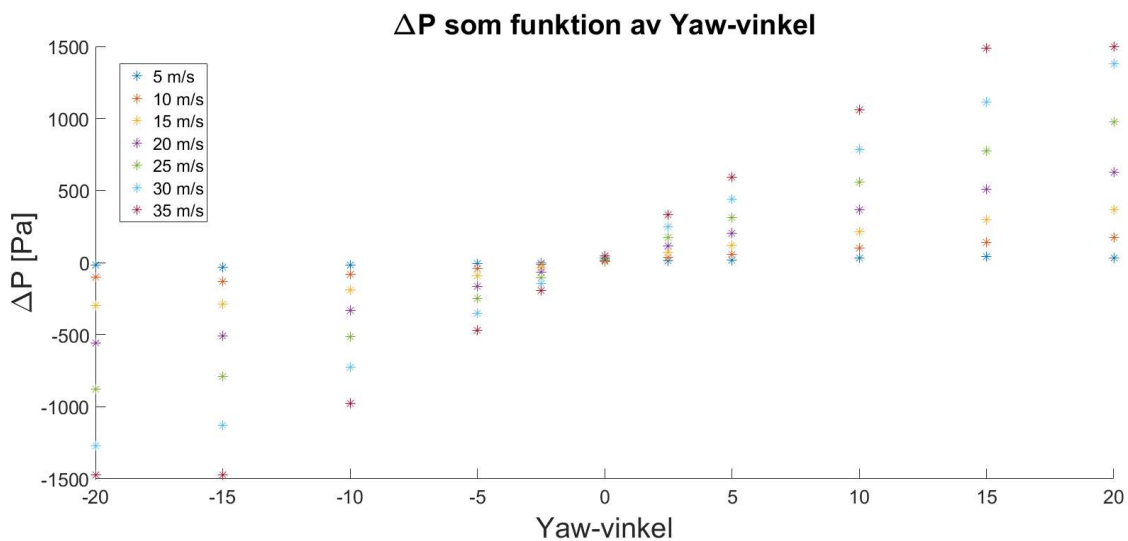


Figur 8.6: Ett sambandsdiagram över den insamlade datan. Tryckskillnaden ΔP på z-axeln, hastigheten på y-axeln och yaw-vinkeln på x-axeln.

För att få en uppfattning om hur tryckskillnaden ΔP beror på övriga variabler skapades figur 8.7. I figuren plottas ΔP på y-axeln mot hastigheten på x-axeln och olika vinklar anvisas av färgserier. Eftersom utseendet av mätserierna såg till stor del kvadratiska ut anpassades ett andragsgradspolynom till mätserien med $+15^\circ$ yaw-vinkel som ett exempel. Resultatet blev $f(v) = 1.22v^2 + 4v + 0,16$ och funktionen hade ett $R^2 = 0,999$. Detta bekräftade att $\Delta P \propto (av^2 + bv + c)$.



Figur 8.7: ΔP på y-axeln, hastighet på x-axeln där vinkel anges av färgserie. Dessutom plottas funktionen $f(v) = 1,22v^2 + 4v + 0,16$ som är en anpassad funktion för vinkeln $+15^\circ$. Funktionen $f(v)$ har ett $R^2 = 0,999$.



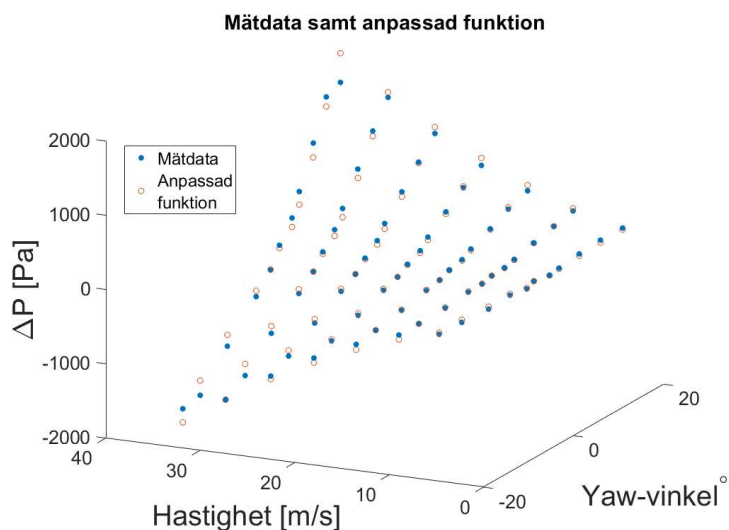
Figur 8.8: Tryckskillnaden som funktion av yaw-vinkeln för olika hastigheter. Data från vindtunnel tester.

På samma sätt som för hastigheten skapades figur 8.8. I figuren ses ΔP på y-axeln och yaw-vinkeln på x-axeln. De olika färgerna representerar mätserier för de olika hastigheterna. I figuren syns att ΔP beror linjärt på yaw-vinkeln för varje hastighet eller att $\Delta P = k(v)\theta + m(v)$ för någon funktion $m(v)$ och $k(v)$ som beror av hastigheten v . Från tidigare del av kapitel visades $\Delta P \propto (av^2 + bv + c)$, därför ansattes funktionen till

$$\Delta P = (av^2 + bv + c)\theta + d, \quad (8.1)$$

med konstanter a , b , c och d . Med hjälp av MATLAB:s 'fit'-funktion, anpassades funktionen till datan från figur 8.6. Resultatet kan ses i figur 8.9. De uppmätta

punkterna visualiseras i blått samt den anpassade ytans ΔP i rött. Resultatet av anpassningen blev $a = 0,0546$, $b = 1,205$, $c = -6,296$ och $d = 11,09$ och $R^2 = 0,9794$.



Figur 8.9: Den uppmätta datan samt den anpassade funktionen $\Delta P = (av^2 + bv + c)\theta + d$ i samma punkter. Anpassningen har ett $R^2 = 0,9794$ och konstanterna $a = 0,0546$, $b = 1,205$, $c = -6,296$ och $d = 11,09$.

Den resulterande anpassningen passar datan väl eftersom R^2 är mycket högt. Det blir större fel för stora hastigheter och extrema yaw-vinklar (över 20m/s och 15°) men det anses osannolikt att proven kommer utsättas för dessa förhållanden. Därför anses anpassningen vara bra och kommer användas för att mäta yaw-vinkeln. Från ekvation (8.1) kan θ lösas ut och den slutgiltiga formeln för yaw-vinkeln blir:

$$\theta = \frac{\Delta P - d}{av^2 + bv + c}.$$

9

Resultat och diskussion

I detta kapitel redovisas och diskuteras det slutliga resultatet. Kapitlet behandlar probens prestanda och eventuella felkällor. Vidare listas också möjliga vidareutvecklingspunkter. Avslutningsvis presenteras en slutsats av arbetet.

9.1 Färdig produkt

Den färdiga proben har en höjd på 156 mm, en längd på 269 mm (219 mm utan pitotrör) och en maximal bredd på 52 mm. Proben har en totalvikt på 348 gram då den innehåller följande elektronik; en SD-kortläsare med plats för kort av typ microSD (HW-125), en GPS-sensor med antenn (GY-NEOMV2), två trycksensorer (ELVH-MF12D-HAAH-C-NAA5), en Arduino Uno, och ett 9V-batteri.

Den slutgiltiga proben startar då strömkällan ansluts. Den börjar direkt att logga data till en ny loggfil på microSD-kortet. För att skapa en ny loggfil måste antingen strömmen kopplas av och på eller då reset-knappen på Arduinon tryckas in. Efter mätningarna har genomförts måste loggdatan konverteras till vinkeldata. Konverteringen görs genom att importera loggdatan till ett MATLAB-skript som kan ses i appendix B

Noggrannheten på probens mätningar varierar med hastigheten v och vinkeln θ . Vid små vinklar och låga hastigheter är tryckskillnaden liten, ungefär $\pm 15\text{Pa}$ vilket motsvarar ett fel i yaw-vinkel på $0,2^\circ$. Då hastigheten ökar och vinkeln blir större växer felet på den uppmätta yaw-vinkeln, då $\theta \geq 15^\circ$ och $v \geq 25\text{ m/s}$ blir tryckskillnaden $\pm 70\text{Pa}$ eller ett fel i yaw-vinkel på $2,5^\circ$. Sammantaget kommer mätfelet befinna sig inom intervallet $0,2^\circ < \theta < 2,5^\circ$.

Ett tilläg bör göras gällande probens varierande mätfel. Förhållanden som ger upphov till stora vinklar och hastigheter som resulterar i höga mätfel är ej relevanta för formelbilen som proben är ämnad för. Vid normal körning (upp till 15m/s) kommer proben ha ett mätfel under 1° .

9.2 Validering av krav och önskemål

För att kontrollera om det framtagna konceptet når upp till de krav och önskemål som sattes i början av projektet analyseras kraven och önskemålen mot det slutliga resultatet. De uppställda kraven och önskemålen är ej rangordnade, och ingen jämförelse av de olika kraven och önskemålen har genomförts.

En kategori berör prestandan. Mätningens omfattning hade ett krav på 15° och ett önskemål på 20°. Den bästa vingprofilen gav upphov till separation vid 13°-15° enligt CFD-simuleringarna. Då sensorerna placerades långt fram på vingprofilen ökades trycket stabilt trots separation på vingen, och mätningar kunde utföras även efter separation. Med andra ord uppfylldes både kravet och önskemålet rörande mätningens omfattning.

Ett krav var ett mätfel på maximalt 1°, samtidigt som önskemålet var att minimera mätfelet så mycket som möjligt. Då proben används inom det menade hastighetsspannet kommer felet vara mindre än 1°, vilket har validerats av datan från vindtunneltesterna. Mätfelet ökar med hastigheten, alltså kommer kravet ej uppnås vid hastigheter högt över hastighetsspannet.

Det framtagna konceptet skulle enligt kravspecifikationen kunna drivas med batteri. Proben är designad för att kunna drivas med ett 9V-batteri, men har bara testats i vindtunnel med en extern energikälla. Batterifunktionen har därmed inte testats och kravuppfyllnaden kan därför ej behandlas. Det sista kravet i prestandakategorin var att konceptet skulle vara okänslig för störningar, exempelvis lateral acceleration. Detta kriterium kan ej utvärderas då proben endast har testats i vindtunnel.

En kategori i kravspecifikationen berör funktionaliteten, där ett kriterie berör demonterbarhet. Proben bedöms möta detta krav, mycket på grund av att probens skarvar blev såpass små att ingen tejpning krävdes. Ytfinheten var också tillräckligt fin för inte kräva spackling eller målning. Därmed hålls proben endast ihop med demonterbara skruvförband som kan lossas med skruvmejsel. Åtkomst till delar erhålls enklast genom sidoluckan eller genom toppluckan. En strömbrytare var ett krav, men ingen har installerats. Därmed uppfylls inte detta krav.

Ett krav gällde att avläsning av data maximalt ska ta 15 minuter. Detta krav uppfylls eftersom en lucka enkelt kan tas loss för att komma åt SD-kortet. Proben är utrustad med en GPS vilket var ett önskemål, den har dock inte testats på grund av tidsbrist. Ett önskemål var att proben skulle utrustas med en accelerometer, men den uteslöts till fördel av ytterligare förfining av prestandan på delar som berör huvudkraven.

Ett annat krav fastställde att det måste vara möjligt att byta batteri, med önskemålet att det ska vara möjligt att ladda batteriet. Både krav och önskemål är uppfyllt. Batteriet kan dock inte laddas samtidigt som det är placerat i proben.

En annan kategori i kravspecifikationen berör vikt, utformning och placering. Proben fick inte väga mer än 3kg. Den slutgiltiga vikten på 348 gram möter detta krav. Vid utformningen av proben var det viktigt att den ej stör sikten till en betydande grad för föraren. Detta har inte testats på fordonet, men ett enkelt test har utförts där proben placerats på liknande relativ position som den hade gjort om den monterades på CFS-bilen. Proben ansågs i detta test inte störa sikten nämnvärt.

Miljökategorierna bestod av fem kriterier: Proben ska vara vattentålig, tåla vibrationer, klara temperaturer från 0° C till 40° C och kunna användas i en hastighet på 80km/h. Endast hastighetskravet har testats i vindtunnel och bedöms vara uppfyllt.

Användning och kostnad var de sista två kategorierna i kravspecifikationen. Ett av de upplistade kriterierna var att informationsavläsning ska vara möjlig i samband med test på en testbana. Med detta menas att datan ska kunna extraheras från proben och laddas upp på en dator på plats. Detta krav är uppfyllt. Det sista kriteriet var att kostnaden skulle minimeras. Detta kriteriet har varit en bidragsfaktor till flera beslut under projektets gång. Kostnaden för probens tillverkning uppskattas till 1700kr.

9.3 Felkällor och mätfel

Det finns ett flertal faktorer och felkällor som kan påverka probens mätningar. Dessa faktorer och felkällor redogörs för nedan.

9.3.1 Felkällor i konstruktion

Det finns tre huvudsakliga felkällor kopplade till probens konstruktion. Den första berör Pitot-röret. Spetsen på röret är något vinklat, vilket skulle kunna påverka mätningar i olika vinklar. En annan felkälla berör kopplingen mellan sensorer och mätningspunkter. Slangarna som löper från mätthålen till sensorerna håller inte samma längd för alla hål. Om det visar sig att slangens längd har en icke-försumbar effekt på mätningarna kan resultatet, särskilt från mätningarna i de symmetriska hålen i fronten, bli förskjutna eller på andra sätt påverkade. En tredje felkälla kopplas till utformningen och konstruktionen av mätthålen på probens front. Utformningen av de främre mätthålen (djup, diameter) var något godtyckliga. Det är möjligt att en annan utformning av mätthålen kan återge mer korrekta tryckmätningar. Ytan på den färdiga proben innehåller ojämnheter som ett resultat av tillverkningsmetoden, som kan ha en inverkan på luftflödet i och runt de främre mätthålen. Dessa ojämnheter är inte heller identiska på båda sidor. Detta kan ge en skillnad mellan symmetriska mätningar.

9.3.2 Kalibreringsfel

Trots kalibreringsarbetet är kalibreringen inte perfekt. Som tidigare diskuterat är funktionen som relaterar θ med ΔP och v inte exakt. Funktionen fungerar bra för små vinklar och låga hastigheter, men felet ökar när hastigheten och vinkeln ökar. En anledning till detta är ansatsen för funktionen. Ett högre ordningens polynom

skulle kunna ge lite bättre resultat. Dessutom skulle funktionen kunna anpassats till $\sin \theta$ eller $\tan \theta$ istället för θ . Detta har skulle vara mer naturligt då vinklar inte vanligtvis multipliceras med andra storheter. Dessa anpassningar hade dock gett upphov till ett mer komplicerat uttryck som hade varit svårare att anpassa till datan.

I två av mätningarna uppnåddes sensorernas maxtryck. Detta syns tydligt i figur 8.8 där den räta linjen för 35 m/s blir platt vid $\theta = \pm 20^\circ$. Dessa värden har en negativ effekt på anpassningen av funktionen, men eftersom förhållandena för dessa mätningar är så extrema hade mätningarna kunnat ignoreras för en bättre anpassning.

9.4 Vidareutveckling

Den slutgiltiga yaw-proben kan ses som en fungerande prototyp. Huvudfunktionen är löst, men många andra funktioner är inte utvecklade. Det finns därmed möjlighet till förbättring, exempelvis att förenkla användningen.

Enligt kravspecifikationen som skapades i början av projektet ska proben enkelt kunna av- och påmonteras på CFS-bilen. Eftersom man endast vill köra med proben monterad på bilen vid mätningar ska man enkelt kunna montera eller lyfta av proben efter behov. För att proben ska fungera ordentligt måste probens vingprofil monteras rakt på bilen, det vill säga noll grader relativt mot bilens mittlinje. För nuvarande finns det ingen lösning som gör att det enkelt går att montera av och på proben på CFS-bilen. Som man kan se i figur 7.1 är proben designad med monteringshål undertill. En potentiell vidareutveckling av proben är att designa en adapter som kan monteras i dessa hål. Denna adapter bör ha funktionalitet som gör det möjligt att enkelt montera och demontera proben på CFS-bilen på ett sätt som säkerställer att probens vingprofil har en yaw-vinkel på 0° relativt bilens körriktning.

För tillfället finns inget smidigt sätt att kontrollera om proben loggar yaw-data eller inte. Proben börjar logga data i en ny fil varje gång den kopplas till en strömkälla eller om Arduinos reset-knapp trycks ner. För att slippa bryta strömmen eller öppna probens lucka varje gång man vill göra en ny mätning bör proben ha en strömbrytare och en start-/stoppknapp för loggning som är tillgänglig från probens utsida. Denna start och stoppknapp bör även indikera ifall data loggas eller inte, till exempel med en lampa som tänds när data loggas.

Vill man komma åt probens SD-kort måste fyra skruvar skruvas ur, se figur 7.1. Detta gör det något omständligt att kontrollera mätdata. En vidareutveckling är att göra probens SD-kort mer lättillgängligt.

När yaw-proben används i verkligheten kommer den utsättas för vibrationer. För att säkerställa att elektriska kopplingar ej lossar på grund av dessa vibrationer bör samtliga kopplingar, med undantag för batteri, lödas.

GPS-modulen i proben fungerar inte optimalt. När den utför en mätning förhindrar

den resten av Arduino-mjukvaran att köra. Den mäter för tillfället koordinaterna en gång varje sekund, men har möjlighet att mäta upp till 5 gånger per sekund (5Hz), vilket motsvarar mätningar med 2,7 meters mellanrum i en hastighet av 50km/h. Detta tillsammans med modulens noggrannhet på 2,5 meter kan bli ett problem eftersom CFS-bilen kör på små banor med väldigt snäva kurvor. Möjlig vidareutveckling är att byta GPS-modul eller undersöka om det är möjligt att integrera den nuvarande modulen på ett sätt som inte stör övriga komponenters funktion.

9.5 Samhälleliga och etiska aspekter

Det bedöms att projektet ej har någon betydelsefull samhällelig eller etisk påverkan. Däremot kan man argumentera för att resultatet av projektet har haft en mindre positiv påverkan, eftersom arbetet har ökat tillgängligheten för information berörande utveckling och tillverkning av en billig yaw-prob. En trolig följd är att andra Formula Student-lag kan använda sig av denna information.

9.6 Slutsats

Syftet med studien var att designa, konstruera, kalibrera och testa en yaw-prob med målet att den slutgiltiga proben kan användas av CFS. Detta gjordes genom att framställa en kravspecifikationslista som tillsammans med CFD-analyser i två och tre dimensioner användes för att jämföra olika mätkoncept. Efter undersökningen av mätkoncepten konstruerades det lämpligaste konceptet och kalibrerades sedan i Chalmers vindtunnel. Den slutgiltiga proben kan mäta yaw-vinkel med ett mätfel på mindre än 1° vid tävlingsförhållanden.

Referenslista

- [1] B. Yager, "Racing Physics", nas.nasa.gov, <https://www.nasa.gov/About/Education/Racecar/physics.html>, hämtad: 2022-02-08
- [2] R. Fagnan, "The first appearance of wings on Formula 1 cars", us.motorsport.com, <https://us.motorsport.com/f1/news/1968-first-wings-f1-1000902/1389076/>, hämtad: 2022-02-22
- [3] C. Bienz, T. Larsson, T. Sato, B. Ullbrand "In Front of the Grid - CFD at SAUBER PETRONAS F1 Leading the Aerodynamic Development", presenterad under 1st European Automotive CFD Conference, Bingen, Tyskland, Juni. 25e-26e, 2003
- [4] "Disciplines", Formulastudent.de, <https://www.formulastudent.de/about/disciplines/>, hämtad: 2022-02-08
- [5] Atlas F1, "Britain Preview Quotes", Autosport.com, <https://www.autosport.com/f1/news/britain-preview-quotes-renault-5066395/5066395/>, hämtad: 2022-02-08
- [6] Nancy Hall, "Navier-Stokes Equations", grc.nasa.gov, <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/nseqs.html>, hämtad: 2022-05-09
- [7] G. Alfonsi, "Applied Mechanics Reviewed" Volym 62, 4e upplagan, 2009, <https://doi.org/10.1115/1.3124648>
- [8] F. M. White, "Fluid Mechanics Seventh Edition", New York, NY, US, Mcgraw-Hill Education, 2011, ch. 1,6,7, pp. 27-28, 357-366, 512-516
- [9] J. Murad, "What is y+ (yplus)?" simscale.com, <https://www.simscale.com/forum/t/what-is-y-yplus/82394> hämtad: 2022-05-06
- [10] Aokomoriuta, "Law of the wall", Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Law_of_the_wall#/media/File:Law_of_the_wall_\(English\).svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Law_of_the_wall#/media/File:Law_of_the_wall_(English).svg), CC BY-SA 3.0, hämtad: 2022-05-11
- [11] Frank M. White, "Fluid Mechanics Eight Edition", New York, NY, US, Mcgraw-Hill Education, 2016, ch. 4, p.242
- [12] N. Hall "Pitot-Static Tube" grc.nasa.gov, <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/pitot.html>, hämtad: 2022-04-29
- [13] Chaos386, "Pitot tube", Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Pitot_tube#/media/File:Pitot_tube_types.svg, CC BY-SA 3.0, hämtad: 2022-05-11
- [14] L.SANKARALINGAM, C.RAMPRASADH "A comprehensive survey on the methods of angle of attack measurement and estimation

- in UAVs” <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.11.003> , hämtad: 2022-03-15
- [15] ”Airfoiltools”, airfoiltools.com, <http://airfoiltools.com/> hämtad: 2022-03-27
- [16] N. Pfeiffer, ”Formula Student Aerodynamics – Growing Wings with CFD”, [simscale.com](https://www.simscale.com/blog/2017/07/formula-student-aerodynamics/), <https://www.simscale.com/blog/2017/07/formula-student-aerodynamics/>, hämtad: 2021-06-24
- [17] ”RATIOMETRIC PRESSURE SENSORS – WHAT IS IT?”, [gemssensors.com](https://www.gemssensors.com/blog/blog-detail/s/ratiometric-pressure-sensors-what-is-it), <https://www.gemssensors.com/blog/blog-detail/s/ratiometric-pressure-sensors-what-is-it>, hämtad: 2022-05-04
- [18] ”NMEA-0183 Sentences for GPS Receivers”, <https://w3.cs.jmu.edu/bernstdh/web/common/help/nmea-sentences.php>, hämtad: 2022-05-04
- [19] ”Low Pressure Microprocessor Micromanometer”, <https://www.bissistem.com/furness/files/FC0510-Laboratuvar-Tipi-Akis-0lcer.pdf>, Hämtad 2022-05-09

A

Arduinokod

GitHub-länk till koden: <https://github.com/charlierbc/yawprobe.git>.

```
1 #include <SoftwareSerial.h>
  #include <SPI.h>
3 #include <SD.h>

5 #define readPin1 A0
  #define readPin2 A1
7 float refVolt = 4983;
  float maxVolt = refVolt * 0.9;
9 float minVolt = refVolt * 0.1;
  float vPerUnit = refVolt / (1024);
11 float paPerMV = 2500 / (maxVolt - minVolt);
  float mV1 = 0;
13 float mV2 = 0;
  float pa1 = 0;
15 float pa2 = 0;
  float paOffset = 15.26;
17
  int RXPin = 3;
19 int TXPin = 2;
  SoftwareSerial gpsSerial(RXPin, TXPin);
21 String gpsData[15];

23 String fileName = "log";
  String labels = "%Time, Pa1, Pa2, mV1, mV2, Lat, Lng";
25
27
29 //-----
  void setup() {
31   SDinit();
    gpsSerial.begin(9600);
33   Serial.begin(9600);
    Serial.println("Initialization complete");
35   Serial.end();
  }
37
  void loop() {
39   logg();
  }
41 //-----
```

```

43
45
//-----Functions-----
47 float voltOnPin(int pin) {
    return analogRead(pin) * vPerUnit;
49 }
//-----
51 float vToPa(float mV_) {
    return ((mV_ - minVolt) * paPerMV) - 1250;
53 }
//-----
55 String readNMEA() {
    // Reading data recieved on the RX pin (pin 3) until "$GPRMC," is
    // found. The data between "$GPRMC," and a new line is then
    // returned.
57
    // .
59 while (gpsSerial.available() > 0) {
    gpsSerial.read();
61 }
63 if (gpsSerial.find("$GPRMC,") {
    String tmp = gpsSerial.readStringUntil('\n');
65 return tmp;
67 } else {
    Serial.begin(9600);
69 Serial.println("No nmea data found");
    Serial.end();
71 }
}
73 //-----
void parseNMEA(String tempMsg) {
75 // This function is looping through gps data and saving the
    // variables in an array. The variables is separated by ",". Then
    // it is converting the lat, lng and time into proper formats.
    int pos = 0;
77 int stringplace = 0;
    for (int i = 0; i < tempMsg.length(); i++) {
79 if (tempMsg.substring(i, i + 1) == ",") {
        gpsData[pos] = tempMsg.substring(stringplace, i);
81 stringplace = i + 1;
        pos++;
83 }
    }
85 gpsData[2] = ConvertLat();
    gpsData[4] = ConvertLng();
87 gpsData[0] = gpsData[0].toInt() + 20000;
}
89 //-----
String ConvertLat() {
91 //This funktion is converting koordinates from DDM format to DD
    // format.
    String posneg = "";
93 if (gpsData[3] == "S") {

```

```

    posneg = "-";
95 }

String latfirst;
float latsecond;
99 for (int i = 0; i < gpsData[2].length(); i++) {
    if (gpsData[2].substring(i, i + 1) == ".") {
101     latfirst = gpsData[2].substring(0, i - 2);
        latsecond = gpsData[2].substring(i - 2).toFloat();
103     }
    }
105 latsecond = latsecond / 60;

// Converting the coordinate to string before returning it
String CalcLat = "";
109 char charVal[9];
    dtostrf(latsecond, 4, 6, charVal);
111 for (int i = 0; i < sizeof(charVal); i++) {
        CalcLat += charVal[i];
113     }
    latfirst += CalcLat.substring(1);
115 latfirst = posneg += latfirst;
    return latfirst;
117 }
//-----
119 String ConvertLng() {
    //This funktion is converting koordinates from DDM format to DD
        format.
121 String posneg = "";
    if (gpsData[5] == "W") {
123     posneg = "-";
    }
125 String lngfirst;
    float lngsecond;
127 for (int i = 0; i < gpsData[4].length(); i++) {
        if (gpsData[4].substring(i, i + 1) == ".") {
129     lngfirst = gpsData[4].substring(0, i - 2);
        lngsecond = gpsData[4].substring(i - 2).toFloat();
131     }
    }
133 lngsecond = lngsecond / 60;

// Converting the coordinate to string before returning it
String CalcLng = "";
137 char charVal[9];
    dtostrf(lngsecond, 4, 6, charVal);
139 for (int i = 0; i < sizeof(charVal); i++) {
        CalcLng += charVal[i];
141     }
    lngfirst += CalcLng.substring(1);
143 lngfirst = posneg += lngfirst;
    return lngfirst;
145 }
//-----
147 void logg() {
    String nmea = readNMEA();

```

```

149 parseNMEA(nmea);
    mV1 = voltOnPin(readPin1);
151 mV2 = voltOnPin(readPin2);
    pa1 = vToPa(mV1) + paOffset;
153 pa2 = vToPa(mV2) + paOffset;
    Save();
155 }
//-----
157 void newFileName() {
    // Finding a name that is not allready in use
159 bool file = false;
    int count = 0;
161 while (!file) {
        if (SD.exists(fileName + ".csv")) {
163             count++;
                fileName = "log" + (String)count;
165         }
            else file = true;
167     }
    // When a filename is found it creates and initializes a new log
        file
169
    File myFile = SD.open((fileName + ".csv"), FILE_WRITE);
171 if (myFile) {
        myFile.println(labels);
173     myFile.close();
    }
175 else {
        Serial.begin(9600);
177     Serial.println("error: SDinit failed");
        Serial.end();
179 }
    }
181 //-----
183 void SDinit() {
    //Initializing the SD card
    if (!SD.begin(5)) {
185         return;
    }
187     newFileName();
    }
189 //-----
191 void Save() {
    // Saving and printing the log data
    File dataFile = SD.open((fileName + ".csv"), FILE_WRITE);
193 if (dataFile) {
        dataFile.print(gpsData[0]);
195     dataFile.print(String(pa1) + ",");
        dataFile.print(String(pa2) + ",");
197     dataFile.print(String(mV1) + ",");
        dataFile.print(String(mV2) + ",");
199     dataFile.print(gpsData[2] + ",");
        dataFile.println(gpsData[4]);
201     dataFile.close();
203     Serial.begin(9600);

```

```
205     Serial.print("Logfile: " + fileName + " ");
206     Serial.print("Time: " + gpsData[0]);
207     Serial.print("P1: " + String(pa1) + " ");
208     Serial.print("P2: " + String(pa2) + " ");
209     Serial.print("V1: " + String(mV1) + " ");
210     Serial.print("V2: " + String(mV2) + " ");
211     Serial.print("Lat: " + gpsData[2] + " ");
212     Serial.println("Lng: " + gpsData[4]);
213     Serial.end();
214 }
215 else {
216     Serial.begin(9600);
217     Serial.println("SD card error");
218     Serial.end();
219 }
```


B

MATLAB-kod

Nedan ses koden som används för att läsa en logg-fil och konvertera de uppmätta tryckskillnaderna till hastighet och slutligen yaw-vinkel. Det är även här den linjära justeringen av sensorerna sker.

```
1 % Load data file, p1 is wingpressure, p2 is dynamic pressure
  [pos, p1, p2] = getYawDataFromFile('file.txt');
3
4 % Convert dynamic pressure to velocity
5 % Rho from windtunnel
  rho = 1.2;
7 v = (arrayfun(@(x) sqrt(2 * abs(x) / rho), p2));
8
9 % Calculate the yawangles
  angle = getYawAngle(p1, v);
11
12 %% Reads all data from file and returns the pressures and gps data
13 % The sensor calibration is done here
  function [pos, p1, p2] = getYawDataFromFile(name)
15     data = load(name);
16
17     pos = data(:, 1);
18     p1 = data(:, 2);
19     p2 = data(:,3);
20
21     % BLUE DELTA p1
22     % RED PITOT p2
23     % Linear correction from calibration
24     bluefit = [0.011, 5.7];
25     redfit = [0.01, -0.77];
26     p1 = arrayfun(@(x) x + (bluefit(1) * x + bluefit(2)), p1);
27     p2 = arrayfun(@(x) x + (redfit(1) * x + redfit(2)), p2);
  end
29
30 %% Returns the yaw-angle fopr given pressure difference and
  velocity
31 function theta = getYawAngle(dp, v)
32     a = 0.05046;
33     b = 1.205;
34     c = -6.296;
35     d = 11.09;
36     theta = (dp - d) ./ (a * v.^2 + b * v + c);
37 end
```

exampleUse.m

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2022

www.chalmers.se



CHALMERS