

Sindre Folkvord  
Øystein Nordbotten

# Design og konstruksjon av frontvinge og nesekon til en replika av en formel 1-bil

Bacheloroppgave i ingeniørfag maskin nettbasert  
Veileder: Thomas Haavi

Mai 2020





Sindre Folkvord  
Øystein Nordbotten

# **Design og konstruksjon av frontvinge og neseikon til en replika av en formel 1-bil**

Bacheloroppgave i ingeniørfag maskin nettbasert  
Veileder: Thomas Haavi  
Mai 2020

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for vareproduksjon og byggteknikk



Oppgavens tittel: <b>Design og konstruksjon av frontvinge og neseikon til en replika av en formel 1-bil</b>	Dato: 20.05.2020		
	Antall sider: 64		
Masteroppgave: <input type="checkbox"/>		Bacheloroppgave: <input checked="" type="checkbox"/>	X
Navn: Sindre Folkvord og Øystein Nordbotten			
Veileder: Thomas Haavi			

**Sammendrag:**

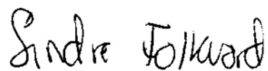
Denne bacheloroppgaven har blitt skrevet på vegne av NTNU Gjøvik, og har vært fokusert på å designe og produsere en fungerende frontvinge og neseikon til en replika av en Formel-1-bil. Frontvingen skal generere marktrykk og kunne fungere i hastigheter opptil 180km/t, og ha en form for krasjsikring innebygget i neseikonet.

For å gjøre dette har dataassistert design og dataassistert strømningsanalyse blitt benyttet i designprosessen. Videre har programvare for dataassistert produksjon blitt benyttet for å generere skjærbaneprogrammet til CNC-fresing av støpeformer i ekstrudert polystyren-skum. Til slutt ble støpeformene benyttet til våt-håndopplegg av karbonfiberduk og epoksy for å støpe test-deler i karbonfiber.

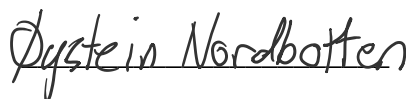
På grunn av stengte laboratorier grunnet Covid-19-pandemien, har kun datamodellene og støpeformene, samt noen test-deler blitt produsert i dette prosjektet. Forberedelser og noen tester har blitt gjennomført og prosessen har blitt evaluert for videre arbeid i fremtiden.

**Stikkord:**

Formel 1-frontvinge
Aerodynamikk
Karbonfiber
CNC-maskinering



Sindre Folkvord



Øystein Nordbotten

# Abstract

This bachelor thesis has been written on behalf of NTNU Gjøvik and has been focused on designing and producing a functioning carbon front wing to a Formula 1-replica car. This front wing should be capable of functioning in speeds up to 180km/h and should be designed to have some form of crash-element built into the nosecone.

To achieve this, computer assisted design and computational flow analysis has been used in the design process. Further, computer aided manufacturing has been used to generate tool paths for CNC-milling of casting molds in extruded polystyrene-foam. Last, wet hand-layup of carbon fiber and epoxy has been used to create carbon fiber-test-parts out of the molds.

Due to the unexpected circumstances with the Covid-19-pandemic and therefore closed labs, only the computer design-models and casting molds have been finished in this project. Preparations and some tests have been completed and the process has been evaluated for further work in the future.

# Forord

Denne bacheloroppgaven er skrevet av to nettbaserte maskiningeniørstudenter ved NTNU Gjøvik. Oppgaven er utført for og i samarbeid med NTNU Gjøvik. Formålet med prosjektet har vært å designe og produsere en frontvinge i karbon til en replika av en Formel 1-bil

Vi vil gjerne benytte anledningen til å takke alle som har bidratt med råd, innspill og kritiske spørsmål, og som har fungert som sparringspartnere i faglige diskusjoner under arbeidet med denne oppgaven.

Takk til

- Veileder førsteamanuensis Thomas Haavi ved NTNU Gjøvik for god hjelp under arbeidet.
- Tor Erik Nicolaisen, laboratorieleder ved Institutt for vareproduksjon og byggingteknikk for mange nyttige ideer og innspill.
- Professor Sotirios Grammatikos ved Institutt for vareproduksjon og byggingteknikk for hjelp og diskusjon rundt bruken av karbonfiber i prosjektet.
- Alle samarbeidende grupper som har hatt oppgaver knyttet til Formel 1-replikaen
- Familie som har hjulpet med råd og motiverende innspill underveis

# Innholdsfortegnelse

Abstract .....	ii
Forord .....	iii
Terminologi.....	ix
Figurliste.....	ix
Tabelliste .....	xii
Begrepsforklaring .....	xiii
1 Innledning.....	1
1.1    Bakgrunn .....	1
1.2    Avgrensninger og forutsetninger .....	2
1.2.1.1    Hastighet og aerodynamikk .....	2
1.2.1.2    Design .....	2
1.2.1.3    Krasjegenskaper .....	3
1.2.1.4    Innfestning .....	3
1.3    Problemstilling/prosjektmål.....	3
2 Teori .....	4
2.1    Luftstrømmer over en Formel 1-bil .....	4
2.2    Aerodynamiske prinsipper.....	6
2.2.1    Bernoulli.....	6
2.2.2    Newtons 3. lov.....	7
2.2.3    Coanda-effekten .....	9
2.2.4    Vortex.....	10
2.3    Programvare.....	12
2.3.1    Solidworks.....	12
2.3.2    Fusion 360 .....	12



2.3.3	Easel .....	12
2.4	Materialer.....	13
2.4.1	Formmateriale .....	13
2.4.2	West system Epoksy 206 Langsom.....	13
2.4.3	Fibermateriale.....	14
2.4.3.1	Karbonfiber .....	14
2.4.4	Festemidler .....	14
2.4.4.1	Lim.....	14
2.4.5	Festesystem .....	15
2.4.6	Kjernemateriale .....	15
3	Metode.....	16
3.1	Design.....	16
3.1.1	Koordineringsarbeid med samarbeidende grupper .....	16
3.1.1.1	Skann fra gruppe 6 .....	16
3.1.1.2	Nesekon fra gruppe 3 .....	16
3.1.2	Design av datamodell .....	17
3.1.2.1	Valg av vingeprofiler .....	17
3.1.2.2	Redesign av fester .....	18
3.2	Beregninger .....	19
3.2.1	Styrke .....	19
3.2.2	Krasjsikring .....	19
3.2.3	Aerodynamikk.....	20
3.2.3.1	Computational domain.....	21
3.2.3.2	Elementnett .....	22
3.2.3.3	Parameterstudie av hastigheter og vinkler .....	23
3.3	Produksjon av frontvinge.....	25

3.3.1	Budsjett.....	25
3.3.2	Revidert produksjonsplan for frontvinge .....	26
3.3.3	CNC-fresing av støpeformer på skolens lab .....	27
3.3.3.1	Søknad om lab-tilgang .....	27
3.3.3.2	HMS og smitteverntiltak på lab .....	28
3.3.3.3	Forberedelser.....	28
3.3.3.4	CNC-maskin .....	29
3.3.3.5	Oppsett av skjærbaneprogrammer .....	29
3.3.3.6	Innstilling av parametere.....	30
3.3.3.7	Simulering av skjærbaneprogram .....	30
3.3.3.8	Post-prosessering .....	31
3.3.3.9	Gjennomføring av CNC-fresing .....	31
3.3.4	Bearbeiding av former.....	33
3.3.5	Støpeprosess .....	35
3.3.5.1	HMS under støpeprosessen.....	35
3.3.5.2	Støping av karbon .....	35
3.3.5.3	Klipping og veiing av karbonfiberduk .....	36
3.3.5.4	Klargjøring av vakuumsystem .....	36
3.3.5.5	Oppmåling og blanding av epoksy .....	37
3.3.5.6	Håndopplegg av karbonfiber og epoksy i teststøp .....	38
3.3.5.7	Vakuumering av støpeformene .....	39
3.3.6	System for montering av ferdig støpte karbonfiberdeler .....	40
4	Resultat.....	41
4.1	Design.....	41
4.1.1	Adaptivt festesystem for øverste vinge .....	42
4.2	Simuleringer .....	44

4.2.1	Marktrykk og luftmotstand.....	44
4.2.2	Luftstrømmer.....	48
4.3	Produksjon.....	49
4.3.1	Støpeformer.....	49
4.3.2	Karbonfiberstøp.....	51
5	Diskusjon.....	53
5.1	Metode.....	53
5.1.1	Styrkeberegning .....	53
5.1.2	Simuleringer.....	54
5.1.2.1	Simlueringsmetode .....	54
5.1.2.2	Simuleringsresultat .....	55
5.1.3	CNC-maskinering.....	56
5.1.4	Støpeformer.....	56
5.1.4.1	Design av støpeformer .....	56
5.1.4.2	Bearbeiding av støpeformer.....	56
5.1.5	Støpeprosess.....	57
5.1.5.1	HMS.....	57
5.1.5.2	Påføring av slippmiddel.....	57
5.1.5.3	Epoksymengde.....	57
5.1.5.4	Mengde karbonfiberduk.....	58
5.1.5.5	Vakuumsystem.....	58
5.2	Sluttprodukt .....	59
5.3	Miljø og etikk .....	59
5.4	Alternative materialer og løsninger .....	60
6	Konklusjon .....	61
6.1	Anbefalinger for videre arbeid .....	62

7 Litteraturliste .....	63
8 Vedlegg .....	65

# Terminologi

## Figurliste

Figur 1: Replika av Formel 1-bil.....	1
Figur 2: Frontvinge på replika.....	2
Figur 3: Luftstrømmene over en Formel 1-bil .....	4
Figur 4: Bernoullieffekten.....	7
Figur 5: Newtons 3. lov og angrepsvinkel .....	8
Figur 6: Angrepsvinkel.....	9
Figur 7: Plot av trykkfordeling rundt vingen og retning på luftstrøm.....	10
Figur 8: Grafisk framstilling av vortexer på frontvinge og hvordan de beveger seg videre bakover bilen .....	11
Figur 9: XPS 250-skumplate .....	13
Figur 10: Pyrofil TR30S 3k karbonfiberduk .....	14
Figur 11: VuduGlu VM100 black .....	14
Figur 12: Camloc 50F 3700N-bolt.....	15
Figur 13: Eppler 212 airfoil fra UIUC .....	17
Figur 14: Selig/Donovan SD8020 airfoil fra UIUC .....	18
Figur 15: Neseikon sett fra siden med inndeling i fargekoder etter antall lag karbonfiberduk.	20
Figur 16: Computational domain .....	21
Figur 17: Computational domain med Global Mesh.....	22
Figur 18: Test av elementnett.....	22
Figur 19: Innstillinger for elementnett .....	22
Figur 21: Matefunksjon og plan den er lagt mellom.....	23
Figur 20: Input variables parameterstudie.....	23
Figur 22: Liste over noen konfigurasjoner og simuleringer.....	24
Figur 23: Sikker jobb-analyse før CNC-fres .....	27
Figur 24: Apparatorkort for X-carve CNC-maskin.....	28
Figur 25: Én av åtte former til neseikon med 48mm tykkelse .....	28

Figur 26: X-carve CNC-maskin .....	29
Figur 27: 3D-visning av generert adaptivt skjærprogram i Fusion 360 .....	29
Figur 28: Parametere for skjærprogrammet «Parallell» .....	30
Figur 29: Simulering av skjærbaneprogram i Fusion 360 .....	30
Figur 30: Justering av Z-akse ved hjelp av en «Z-probe» .....	31
Figur 31: Easel programvare underveis i fresing .....	31
Figur 32: Fresing av vingeprofil .....	32
Figur 33: Fresing av sideplater .....	32
Figur 34: Fjerning av ujevnheter med kniv .....	33
Figur 35: Lakkering av former .....	33
Figur 36: Smøring med slippmiddel.....	34
Figur 37: Sammenføyning av former og limtype som ble brukt.....	34
Figur 38: Sikker jobb-analyse for støpeprosessen.....	35
Figur 39: Oppmåling av karbonfiberduk før klipping.....	36
Figur 40: Klargjøring av vakuumpose .....	36
Figur 41: Klipping av pustemateriale.....	36
Figur 42: Fullt verneutstyr på under arbeid.....	38
Figur 43: Pensling av epoksy på karbonfiberduken i støpeformen.....	38
Figur 44: Former satt under delvis vakuum .....	39
Figur 45: Utsnitt i hovedvingen til montering.....	40
Figur 46: Datagenerert bilde av frontvingen fra Fusion 360.....	41
Figur 47: Adaptivt festesystem for øverste vinge .....	42
Figur 48: Eksplovert visning av adaptivt festesystem.....	43
Figur 49: 3D-printet feste.....	43
Figur 50: marktrykk og luftmotstand med vingeprofil 2 i forskjellige vinkler .....	45
Figur 51: Marktrykk i forhold til angrepvinkler .....	46
Figur 52: Luftmotstand i forhold angrepvinkler .....	46
Figur 53: Forhold marktrykk/luftmotstand ved ulike angrepvinkler .....	47
Figur 54: Marktrykk og luftmotstand i forhold til hastighet .....	47
Figur 55: plot av «Flow trajectories» .....	48
Figur 56: Plot med trykkforskjeller sett fra framsiden .....	48

Figur 57: Ferdig freste støpeformer og støpeform med skader etter feilinnstilling av skjærbaneprogram .....	49
Figur 58: Svake smådetaljer etter fresing .....	50
Figur 59: Former til hovedvingen før sammenliming .....	50
Figur 60: Ferdig herdet teststøp i støpeform .....	51
Figur 61: En av karbonfiberdelene med formmateriale og lakk hengende fast i overflaten ....	51
Figur 62: Endelig overflate på karbonfiber etter pussing .....	52

## Tabelliste

Tabell 1: Antall lag med karbonfiber etter fargekode .....	20
Tabell 2: Parameter for Computational domain .....	21
Tabell 3: Budsjett for produksjon av frontvinge .....	25
Tabell 4: Aktivitetsplan for produksjon .....	26
Tabell 5: Oversikt over blanding av karbonfiberduk og epoksy for teststøp .....	37
Tabell 6: Marktrykk og luftmotstand for en bestemt vinkel ved ulike hastigheter .....	44



# Begrepsforklaring

**Airfoil:** En vingeprofil/flyvinge som brukes for å manipulere hastigheten på luften som passerer forbi front- og bakvingen på en Formel1-bil. Vingen kan skape både løft og trykk, avhengig av hvilken retning den er orientert.

**Monocoque-konstruksjon:** Bilens bærende konstruksjon som er støpt i én del laget av karbon- og kevlararmert epoksy.

**Diffuser:** Aerodynamisk komponent som akselererer farten på luften som går under bilen, og på denne måten skaper trykkforskjeller som fører til økt marktrykk.

**CFD-analyse (Computational Fluid Dynamics) /Numerisk strømningsberegning:** Er kraftige dataanalyser som brukes til å løse problemer som inneholder gasser og væsker.

**Laminær luftstrøm:** Luftstrøm som i liten grad endrer horisontal og vertikal retning.

**Turbulent luftstrøm:** Rotete og tilsynelatende uforutsigbare luftstrømmer som f.eks. kan oppstå rundt legemer med høye Reynoldstall.

**Marktrykk/Downforce:** Er trykket en bil/gjenstand utøver på bakken, og er viktig for en bils veigrep.

**Vortex:** Er innen aerodynamikk en virvelbevegelse/rotasjon i en fluid.

**Reynoldstall:** Er en dimensjonsløs størrelse innen aerodynamikk som brukes til å anslå om en luftstrøm vil være laminær eller turbulent.

**Mating per tann/«Feed-per-tooth»/MPT:** Angir hvor mye materiale som skal skjæres for hver tann på skjæreverktøyet under CNC-fresing.

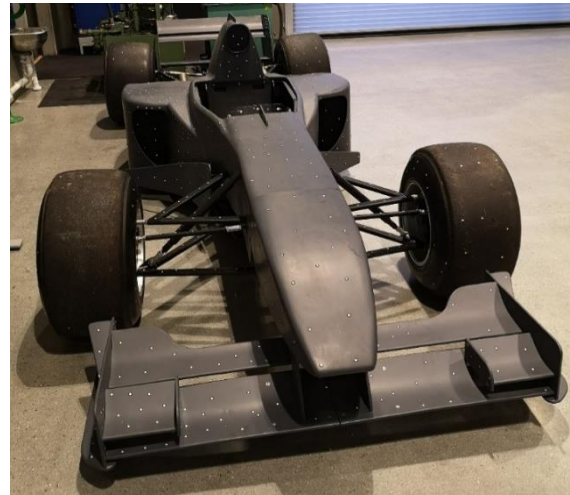
**Mating per omdreining/Feed-per-revolution/MPO:** Avstanden skjæreverktøyet beveger seg inn i arbeidsstykket per omdreining.

**Angrepsvinkel:** Vinkelen mellom en vinges bevegelsesretning og en referanselinje.

# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Bakgrunnen for dette prosjektet var at NTNU Gjøvik hadde fått tilgang til en replika i plast av en Formel 1-bil. Sammen med eieren av replikaen ønsket derfor skolen å bygge denne om til en kjørbar bil, som en del av flere forskjellige bacheloroppgaver. Byggingen av bilen innebar at hele bilen måtte modelleres på data, og endringer måtte designes. Dette året har fire forskjellige bacheloroppgaver relatert til denne replikaen blitt gjennomført. Disse fire er knyttet til bilens drivlinje og bakre hjuloppheng, fremre hjuloppheng, hoveddel/monocoque, frontvinge og neseikon.



*Figur 1: Replika av Formel 1-bil*

Denne oppgaven tar for seg frontvingen og neseikonet, som er den fremste delen av bilen. I formel 1 regnes komponentene denne oppgaven omhandler for å være viktige aerodynamiske komponenter, med hensikt å skape marktrykk og styre luftstrømmer videre bakover bilen. Neseikonet skal også bidra til å ta opp krefter ved eventuelle krasj. Dette vil da være viktige elementer i denne oppgaven sammen med produksjonsmetode og produksjon.

## 1.2 Avgrensninger og forutsetninger

Oppgaven er avgrenset til å gjelde frontvingen og nesekonen. Bakre grense for oppgaven går der nesekonen møter monocoque. Dette punktet kan sees som en linje/kutt like foran hjulopphenget på bildet til høyre. På grunn av et ønske fra samarbeidende grupper, har denne linjen blitt flyttet 116mm lenger bak enn på bildet. Dette for å gjøre tilgangen til det fremre hjulopphenget lettere. Oppgaven er derfor avgrenset til å gjelde alle komponenter derfra og framover på bilen.



Figur 2: Frontvinge på replika

### 1.2.1.1 Hastighet og aerodynamikk

Den ferdige bilen skal ha en hastighetsbegrensning på 180km/t. Vingens aerodynamiske egenskaper skal tilpasses og optimaliseres i forhold til denne hastigheten.

Det skal tas hensyn til sannsynlig vektfordeling slik at vingen kan kompensere for ujevn vektfordeling mot maksimal hastighet. Det forutsettes derfor at gruppene som jobber med fremre og bakre hjuloppheng tilpasser dempesystemet i forhold til simuleringsresultatene for marktrykk og luftmotstand som de får oppgitt, og at bakkeklaringen som er oppgitt fra disse gruppene er korrekt.

Det forutsettes også at det i senere arbeid kan designes bakre vinge som kan bidra til å kompensere for marktrykk skapt av frontvingen.

### 1.2.1.2 Design

Nesekonens design skal ikke ha store avvik fra replikaen, men på grunn av at denne er av dårlig kvalitet kan det gjøres små justeringer.

Når det gjelder frontvingens design det stor frihet for både form og antall elementer, men det må tas hensyn til at den skal festes til nesekonen, være i riktig høyde over bakken og ikke komme i konflikt med hjulene.

### **1.2.1.3 Krasjegenskaper**

Det skal finnes en innvendig struktur som er designet for å ta opp krefter ved eventuelle krasj på en slik måte at nesekonen deformeres progressivt fra tuppen og bakover.

### **1.2.1.4 Innfestning**

Det vil gjøres en kort vurdering av innfestningssystem, men detaljerte vurderinger og design av dette vil sendes videre til senere oppgaver på grunn av uklarheter om tilgjengelig plass rundt fremre hjuloppheng.

## **1.3 Problemstilling/prosjektmål**

Målet for dette prosjektet har vært å designe og produsere en frontvinge og en nesekon med utgangspunkt i en replika av en Formel 1-bil. Disse skal bygges etter aerodynamiske prinsipper, for å genere tilstrekkelig marktrykk under kjøring i hastigheter opptil 180km/t. De skal også manipulere luftstrømmene slik at effekten av aerodynamiske komponenter bakover på bilen økes. Nesekonen skal også konstrueres slik at den kan ta opp krefter ved en eventuell krasj, og den skal designes slik at det blir en jevn overgang i festepunktet mellom denne og monocoque. For å få til dette skal det benyttes ingeniørfaglige metoder og prosesser for å oppfylle målsetningene til prosjektet. Fremdriften, metoder og resultater skal dokumenteres, og fullført arbeid deles videre til grupper slik at de kan fortsette arbeidet mot endelig målsetning om å konstruere en fungerende bil. For at endelig målsetning skal være oppnåelig må det samarbeides med de tre gruppene som jobber med andre deler av bilen, slik at delene er tilpasset hverandre.

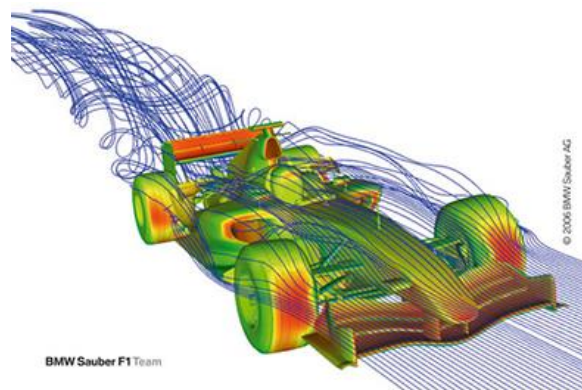
# 2 Teori

## 2.1 Luftstrømmer over en Formel 1-bil

Hensikten med å manipulere luftstrømmene over en Formel 1-bil er kort sagt å øke marktrykket bilen skaper. For å øke marktrykket brukes en rekke forskjellige aerodynamiske prinsipper som er med på å skape de egenskapene som er ønskelig for å øke bilens prestasjon. Dette kan for eksempel være bruk av trykkforskjeller skapt av en vingeprofil, og små luftvirvler/vortexer som drar med seg «skitten» turbulent luft bort fra bilen (Autosport, 2017a).

Veien luften tar på vei forbi bilen styres i stor grad av hvilke innretninger bilens designer har brukt for å styre denne. Den første delen av bilen som møter luften er frontvingen og denne har derfor stor betydning for hvordan luftstrømmen opptrer videre bakover langs bilen. Ved å bruke vingeprofiler til å bygge opp frontvingen kan luften som passerer denne manipuleres.

Her brukes de samme prinsippene som brukes for fly, men med motsatt rettede vinger kan det skapes marktrykk ved hjelp av trykk- og hastighetsforskjeller over og under vingeprofilene (Autosport, 2017b).



På Formel 1-biler bidrar hjulene til en stor del av den totale luftmotstanden, og det skapes en stor mengde «skitten» turbulent

*Figur 3: Luftstrømmene over en Formel 1-bil*

*Foto: (BMW Sauber AG, 2006)*

luft bak disse. Denne luften fører til at effekten av de aerodynamiske komponentene på bakenden av bilen, som bakvingen, blir mindre effektive. Et av målene til Formel 1-aerodynamikerne er derfor å sørge for at mest mulig av luften ledes rundt hjulene, og at den samtidig drar med seg den turbulente luften bort fra bilen. Dette gjøres ved å brukes ulike aerodynamiske innretninger på frontvingen og langs karosseriet som både leder luften i spesielle retninger, og skaper luftvirvler som drar luften i riktig retning (Autosport, 2017a).

Størstedelen av marktrykket bilen produserer kommer fra det såkalte «gulvet» og diffuseren som ligger under monocoque-konstruksjonen, altså bilens bærende konstruksjon. For at dette gulvet skal fungere må «ren» luft føres forbi frontvingen og inn til dette området. Dette gjøres ved å bruke en nøytral vingeprofil med et lavt Reynolds-nummer, noe som gjør at luften flyter rett forbi vingen med en tilnærmet laminær luftstrøm. Luften som kommer ut av bilen fra denne innretningen er «skitten» og er med på å skape turbulent luft for biler som kommer bak (F1Technical, 2018).

Bakerst på Formel 1-bilen brukes en bakvinge til å skape og balansere bilens marktrykk. På samme måte som for frontvingen, brukes vingeprofiler til å skape trykkforskjeller som gir en sugekraft mot bakken. Bakvingen skaper ca. 20-25% av bilens marktrykk, men den er ansvarlig for ca. 30% av den totale luftmotstanden. Luften fra bakvingen er også med på å skape turbulent luft bak bilen, som reduserer effekten av vingene til bilene bak (F1Technical, 2018).

Ute på racerbanen vil luften som passerer variere veldig og dette er vanskelig å ta høyde for i designprosessen. Bilen som ligger først i feltet eller som ikke har biler foran seg vil møtes av en luftstrøm som er tilnærmet laminær. Denne luften er relativt grei å forholde seg til, og er den ønskede typen luftstrøm for en Formel 1-bil. Laminær luft varierer i veldig liten grad i horisontal- og vertikal retning og er derfor relativt enkel å simulere ved hjelp av CFD-analyser (Meteorologisk institutt, 2017).

Biler som ligger bak andre biler møter derimot en luftstrøm som er langt mer komplisert enn den enkle laminære strømmen. En Formel 1-bil skaper enorme mengder «skitten» og turbulent luft bak seg på grunn av alle innretninger på bilene som skal manipulere luften. En bil som ligger bak en annen vil derfor ha større vanskeligheter for å skape et konstant marktrykk under kjøring på grunn av ujevn luft (McLaren racing, 2020). Årlig kommer det nye regler og restriksjoner fra Det Internasjonale bilsportforbundet (FIA) som blant annet skal gjøre denne ulempen mindre (FIA, 2020). Disse reglene og lagenes søken etter å utnytte disse til det fulle er en stor del av grunnen til at Formel 1 er en av verdens mest kostnadskrevede sporter.

## 2.2 Aerodynamiske prinsipper

### 2.2.1 Bernoulli

Bernoullis ligning beskriver bevegelsene i en væske under gitte forutsetninger.

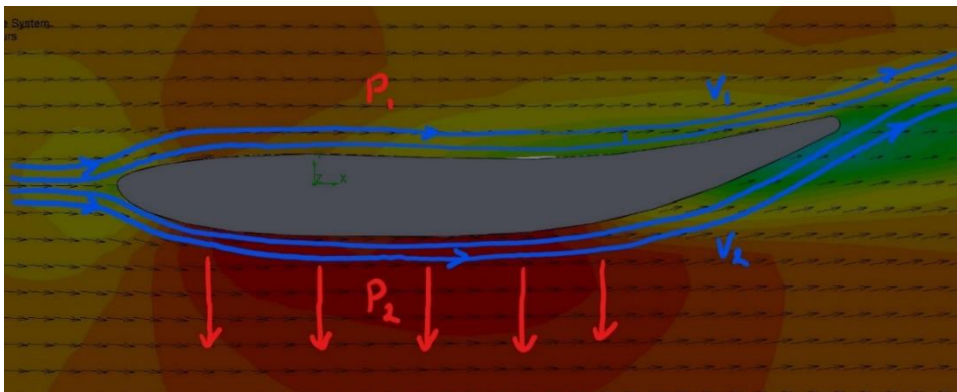
Forutsetningene for at ligningen skal være gjeldende er at væsken er inkompressibel, ikke-viskøs og at bevegelsene er ikke-turbulente (Pedersen, 2017). Ligningen vil i denne oppgaven benyttes til å beskrive luftstrømmenes bevegelser rundt vingeprofil, og dermed forklare utformingen av frontvingens vingeprofil.

$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gZ = \text{Konstant}$$

$$\text{Væsketrykk}(p) + \text{Hastighetstrykket} \left( \frac{1}{2}\rho V^2 \right) + \text{hydrostatisk trykk}(\rho gZ) = \text{Konstant}$$

Ligningen sier at væsketrykket, hastighetstrykket og det hydrostatiske trykket er konstant ved et hvert tverrsnitt av et væskerør (Ormestad, Grøn og Pedersen, 2019). Dette betyr at dersom det hydrostatiske trykket holdes konstant og hastighetstrykket øker så må det skje en reduksjon i væsketrykket. Dette er grunnlaget for Bernoullis prinsipp, som fastslår at dersom hastigheten av en væskemasse øker vil trykket i væsken reduseres. Bernoulli-effekten brukes ofte for å forklare hvordan flyvinger skaper oppdrift. Denne effekten skaper ikke nok oppdrift alene til at et fly holder seg i luften, men kan bidra med omtrent 20 % av flyvingenes oppdrift. Resten av oppdriften forklares av Newtons 3. lov (Brainscape, 2020). For en frontvinge vil samme prinsipp gjelde, men da med hensikt å skape marktrykk for å oppnå bedre veigrep.

Figur 4 viser en vingeprofil for en frontvinge, med luftstrømmer (blå linjer) på oversiden og undersiden. Her kan det legges merke til at luften som treffer vingen har lengre vei på undersiden enn på oversiden. Både oversiden og undersiden av vingen beveger seg i utgangspunktet med samme hastighet gjennom luften, men siden luften på undersiden har lengre vei rundt vingen må denne bevege seg litt raskere enn luften på oversiden,  $V_2 > V_1$ . Bernoullis prinsipp sier at trykket på undersiden av vingen blir mindre enn oversiden,  $P_1 > P_2$ , og vingen vil suges ned mot bakken.



Figur 4: Bernoullieffekten

### 2.2.2 Newtons 3. lov

I tillegg til Bernoullis prinsipp har Newtons 3. lov innvirkning på vingens oppbygning «Newtons 3. lov sier at når et legeme virker på et annet legeme med en kraft, vil det andre legemet virke tilbake på det første med en like stor kraft i motsatt retning» (Grøn, 2019). Når vingen beveger seg gjennom luften så virker vingen med en kraft på luften, mens luften virker med en like stor kraft tilbake på vingen.

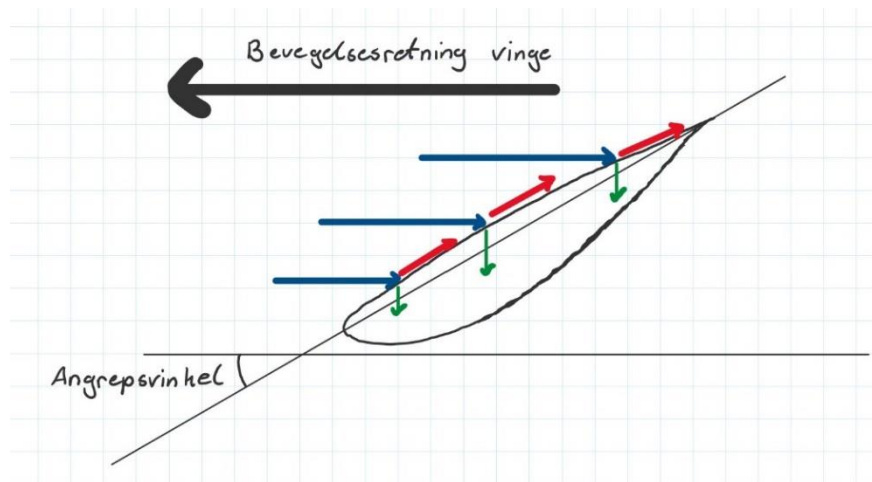
Prinsippet for hvordan Newtons 3.lov virker er likt for en flyvinge og en formel 1 bil, men med hensikt å skape trykk i motsatt retning av hverandre. Virkningen Newtons 3. lov på frontvingen kan derfor forklares på samme måte som for en flyvinge.

Newtons 3. lov skaper oppdrift på en flyvinge ved at den vinkles i forhold til bevegelsesretningen slik at luften som treffer vingen presses nedover. Når vingen presser luften ned, må ifølge Newtons 3. lov, luften presse vingen opp med en tilsvarende stor kraft. Vinklingen i forhold til bevegelsesretning kalles angrepsvinkel, og størrelsen på denne påvirker sammen med hastigheten og luftens tetthet størrelsen på oppdriften. Økning av hastighet fører til at mer luft presses nedover og dermed skapes mer oppdrift. Økt



angrepsvinkel gjør at luften på både over og undersiden av vingen presses mer nedover som medfører mer oppdrift. Dette skjer opp til en grense for angrepsvinkelen der luftstrømmen på oversiden av vingen går fra laminær strømning til turbulens, som medfører tap av oppdrift (Science Learning Hub, 2020).

Newtons 3. lov virker på samme måte for frontvingen på en formel 1 bil, men i motsatt retning slik at luften presses opp og vingen ned og det oppstår marktrykk i stedet for oppdrift. Figur 5 viser hvordan Newtons 3. lov virker på en frontvinge.



Figur 5: Newtons 3. lov og angrepsvinkel

Motstanden luften virker på et legeme med når det beveger seg gjennom luften er gitt ved ligningen nedenfor. Både marktrykk og luftmotstand for frontvingen er avhengig av denne ligningen.

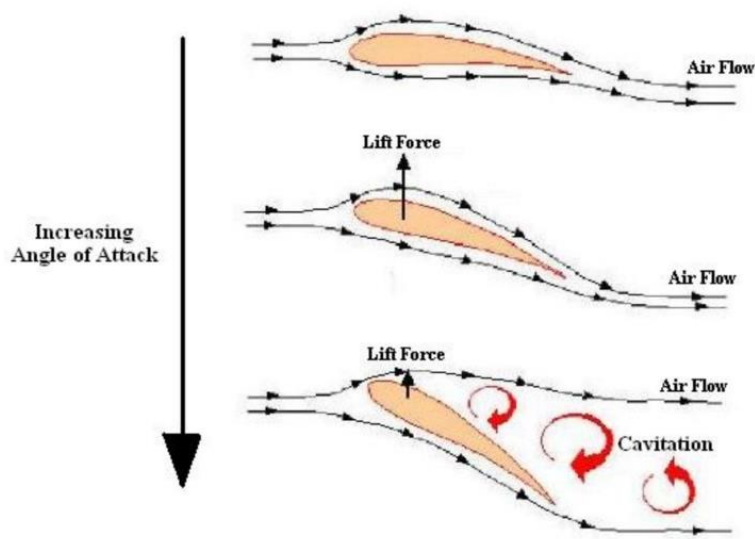
$$F_m = \frac{1}{2} \rho S C_D v^2$$

Denne motstandskraften er motsatt rettet av legemets bevegelseshastighet. Ligningen over viser at motstanden er avhengig kvadratet av hastigheten ( $v^2$ ), og den vil dermed øke omtrent proporsjonalt med hastigheten.  $S$  er arealet som møter luften, og dette er projeksjonen av legemet ned på et plan som står normalt på bevegelsesretningen.  $C_D$  motstandskoeffisient som er et bestemt av formen på legemet som beveger seg gjennom luften (Vistnes, 2006). For frontvingen vil arealet ( $S$ ) som møter luften være avhengig av angrepsvinkelen, og derfor ha innvirkning på marktrykk og luftmotstand.

### 2.2.3 Coanda-effekten

Coanda-effekten blir beskrevet som tendensen en væskestrøm har til å følge en kurvet flate i stedet for å fortsette i sin opprinnelige retning (JAES Company, 2019). I formel 1 benyttes dette både til å skape økt marktrykk fra frontvingen, og manipulere luften som passerer for å styrke effekten av de aerodynamiske komponentene bakover på bilen. Den bidrar til å øke marktrykk ved at ikke bare luft på oversiden av vingeprofilen presses oppover, som vist på figur 6, men at også luft som passerer på undersiden vil følge vingeprofilens kurve oppover. Dette betyr at en større luftmasse presses oppover og dermed øker marktrykket.

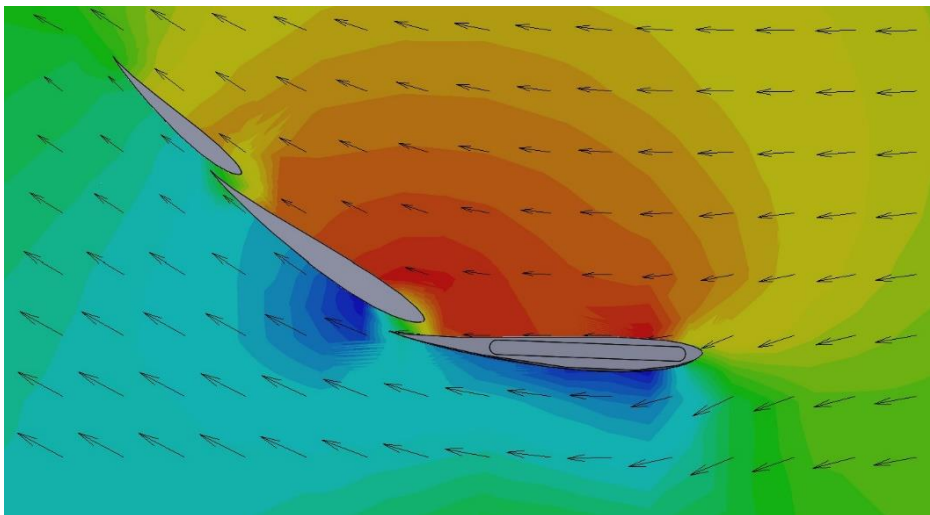
Figur 6 gir et bilde av hvordan denne Coanda-effekten virker på flyvinger. Den viser at økende angrepsvinkel vil rette luftstrømmen brattere nedover, som ifølge Newtons lover medfører økt oppdrift. Blir angrepsvinkelen for stor vil luften separeres fra vingen og et vakuum oppstår på baksiden. Da vil luft som passerer både over- og undersiden av vingen strømme inn i dette området, og luften bak vingen blir turbulent. Dette er ikke ønskelig da det reduserer vingens effekt betydelig (World Hovercraft Organization, 2004a).



Figur 6: Angrepsvinkel

Foto: (World Hovercraft Organization, 2004b)

Ved å bygge opp frontvingen av flere vingeprofil med gradvis økende angrepsvinkel som vist i figur 7, er det mulig å benytte seg av en større angrepsvinkel og likevel unngå separasjon mellom luftstrøm og vinge. Med en slik oppbygning vil noe av luften på oversiden av vingen passere gjennom de smale åpningene mellom vingeprofilene. At luften presses gjennom en slik smal åpning, tilsvarer en tvernsnittsreduksjon i et væskerør, som ifølge bernoulliligningen fører til hastighetsøkning og dermed trykkreduksjon. Dette gjør at trykket omtrent midt under andre vingeprofil er lavere enn trykket bakerst på første vingeprofil, og det samme skjer mellom andre og tredje vingeprofil. Luften med høyere trykk vil da trekkes mot området med lavere trykk under neste vingeprofil og dermed følge disse videre oppover, selv med stor angrepsvinkel. Figuren nedenfor er et simuleringsplott som viser at trykket bakerst på hver vingeprofil er lavere enn trykket midt under den neste.



Figur 7: Plot av trykkfordeling rundt vingen og retning på luftstrøm

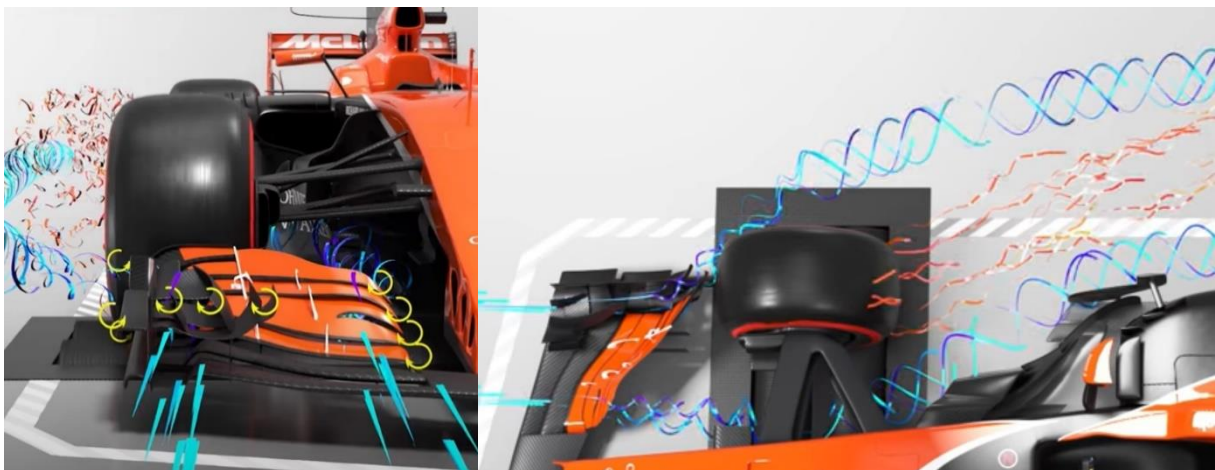
#### 2.2.4 Vortex

Vortex er en virvel-/rotasjonsbevegelse i et fluid, som for en frontvinge skyldes at luften fra oversiden av vingeprofilene vil forsøke å bevege seg mot undersiden. Siden luften ikke kan gå gjennom vingen vil den bevege seg mot enden og «velte» seg rundt kanten, slik at en rotasjonsbevegelse starter. I formel 1 benyttes slike virvler til å styre luftstrømmene rundt bilen, for å optimalisere effekten av bilens andre aerodynamiske komponenter (Autosport, 2017a).

Vortexene som oppstår når frontvingen beveger seg gjennom luften kalles vingevirvler. Slike virvler kan også sees bak vingetippene på fly. Derfor er årsaken til at disse dannes lik for både fly og formel 1, og den kan derfor forklares ved å se på flyvinger.

Virvlene dannes som et resultat av trykkforskjellen som oppstår mellom over- og undersiden av en vinge når den skaper oppdrift. Når en vinge beveger seg gjennom luften og skaper løft, vil det oppstå overtrykk på undersiden og undertrykk på oversiden av vingen. Luften vil da «forsøke» å utjevne trykkforskjellen, og dermed vil luften på undersiden bevege seg mot oversiden. Luften kan ikke gå gjennom vingen og vil da bevege seg ut mot enden og rotere rundt kanten og over på siden med lavere trykk (Giuni, 2013).

Disse virvlene skaper økt luftmotstand, kalt induisert motstand, som er et uunngåelig resultat av at en vinge produserer oppdrift. På fly er det ønskelig å redusere disse ved hjelp av vinglets, som er en knekk opp på vingens ende, for å redusere luftmotstand (Tandberg, 2019). Innen formel 1 gjøres det motsatte, slik at det dannes kraftigere virvler som skal bidra til å lede «skitten» turbulent luft rundt de bakre dekkene (Autosport, 2017a). Figuren nedenfor viser hvordan endene på vingeprofilene bøyer nedover på enden mot midten av bilen.



*Figur 8: Grafisk framstilling av vortexer på frontvinge og hvordan de beveger seg videre bakover bilen*

*Foto: (Autosport, 2017c)*

## **2.3 Programvare**

I dette prosjektet har det blitt brukt flere forskjellige dataprogram for å utføre nødvendig arbeid. Disse programmene ble valgt ut fra kriterier om brukervennlighet og pålitelighet i arbeid.

### **2.3.1 Solidworks**

Solidworks er et program for dataassistert design (CAD) fra produsenten Dassault Systèmes og ble brukt til datamodellering og strømningsanalyser i dette prosjektet. Solidworks er en programvare som er standard ved maskiningeniørutdanningen ved NTNU Gjøvik, og har blitt brukt av gruppemedlemmene tidligere. Dette var den avgjørende faktoren for at dette programmet ble benyttet. Ved hjelp av forskjellige funksjoner gjør Solidworks det enkelt å designe og simulere modeller og studier, i en og samme programvare.

### **2.3.2 Fusion 360**

På samme måte som Solidworks er Fusion 360 en programvare for dataassistert design (CAD) og har også støtte for dataassistert tilvirkning (CAM). Denne programvaren var ny for gruppemedlemmene, men er i stor grad lik Solidworks. Programmet ble brukt til å generere skjærbaneprogrammer til CNC-fresing av støpeformene som skulle lages, og den ble også brukt til å datagenerere bilder av frontvingen.

### **2.3.3 Easel**

Easel er en nettbasert programvare for kontroll og oppsett av X-carve-CNC-maskiner og ble benyttet til å sende ferdiggenererte G-koder fra Fusion 360 til CNC-maskinen.

## 2.4 Materialer

En forutsetning for å gjennomføre dette prosjektet har vært å holde kostnadene så lave som mulig. Dette har ført til at det har blitt gjort materialvalg som har risiko for å gjøre arbeidet mer tidkrevende, men til en lavere pris. Spesielt gjelder dette for valg av materiale til støpeformene, og valg av karbonfibertype.

### 2.4.1 Formmateriale

Opprinnelig var planen å bruke XPS 300-plater, men på grunn av at Jackofoam 250 XPS (Ekstrudert polystyren) var det som var tilgjengelig på laben, ble dette benyttet. Dette materialet har tilnærmet like egenskaper som XPS 300, og det var derfor et bytte som innebar små endringer av planen. Jackofoam 250 er et materiale som er lett å frese og som vil gi ønskede egenskaper ved bruk, men på grunn av at polystyren smelter ved kontakt med løsemidler måtte det tas hensyn til dette i valg av overflatebehandlingsmateriale til formene. Platene som ble brukt hadde de faktiske dimensjonene 597X48X1200mm, med oppgitte dimensjoner 600X50X1200mm.



Figur 9: XPS 250-skumplate

### 2.4.2 West system Epoksy 206 Langsom

Opprinnelig ble det bestilt West System Epoksy 205 Standard til bruk på dette prosjektet, men på grunn av bestillingsproblemer hadde gruppen kun varianten med langsom herder tilgjengelig. Denne epoksyen har en anbefalt minste arbeidstemperatur på 16 grader, i motsetning til standardvarianten som kan brukes ved mye lavere temperaturer.

## 2.4.3 Fibermateriale

### 2.4.3.1 Karbonfiber

Det ble tidlig besluttet at frontvingen skulle lages i karbonfiber, da dette er det eneste materialet som vil gi de ønskede egenskaper, og som er lett tilgjengelig. Det finnes en lang rekke forskjellige typer karbonfiberduker og det måtte derfor finnes en variant som passet til kravene om egenskaper og pris. Skolen anbefalte å bestille produkter fra leverandøren Easy Composites, og dette ble derfor gjort.

På grunn av prishensyn ble karbonfiberduken Pyrofil TR30S 3K bestilt, da denne ville tilfredsstille de egenskaper som trengtes. Dette er en karbonfiberduk som veier 210g per m<sup>2</sup> og er en såkalt «Twill-duk», som betyr at fibreene er vevd sammen i et rutemønster med retning 0/90 grader.



Figur 10: Pyrofil TR30S 3k karbonfiberduk

Foto: (Easy Composites Ltd, 2020b)

## 2.4.4 Festemidler

### 2.4.4.1 Lim

På grunn av at limen som skulle benyttes til dette prosjektet ville bli utsatt for store krefter under bruk, var det nødvendig å finne en limtype som både hadde god heft på materialet og stor styrke. Siden Easy Composites er en velkjent leverandør av materialer til komposittproduksjon, ble det valgt en limtype herifra.



Figur 11: VuduGlu VM100 black

Foto: (Easy Composites Ltd, 2020a)

Limen som ble valgt ble valgt på bakgrunn fra rådene som gis av Easy Composites knyttet til deres produkter. Her ble det anbefalt å bruke limet «VuduGlu VM100 Black 10 min Methacrylate», som er et festemiddel beregnet på å feste sammen karbondeler.

## 2.4.5 Festesystem

Et av de vanskeligste elementene ved design av frontvingen var å finne ut hvilket system som skulle benyttes for å feste frontvingen til resten av Formel 1-bilen. Etter undersøkelser hos forskjellige leverandører, ble det besluttet å bruke en festemiddeltype kalt «kvartvrilåser» (1/4-turn fasteners). Dette er et system som ville gi muligheter for å ta av og på vingen etter montering, og samtidig gi den nødvendige styrken og vibrasjonsmotstanden som trengtes.

Det finnes en rekke ulike festemidler i denne kategorien, men felles for alle er at de kan løsnes ved å vri verktøyet/festet en kvart runde. På grunn av et fjærsystem kan disse motstå sterke vibrasjoner, og systemet er brukt i en rekke ulike bransjer med krav til solide egenskaper.

Låsetypen gruppen valgte var Camloc 50F 3700N-serien som har en arbeidslast på 2600N, og en makslast på 3700N. Dette er godt innenfor behovet til dette prosjektet, og vil være et godt alternativ.



*Figur 12: Camloc 50F  
3700N-bolt*

*Foto: (Camloc, 2020)*

## 2.4.6 Kjernemateriale

Gruppen valgte å gå for et ekspanderende to-komponents polyuretanskum fra Siddis plast AS som kjernemateriale til frontvingen og nesekonen. Dette materialet ble valgt fordi det kunne fylles i delene etter montering og på denne måten fungere som et tilpasset kjernemateriale. Dette ville være med på å øke karbonfiberdelenes styrke betraktelig ved å gjøre konstruksjonen om til en sandwich-konstruksjon..



# 3 Metode

## 3.1 Design

### 3.1.1 Koordineringsarbeid med samarbeidende grupper

Under hele prosjektperioden har det blitt samarbeidet med de andre gruppene som har holdt på med prosjekter tilknyttet skolens Formel 1-replika. På grunn av Covid-19 har dette blitt gjort gjennom felles gruppe på samarbeidsplattformen Microsoft Teams, og ved bruk av videokonferansetjenesten Zoom. Her har datamodeller og informasjon blitt delt fortløpende for å unngå misforståelser under designprosessen.

#### 3.1.1.1 Skann fra gruppe 6

Formel 1-replikaen som var utgangspunkt for dette prosjektet ble skannet av gruppe 6 med Morten Moland Olavsbråten, Jonas Øvretveit og Bjørnar Brunsberg Nyhus. Dette skannet ble så delt med de andre gruppene, og noen av de videre modellene ble bygget på dette.

#### 3.1.1.2 Neseikon fra gruppe 3

For å være sikre på at linjene mellom neseikonet på frontvingen og resten av bilen skulle være like, ble det besluttet at gruppe 3 med Mads Daniel Thomassen og Torgeir Omlid Steen skulle lage denne. Denne gruppen skulle designe bilens hoveddel, og benyttet seg av skannet til gruppe 6 i denne prosessen. Etter at vår gruppe mottok denne CAD-modellen ble den modifisert til å passe med de festepunkter som var nødvendig for å feste den til resten av frontvingen. Den ble også forkortet noe for at det skulle kunne produseres støpeformer med det utstyret skolen hadde tilgjengelig.

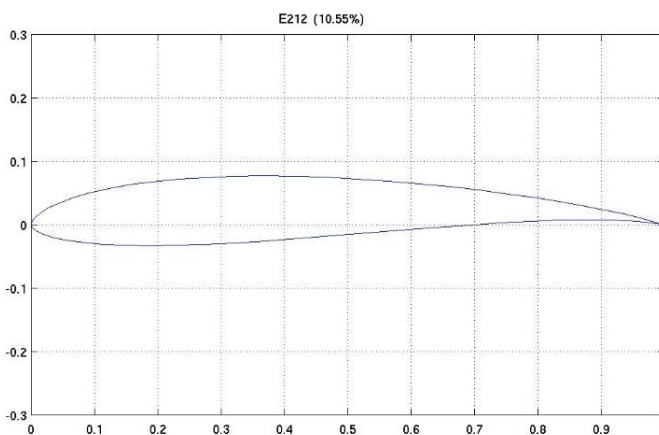
### 3.1.2 Design av datamodell

For å kunne designe en frontvinge som ville tilfredsstille de krav gruppen hadde for prosjektet, ble det til å begynne med tatt mål av replikaen skolen hadde tilgjengelig. Dette ble gjort for å få en ramme for hvilken dimensjon den ferdige frontvingen skulle ha. Det ble deretter gjort undersøkelser rundt design på forskjellige Formel 1-biler for å få ideer til hvordan ulike komponenter burde se ut. Formel 1 er en svært hemmelighetsfull bransje, og det finnes derfor lite tilgjengelig informasjon rundt designprosessen rundt bilene. I tillegg til dette ble det brukt informasjon fra det offisielle regelverket i Formel 1, som spesifiserer hvilke dimensjoner som er tillatt for ulike deler av en Formel 1-bil (FIA, 2020).

Alle modeller som ble designet i dette prosjektet ble laget med programvaren Solidworks. Dette er programvaren som gjennomgående har blitt brukt til designarbeid gjennom studiet, og det var derfor naturlig å bruke dette videre. Her ble alle de forskjellige delene modellert hver for seg som forskjellige «Parts». Disse ble senere satt sammen til en fullverdig frontvinge ved å bygge opp en «Assembly» av alle delene.

#### 3.1.2.1 Valg av vingeprofil

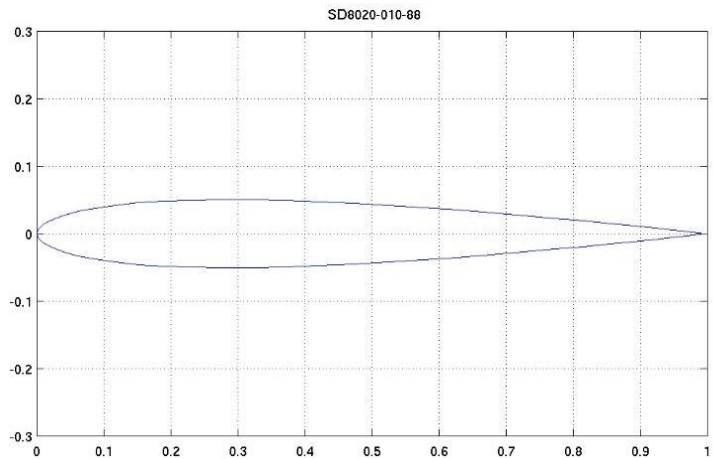
Vingeprofilene ble hentet fra nettstedet til avdelingen for luftfartsteknologi ved University of Illinois at Urbana-Champaign. Denne nettsiden tilbyr et enormt bibliotek bestående av 1600 forskjellige vingeprofiler, katalogisert og tilrettelagt for videre bruk (University of Illinois at Urbana-Champaign Applied Aerodynamics Group, U.år). Hver vingeprofil ligger her med et bilde av profilen, og en tilhørende .dat-fil med profilens koordinater beskrevet i XYZ-form. Denne filen kunne så omgjøres til en .txt-fil og legges inn i Excel for skalering av størrelsen på vingeprofilen. Videre ble disse lagt inn som XYZ-kurver i Solidworks. Denne prosessen gjorde at det kunne designes vinger til frontvingen på en presis og effektiv måte.



Figur 13: Eppler 212 airfoil fra UIUC

Foto: (University of Illinois at Urbana-Champaign, Department of Aerospace Engineering, U.år-a)

Vingeprofilene som ble benyttet til denne oppgaven var «Eppler E212 low Reynolds number airfoil» og «Selig/Donovan SD8020 low Reynolds number airfoil». Den førstnevnte passet godt til dette prosjektets behov, siden den har et høyt forholdstall mellom løft/luftmotstand. Dette var ønskelig for å lage en frontvinge som genererte mye marktrykk, samtidig som luftmotstanden ble holdt så lav som mulig. Den andre vingeprofilen ble brukt til den nøytrale delen av hovedvingen, og ble valgt fordi den hadde et lavt Reynolds-tall og ville forstyrre luftstrømmen minst mulig (University of Illinois at Urbana-Champaign Applied Aerodynamics Group, U.år). Det siste er viktig for senterdelen av vingen, fordi luften skal ledes inn under bilens «gulv», som skaper store deler av bilens marktrykk. Det siste er viktig for senterdelen av vingen, fordi luften skal ledes inn under bilens «gulv», som skaper store deler av bilens marktrykk (F1Technical, 2018).



Figur 14: Selig/Donovan SD8020 airfoil fra UIUC

Foto: (University of Illinois at Urbana-Champaign, Department of Aerospace Engineering, U.år-b)

### 3.1.2.2 Redesign av fester

På grunn av dårlig kommunikasjon mellom de ulike gruppene, ble det brukt forskjellige mål på hvor langt over bakken bilens kjørehøyde skulle være. Dette førte til at frontvingen ville skrape i bakken ved design etter de opprinnelige målene. Etter et felles møte ble det bestemt at den enkleste måten å rette dette opp på var å designe nye og kortere fester fra neseaken til vingen.

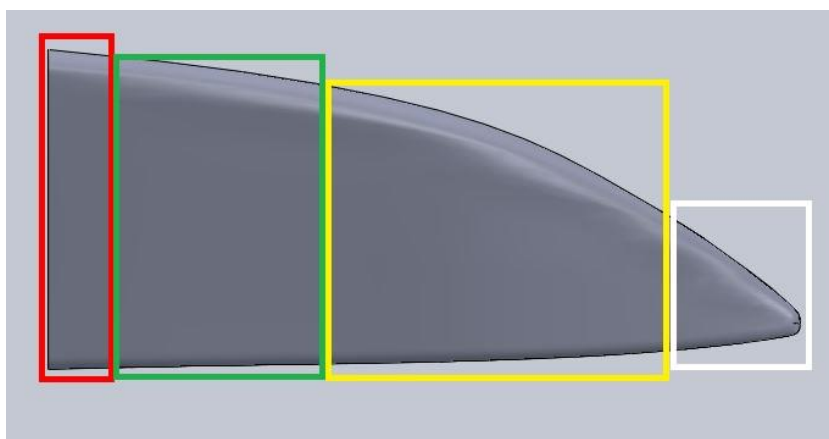
## **3.2 Beregninger**

### **3.2.1 Styrke**

Når det gjelder styrkeberegninger av produktet er det ikke gjort detaljerte beregninger og simuleringer. En vurdering av produktets styrke er gjort i samråd med Sotirios Grammatikos, professor innen polymerer og komposittmaterialer ved Fakultet for ingeniørvitenskap. Det ble i et møte den 24.februar, vist fram design med dimensjoner som var kritiske med tanke på styrke, forklart bruksområde, belastninger på vingen og hvilke materialer som var planlagt brukt. På bakgrunn av at dette ble det gjort vurderinger av hvor mange lag med karbonfiber som burde være nødvendig for å oppnå nødvendig styrke. Det ble tatt utgangspunkt i disse vurderingene og så lagt på en ekstra sikkerhetsmargin for å være på den sikre siden. Med muligheter for individuelle vurderinger rundt forskjellige kritiske punkter, ble det besluttet at det skulle brukes fire lag med 210g twill-karbonfiber som utgangspunkt for alle deler.

### **3.2.2 Krasjsikring**

På grunn av manglende ressurser har det ikke vært mulig å gjennomføre krasjtesting av modellen. Det er derfor tatt utgangspunkt i en krasjsikringsmetode brukt på krasjboksen/nesen til Revolve i Trondheim i 2016. Denne bruker en kjerne mellom lagene, og en gradvis reduksjon av antall lag karbonfiberduk fra innfestning og frem til tupp. Dette ble gjort for å sørge for at karbonfiberen ville knuses ved sammenstøt, og på den måten ta opp de kinetiske kreftene fra kollisjonen. Krasjboksen som ble laget i 2016 hadde en gradering fra seks lag ved innfestningen, til to lag ved tuppen (Browne, 2016). Bilene som deltar i Formula Student har stort sett en topphastighet på rundt 120km/t (Pfeiffer, 2019). Bilene som designes i dette prosjektet skal ha en topphastighet på 180km/t, og det har derfor blitt tatt hensyn til dette i vurderingen av antall lag som skal brukes. I tillegg er nesekonen på denne bilen et bærende element for resten av vingen, og den må derfor forsterkes ytterligere i festeområdene.



Figur 15: Nasekon sett fra siden med inndeling i fargekoder etter antall lag karbonfiberduk

Tabell 1:

Antall lag med karbonfiber etter fargekode

Fargekode	Antall lag med karbonfiberduk
Rød	7
Grønn	6
Gul	5
Hvit	3

I tillegg til å bruke en gradering av antall lag med karbonfiberduk har det blitt besluttet å bruke ekspanderende polyuretanskum som kjerne til nasekonen. Dette skummet vil være med på å fordele kreftene som virker på nasekonen, og hindre at den bøyes innover istedenfor å knuses. Denne knusingen er ønskelig fordi den er med på å ta opp de store kinetiske kreftene som oppstår ved en kollisjon (Browne, 2016).

### 3.2.3 Aerodynamikk

For å få best mulig effekt av frontvingen måtte det gjennomføres aerodynamiske beregninger av modellen før den kunne produseres. På grunn av kostnads- og tidsbegrensningene for prosjektet er alle aerodynamiske beregninger gjort ved hjelp CFD (Computational Fluid Dynamics) simuleringer. Det er valgt å bruke Solidworks Flow Simulation for å gjøre disse simuleringene, både fordi Solidworks er benyttet til modellering av vingen, og god kjennskap til dette programmet fra tidligere i studiet.

I Solidworks Flow Simulation er funksjonene «Flow tranjectories», «Cut plot» og «Goal Plot» benyttet til å undersøke hvordan luftstrømmene beveger seg rundt vingen, trykkforskjeller på over- og undersiden, og å få verdier på hvor mye marktrykk og luftmotstand den skaper.

Før simuleringene kunne gjennomføres ble det gjort noen forberedelser, for å få så pålitelige resultater som mulig. Det ble her gjort vurderinger av «Computational Domain» og elementnett.







### 3.2.3.1 Computational domain

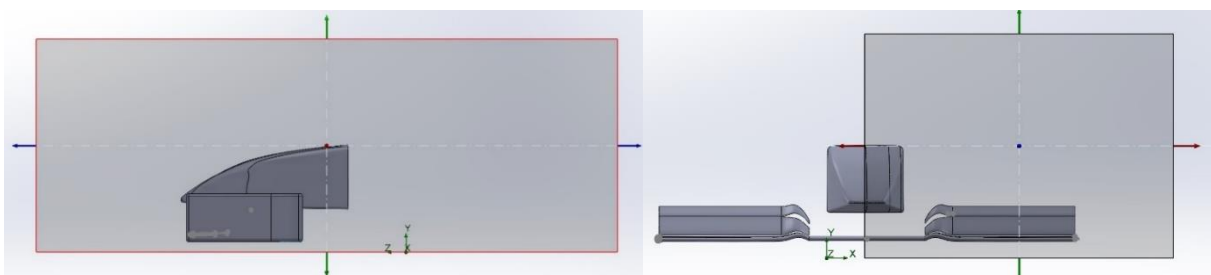
Computational Domain er området rundt frontvingen som skal tas med i simuleringene. Størrelsen på dette området kan sees på som størrelsen av en vindtunnel rundt frontvingen. Området (grå boks) som er valgt for simuleringene og parameterne for dette vises i illustrasjonene i tabell 2 og figur 16.

På grunn av modellens symmetri er området valgt slik at halvparten av fronten er tatt med i simuleringen, slik som figuren av vingen sett forfra viser. Dette er valgt for å redusere tiden det tar å gjennomføre simuleringene. I tillegg er området forlenget bakover fra modellen for å kunne undersøke hvordan luftstrømmene vil fortsette videre bakover bilen. På undersiden er området plassert med avstand tilsvarende bilens bakkeklaring. Bakkeklaringen, på grunn av bakkeeffekten, er avgjørende for hvor mye marktrykk vingen skaper. Høyden over og avstanden ut fra siden av vingen er satt så langt ut at luften som ledes opp og ut til siden ikke skal treffer “veggene” og dermed påvirke resultatene.

Tabell 2:

Parameter for Computational domain

Size and Conditions	
 X	1.5 m
 X	0.165 m
 Y	1 m
 Y	0 m
 Z	1.75 m
 Z	-1 m



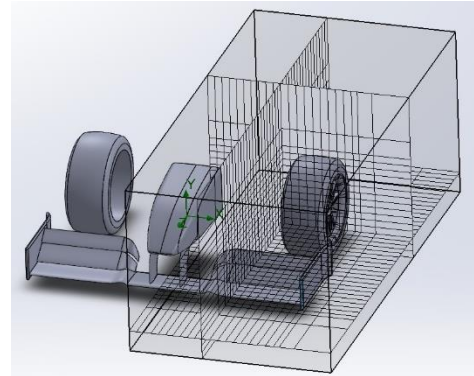
Figur 16: Computational domain

For å kontrollere at størrelsen ikke hadde innvirkning på resultatene, utenom på undersiden der dette er ønskelig, er det gjennomført kontrollsimuleringer. Det er da gjort simuleringer med hel og halv vinge, og med et utvidet område med større avstand til sideplatene, i høyden og bakover.

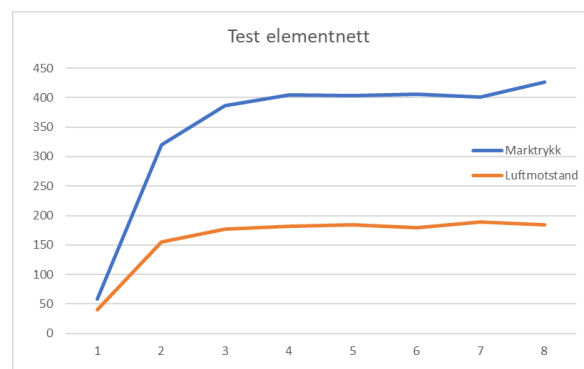
### 3.2.3.2 Elementnett

For å få mest mulig pålitelige resultater fra simuleringene er valg av riktig elementnett en viktig faktor. Det er derfor gjennomført flere simuleringer med ulike elementnett for sikre at elementnettet i liten grad påvirker resultatene.

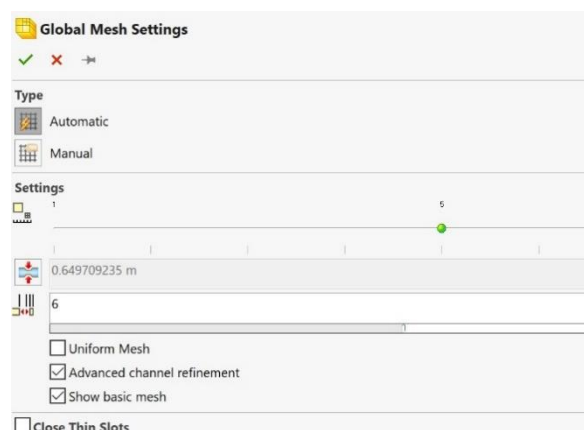
For å teste kvaliteten på ulike automatisk genererte elementnett, ble globale elementnett brukt. I denne funksjonen kan elementnettet justeres ved hjelp av to faktorer, «Level og initial mesh» og «Ratio factor». Simuleringene ble utført med gradvis finere elementnett for å se hvilke utslag dette ga på verdiene for marktrykk og luftmotstand. Her viser figur 19 svært store endringer i resultatene for grovt elementnett, men at resultatene flater ut med finere elementnett, som tyder på at kvaliteten på elementnettet er god nok. Elementnettet fra test 5 ble valgt, med level of initial mesh på 5 og Ratio factor på 6, Figur 19. Figur 18 viser det valgte elementnettet innenfor computational domain for videre simuleringer.



Figur 17: Computational domain med Global Mesh



Figur 18: Test av elementnett



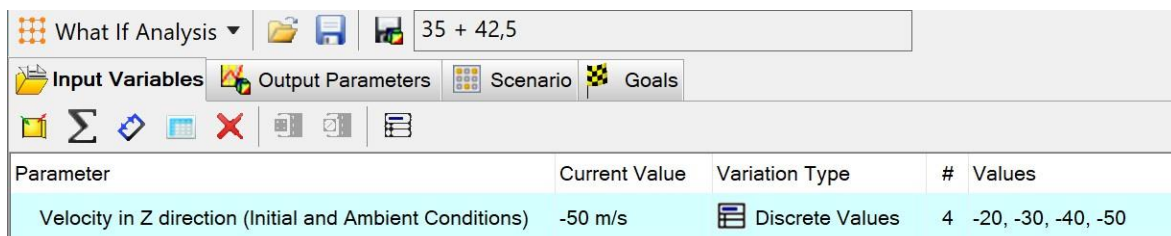
Figur 19: Innstillinger for elementnett

### 3.2.3.3 Parameterstudie av hastigheter og vinkler

Parameterne som er undersøkt i simuleringene er hastighet, angrepsvinkel for vingeprofil 2 og angrepsvinkel vingeprofil 3. For å begrense antall simuleringer vil vingeprofil 1 ha fast angrepsvinkel i alle simuleringer. Utformingen av denne gir den en angrepsvinkel på 12 grader.

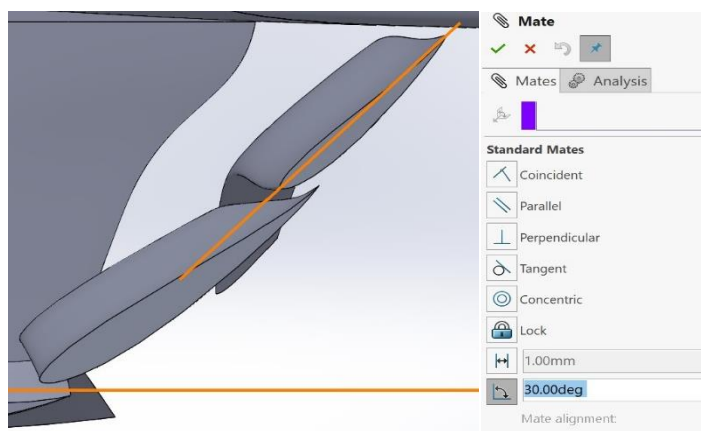
Funksjonen «Wizard» ble brukt for å sette opp betingelsene for simuleringene. Ved hjelp av denne ble enhetssystem (SI), analysetype (External), type fluid (Air) og hastighet valgt. Ingen andre betingelser ble endret fra standard-innstillinger, og disse betingelsene ble brukt videre i alle simuleringene.

For å simulere flere ulike hastigheter på en effektiv måte ble funksjonen «Parametric Studies» brukt. I denne funksjonen ble hastighet valgt som «Input variables» og «Output parameters» ble valgt til «Downforce» (Krefter i Y-retning) og «Drag» (Krefter i Z-retning). Det ble valgt å simulere hastighetene 20, 30, 40 og 50 m/s, som vist i figur 20. Hastighetene i figuren er negative i Z-retning på grunn av modellens orientering i koordinatsystemet, men dette tilsvarer at bilen beveger seg rett framover. Dette oppsettet for «Parametric studies» med 4 hastigheter ble brukt videre i simuleringer med ulike angrepsvinkler.



Parameter	Current Value	Variation Type	#	Values
Velocity in Z direction (Initial and Ambient Conditions)	-50 m/s	Discrete Values	4	-20, -30, -40, -50

Figur 20: Input variables parameterstudie



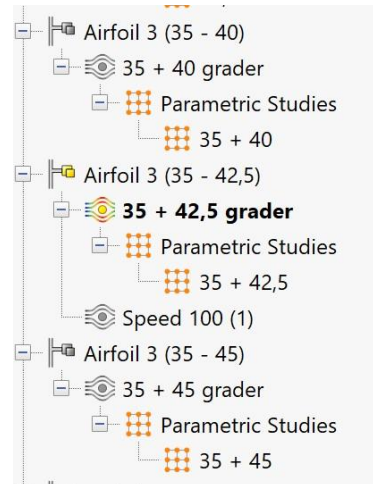
Figur 21: Matefunksjon og plan den er lagt mellom



For å gjennomføre simuleringer med systematiske og nøyaktige endringer av angrepsvinkel ble funksjonene «Mate» og under denne «Angle» brukt. Denne ble satt mellom et plan parallelt med bakkenivå og et plan gjennom vingeprofilen, som vist i figuren ovenfor. Da kan vinklene endres med bestemte verdier, mellom hver simulering.

Det ble så opprettet flere konfigurasjoner i samme «Assembly», der eneste endringer mellom konfigurasjonene er angrepsvinkelen. Figuren til høyre viser en oversikt over noen konfigurasjoner, med ulike kombinasjoner av angrepsvinkler.

I første omgang ble det gjort simuleringer av vingeprofil 2 i ulike vinkler, der vingeprofil 3 er fjernet. En serie med simuleringer startet med en angrepsvinkel på 20 grader, og deretter 2,5 graders økning av vinkelen. Dette ble gjort for å undersøke om resultatene for noen angrepsvinkler skiller seg ut og dermed se hva som kan utelukkes fra videre simuleringer.



Figur 22: Liste over noen konfigurasjoner og simuleringer

I neste steg ble simuleringene utført med begge vingeprofilene, og ulike kombinasjoner av angrepsvinkler ble da testet. Måten dette ble gjort på var at vingeprofil 2 ble satt i en fast vinkel, med start på 20 grader, for så å variere angrepsvinkelen for vingeprofil 3 i forhold til vingeprofil 2. Angrepsvinkelen for vingeprofil 3 ble startet 5 grader brattere enn for vingeprofil 2, altså 25 grader når vingeprofil 2 var 20 grader, for å deretter økes med 2,5 grader for hver simulering. Deretter ble vingeprofil 2 justert opp til 30 grader, for å så teste vingeprofil 3 i forhold til denne med vinkler fra 35 grader og oppover med 2,5 graders økning. Det ble så fortsatt med samme system for aktuelle vinkler fra simuleringene med kun vingeprofil 2. Hver kombinasjon av vinkler ble kjørt i parameterstudiet for ulike hastigheter, for å se om egenskapene endret seg som funksjon av hastighet.

Vedlegg 1 og 2 gir en oversikt over inndata og oppsett for simuleringene.

## 3.3 Produksjon av frontvinge

### 3.3.1 Budsjett

Tabell 3:

Budsjett for produksjon av frontvinge

Budsjett/materialbehov frontvinge F1 2020				
Artikkelnr.	Vare	Antall	Kost	
1	1m Standard karbonfiberduk Pyrofil TR30S 210g/m <sup>2</sup>	8	kr2160+mva	Easycomposites
2	1m Profinish standard karbonfiberduk TR30S 210g/m <sup>2</sup>	4	kr1286+mva	Easycomposites
3	1lm Vakuumfilm	10	kr325+mva	Easycomposites
4	1lm Release film standard	10	kr130+mva	Easycomposites
5	1lm Vakuumbagging tape	15	kr60+mva	Easycomposites
6	1lm Breather cloth	5	kr130+mva	Easycomposites
7	Formvoks 310g	1	kr150+mva	Easycomposites
8	100ml MMA svart lim + dispenser (Kan kjøpes fra Norge hvis mulig)	1	kr340+mva	Easycomposites
	Frakt fra Easycomposites		kr550+mva	
	Fraktgebyr		Ca. kr300	
	<b>Sum Easycomposites</b>		<b>Ca. kr6250 med 25% mva</b>	
9	XPS-300 skumplater	10		kr 800 Byggmax
10	Ekspanderende polyuretanskum	2kg	Kr700	Siddis plast AS
11	Trestjerner vannbasert gulvlakk, halvblank	0,75l		kr 259 Coop Obs
12	Hansker og annet verneutstyr			kr 150 Biltema
13	West Systems Epoksy A205 Standard NTNU 1,2kg	4		kr 2 700 West Systems
15	1/4-turn-skruer til feste av nosecone	3	Ukjent	Ukjent
16	Slipapapir o.l			kr 200 Biltema
	<b>Sum</b>			4809
	<b>Sum totalt</b>		<b>ca. kr11059</b>	

### 3.3.2 Revidert produksjonsplan for frontvinge

På grunn av Covid-19 var skolens lab stengt under store deler av arbeidet med prosjektet, og produksjonen måtte derfor foregå over en begrenset tidsperiode med stor arbeidsmengde.

Aktivitetene som skulle gjennomføres var:

- CNC-fresing av støpeformer i XPS-skum ved skolens lab
- Bearbeiding og klargjøring av støpeformer for å redusere behovet for etterarbeid på delene
- Klargjøring av utstyr og materialer til støp
- Støp av delene i karbonfiber
- Bearbeiding av deler og liming av disse
- Montering av alle deler til en komplett frontvinge

Tabell 4:

Aktivitetsplan for produksjon

Aktivitet	Beregnet tidsbruk	Produksjonsdager	Deltakere	Sted
CNC-fres av støpeformer	3 dager	05.05.20-08.05.20	Øystein og Sindre	Maskinlab NTNU Gjøvik
Bearbeiding av støpeformer	1 dag	09.05.20	Øystein og Sindre	Egen garasje
Klargjøring av utstyr/materialer	0,5 dag	10.05.20	Øystein og Sindre	Egen garasje
Støping av deler	5 dager	10.05.20-14.05.20	Øystein og Sindre	Egen garasje
Bearbeiding/liming av deler	1,5 dag	15.05.20-16.05.20	Øystein og Sindre	Egen garasje
Montering av frontvinge	1 dag	17.05.20	Øystein og Sindre	Egen garasje

### 3.3.3 CNC-fresing av støpeformer på skolens lab

For å kunne produsere frontvingen måtte det lages støpeformer, og denne prosessen ble gjennomført ved å frese ut formene med en CNC-maskin på skolens lab.

#### 3.3.3.1 Søknad om lab-tilgang

På grunn av restriksjoner knyttet til Covid-19 måtte det søkes om å få tilgang til skolens lab. Dette var en prosess som dro ut i tid på grunn av et manglende søknadsskjema fra universitetet. For å prøve å få fortgang i prosessen, og dermed komme inn på laben tidligere, ble det sendt to forskjellige søknader. Den ene var søknad om lab-tilgang før regjeringen åpnet for at avgangsstudenter kunne komme inn på skolens laboratorier. Denne involverte å gjennomføre en risikovurdering av planlagt arbeid. I tillegg måtte det lages en arbeidsplan for bruken av laben med nødvendig tidsbruk (Se vedlegg 3,4 og 5).

Den andre søknaden krevde at det skulle gjennomføres en «Sikker jobb-analyse» (SJA) samt at det måtte spesifiseres hvilke dager det var behov for tilgang. Svaret på begge søknadene kom samtidig, og gruppen fikk tilgang til lab fra tirsdag 05.05.20 til fredag 08.05.20.

<b>Sikker Jobbanalyse (SJA)</b> NTNU Campusservice		
<b>Arbeidsoppgave:</b> CNC-fresing med X-carve-maskin		
<b>Data:</b> 31.04.20-08.04.20	<b>Sted:</b> S-lab, NTNU Gjøvik	
<b>Deltakere:</b> Sindre Folkvord, Øystein Nordbotten		
<b>SJA-ansvarlig:</b> Sindre Folkvord		
<b>Arbeidsbeskrivelse:</b> (Hva og hvordan?) CNC-fresing av støpeformer til Formel-1-frontvinge		
Risiko forbundet med arbeidet:		
<b>Mekaniske farer</b>	<b>Elektriske farer</b>	<input type="checkbox"/> <b>Arbeid i høyden</b>
<input type="checkbox"/> Stabilitet	<input type="checkbox"/> Støt/kryppstrøm	<input type="checkbox"/> <b>Asbest</b>
<input type="checkbox"/> Styrke/spenning	<input type="checkbox"/> Høy spenning	<input type="checkbox"/> <b>Muggsopp</b>
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Kutt-/klemfare</b>	<input type="checkbox"/> Elektrostatisk støt	<input type="checkbox"/> <b>Støy</b>
<input type="checkbox"/> Slag	<input type="checkbox"/> Tap av strømtilførsel	<input type="checkbox"/> <b>Vibrasjon</b>
<input type="checkbox"/> Sklifare	<b>Kjemikalier</b>	<input type="checkbox"/> <b>Oksygenmangel</b>
<input type="checkbox"/> Fallende/svingende last	<input type="checkbox"/> Hudkontakt/inhalering	<input type="checkbox"/> <b>Brannfare</b>
<input type="checkbox"/> Løst gjenstand	<input type="checkbox"/> Brann/eksplosjon	<input type="checkbox"/> <b>Stråling</b>
<input type="checkbox"/> Trange rom	<input type="checkbox"/> Etsing	<input type="checkbox"/> <b>ANNET</b>
	<input type="checkbox"/> Forgifting	
	<input type="checkbox"/> Utslipp/forurensing	
<b>Beskyttelse/sikring:</b> Bruke verneutstyr, holde avstand under drift av maskin		
<b>Konklusjon/kommentar:</b>		Gruppens vurdering er at arbeidet kan utføres sikkert
Uvidet SJA skal brukes når flere arbeidsgrupper samarbeider/eksterne firmaer er involvert		

Figur 23: Sikker jobb-analyse før CNC-fres

### 3.3.3.2 HMS og smitteverntiltak på lab

På grunn av den spesielle situasjonen med Covid-19, var det strenge restriksjoner for hva som var tillatt under arbeidet på laben. Gruppen fulgte NTNUs retningslinjer for «Nødvendig arbeid i laboratorier og verksteder» og «Fysisk oppmøte på campus», nøye. Dette innebar grundig håndvask med jevn mellomrom, at det skulle holdes minst to meters avstand mellom grupped medlemmene til enhver tid, at utstyr skulle sprites ned etter bruk, og en rekke andre tiltak.

I tillegg til de spesielle smitteverntiltakene ble også retningslinjene for bruk av CNC-maskinen fulgt. Av maskinens apparaturkort fremgikk det at det skulle brukes verneutstyr under bruk av maskinen, og at godkjent HMS-kurs skulle være gjennomført.

APPARATURKORT (UNIT CARD)	
APPARATUR (UNIT)	
CNC fres	
APPARATURANSVARLIG (UNIT RESPONSIBLE)	
Svein A Hjelmtveit	
FAREMOMENTER (SAFETY HAZARDS)	
Kuttfare og klemfare	
STOFF (CHEMICALS)	MENGDE (QUANTITY)
Ingen	0
PÅBUDT VERNETILTAK (SAFETY RULES)	
Vernebriller, hørselsvern og vernesko. Ikke bruk klokker, smykker og løsthengende klær som utgjør en sikkerhetsrisiko. Støvsuger påmonteres	
BEGRENSNINGER (RESTRICTION)	
Krav til HMS e-nettkurs og personlig opplæring Krav om bestått HMS e-kurs	
NØDSTOPP (EMERGENCY SHUTDOWN)	
Trykk inn påmontert nødstopppknapp	
ANDRE OPPLYSNINGER (OTHER INFORMATION)	
TILHØRIGHET (BELONGING)	
Institutt for vareproduksjon og byggeteknikk (IVB)	
SIGNATUR (SIGNATURE)	DATO (DATE)
Kenneth Kalvåg	10.10.2017

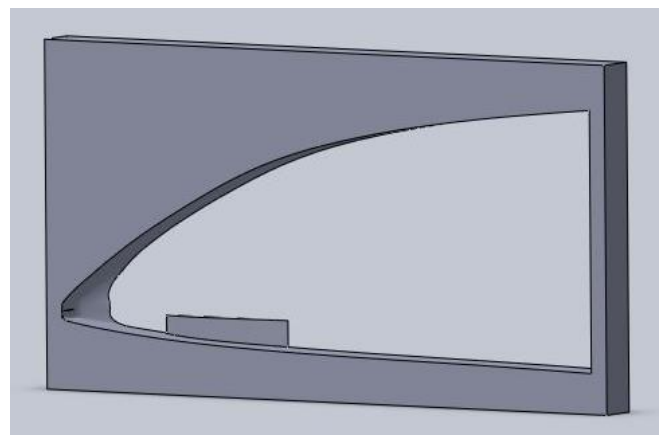


Figur 24: Apparaturkort for X-carve CNC-maskin

### 3.3.3.3 Forberedelser

Før det kunne settes i gang med å CNC-frese ut støpeformene, måtte modellene klargjøres for maskinen. Dette ble gjort ved å dele modellene i to ved hjelp av Solidworks-funksjonene «Parting line», «Parting surface», «Tooling split» og «Split». For eksempel måtte nesekonen deles opp i åtte forskjellige former med 48mm tykkelse.

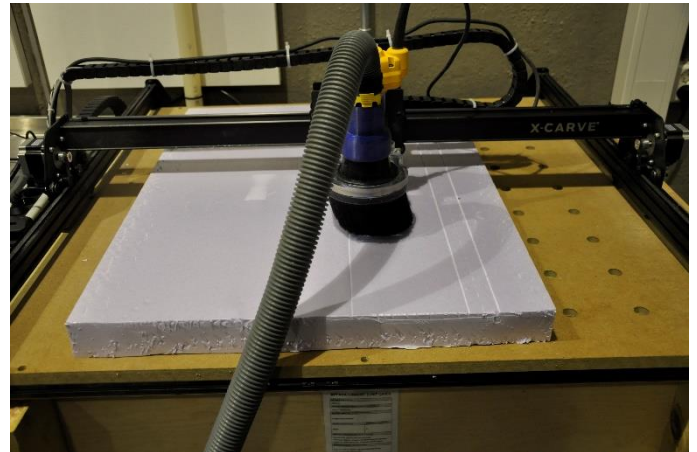
Etter dette ble modellene overført til programmet Fusion 360 som har funksjoner for CAM (Computer Aided Manufacturing), hvor videre arbeid med skjærprogram kunne utføres. Fra før hadde gruppen ingen kunnskap om CNC-fresing og programvaren måtte derfor læres før start.



Figur 25: Én av åtte former til nesekone med 48mm tykkelse

### 3.3.3.4 CNC-maskin

Maskinen som var tilgjengelig på skolens lab var en 3-akset X-carve med båndbredde 1000mmX1000mm, oppsatt med en Dewalt 26200 fresemaskin. Denne maskinen viste seg å fungere overraskende bra til det arbeidet som skulle gjennomføres og presisjonen til maskinen var veldig bra. Arbeidsområdet på 750mmX750mm viste seg å være i minste laget for noen av formene, og det måtte derfor gjøres noen tilpasninger av modellene.

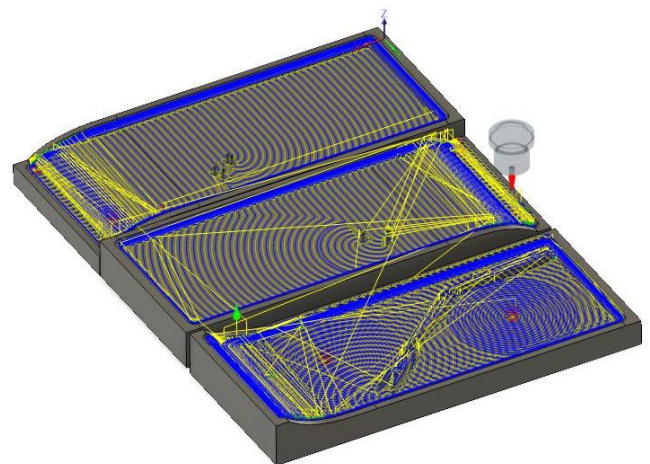


Figur 26: X-carve CNC-maskin

### 3.3.3.5 Oppsett av skjærbaneprogrammer

På grunn av Covid-19 var skolens lab stengt i en lang periode midtveis i arbeidsperioden.

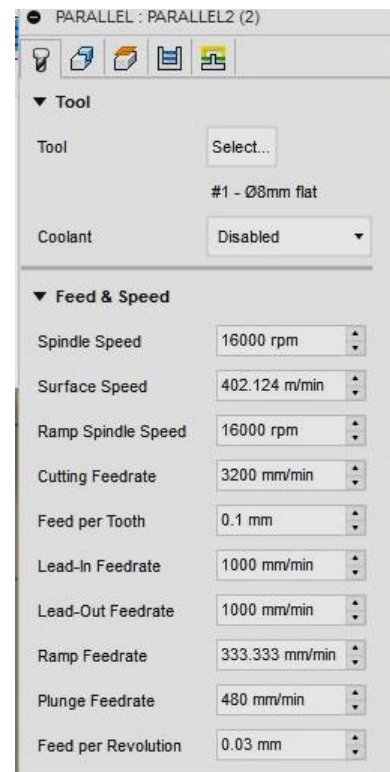
Produksjonen krevde at en rekke ulike støpeformer måtte freses, noe som gjorde at tiden ble knapp til leveringsfristen. Det var derfor viktig å få optimalisert skjærbaneprogrammene mest mulig slik at alle formene kunne freses ut innenfor et relativt kort tidsrom. Siden dette var første gangen noen på gruppen brukte en CNC-maskin, måtte det kjøres noen testprogrammer med forskjellige innstillinger. Fusion 360 tilbyr en rekke forskjellige typer skjærprogram, som alle bruker en viss type mønster i fresingen. Testene viste at det fungerte veldig bra å bruke programmene «Adaptiv 3D-clearing», «Pocket clearing» og «Parallel clearing». De to første er hovedsakelig programmer som er egnet til å fjerne store masser i en grovfresing, og den siste egner seg godt til detaljfres.



Figur 27: 3D-visning av generert adaptivt skjærprogram i Fusion 360

### 3.3.3.6 Innstilling av parametere

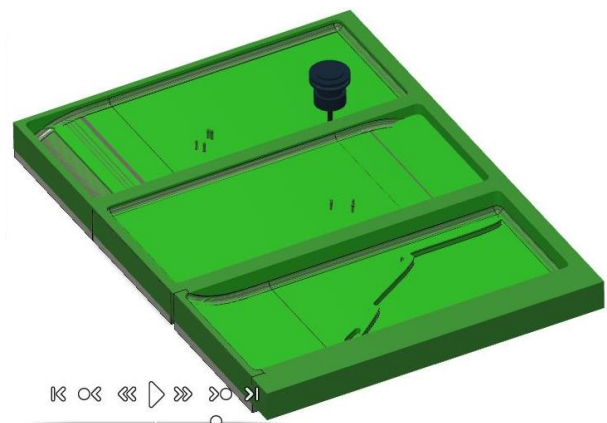
Fresen på maskinen som ble brukt hadde en anbefalt hastighet på 16000 omdreininger i minuttet, noe som er gunstig for den type fres som skulle gjennomføres. Skolen hadde kun fire forskjellige skjæreverktøy tilgjengelig, hvorav to var Ø8 (Upcut og Downcut) og to var Ø6 (Upcut og Downcut). Dette er relativt grove freseverktøy og kombinert med at materialet som skulle freses var mykt, kunne det kjøres med relativt høy «Mating per tann» (MPT) under fresing. Hovedsakelig ble det brukt 0,1mm MPT og en «Mating per omdreining» (MPO) på 0,03mm. Maskinen hadde mulighet for å stille dette noe opp og ned underveis i fresingen, og i noen tilfeller ble dette gjort for å redusere tiden et program brukte. Testene som ble kjørt viste at verktøyet med Ø8 fungerte godt, og dette ble derfor brukt for alle fresene. Det er viktig at skjæreverktøyets dimensjoner legges inn nøyaktig i programmet, og dette ble derfor nøye oppmålt før start. Fusion 360 krever et stort antall parametere for de forskjellige skjærbaneprogrammene stilles inn. En liste over brukte parametere ligger i vedlegg 6.



Figur 28: Parametere for skjærprogrammet «Parallell»

### 3.3.3.7 Simulering av skjærbaneprogram

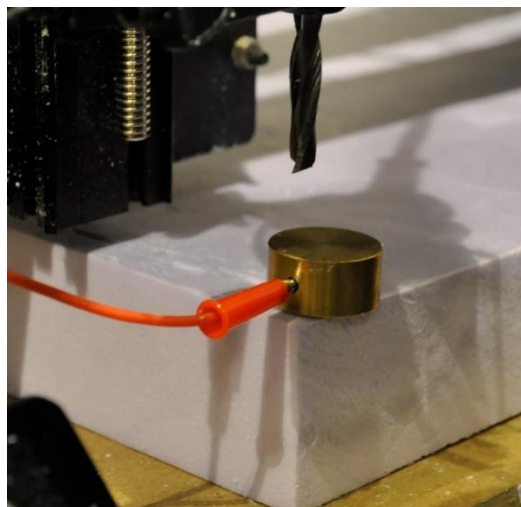
For å sikre at maskinen ikke skulle kollideres med formmaterialet på grunn av for dårlig klaring, ble det gjennomført en simulering for hvert program. Fusion 360 har en egen funksjon for dette, som viser hvordan materialet blir frest bort fra arbeidsstykket.



Figur 29: Simulering av skjærbaneprogram i Fusion 360

### 3.3.3.8 Post-prosessering

Etter at hvert skjærbaneprogram var generert, ble det laget en såkalt «G-code». Denne koden er en post-prosessering av skjærbaneprogrammet og angir banene CNC-maskiner skal følge under fresing, i et språk maskinene forstår. For å optimalisere fresingen ble det brukt en annen post-prosesseringskode enn den som følger med maskinen. Denne het «f360-easel.cps» og ble funnet gjennom et forum tilknyttet produsenten av CNC-maskinen.



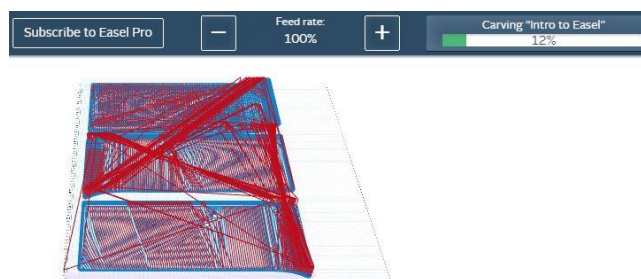
Figur 30: Justering av Z-akse ved hjelp av en «Z-probe»

### 3.3.3.9 Gjennomføring av CNC-fresing

Fresingen av støpeformene ble gjort over fire lange dager på skolens lab. Dette ble gjort intensivt på grunn av at laben skulle være stengt fra fredag kveld til tirsdag morgen av smittevern hensyn.

Før hver fresing måtte det måles og deles opp XPS-plater som passet til hver enkelt form. Dette ble gjort med enkle verktøy som målebånd, håndsag og tapetkniv. For å utnytte materialet best mulig ble det forsøkt å legge opp til at flere deler ble frest ut på samme skumplate. Dobbeltssidig teip ble brukt til å feste platene fast til underlaget under fresing.

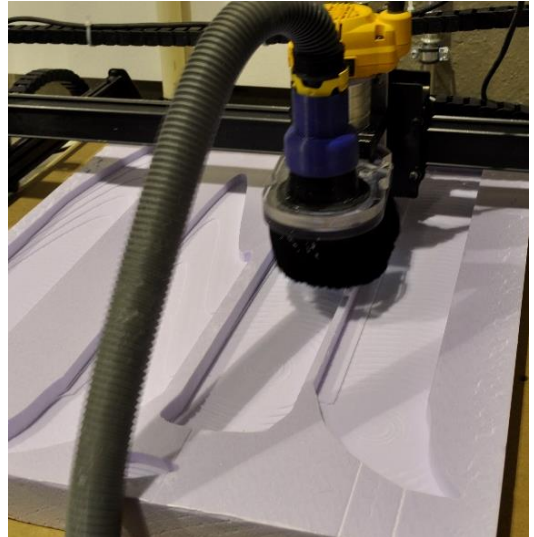
Nedre venstre hjørne av maskinens arbeidsområde ble brukt som startpunkt for å være sikker på at posisjonen ble riktig hver gang. Maskinen hadde en såkalt «Z-probe» som automatisk justerte skjæreverktøyets posisjon i Z-retningen (Opp/ned) og dette gjorde at maskinens presisjon ble optimalisert.



Figur 31: Easel programvare underveis i fresing



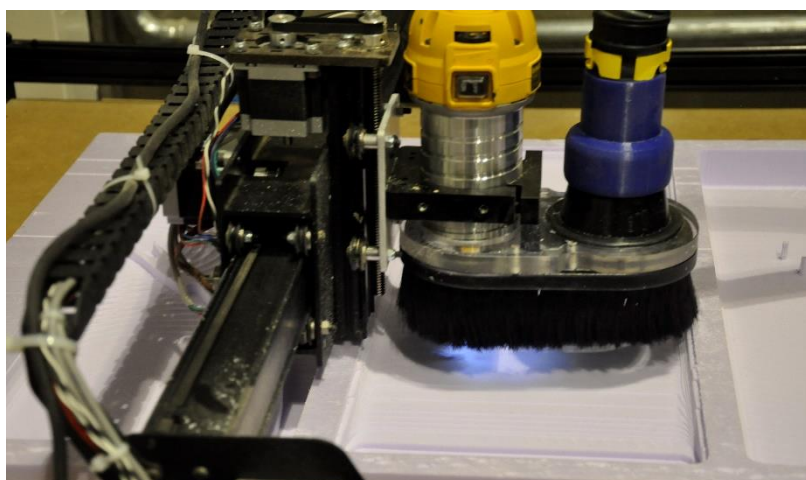
X-carve-maskinen ble styrt gjennom en internetbasert programvare kalt Easel, og her kunne maskinen enkelt manøvreres med piltastene. G-kode for hvert enkelt skjærbaneprogram ble lastet opp i Easel, slik at det kunne kontrolleres at det planlagte skjærbaneprogrammet var innenfor maskinens arbeidsområde. Easel bruker nedre venstre hjørne som «Null-punkt» og det var derfor gunstig å bruke dette for å unngå at programmet kom inn med feil orientering.



*Figur 32: Fresing av vingeprofil*

For hver støpeform som ble frest ut, ble det laget to forskjellige skjærbaneprogram. Først ble det gjort en grovfresing av materialet for å fjerne mest mulig på kort tid. Dette ble enten gjort med programmet «Adaptiv 3D-clearing» eller «Pocket clearing». Vurderingen av hvilket program som skulle brukes ble gjort ved å se på anslått maskineringstid i Fusion 360. På grunn av ulik geometri på de forskjellige støpeformene, varierte det hvilken type som passet best. Etter grovfresingen ble det kjørt et detaljeringsprogram kalt «Parallel» på alle formene. Dette ble gjort mens formene fortsatt lå plassert likt som ved grovfresingen for å unngå unøyaktigheter. Detaljerte parametere som ble brukt vises i vedlegg 6.

Totalt ble det frest ut 30 halvformer under arbeidet på laben. Til disse formene ble det generert 60 forskjellige skjærbaneprogrammer, og det var derfor et omfattende arbeid.



*Figur 33: Fresing av sideplater*

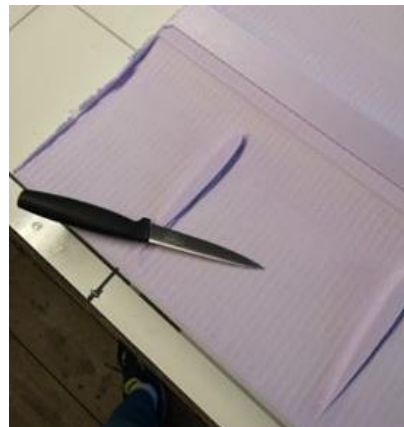
### 3.3.4 Bearbeiding av former

Etter at formene var frest ut var det nødvendig med ytterligere bearbeiding før støpingen kunne starte. Det første som ble gjort var å pusse bort ujevnheter fra freseprosessen, for at formene skulle få en jevn overflate. Dette ble gjort med P1200 våtslipepapir. Større unøyaktigheter, spesielt rundt festepunkter, ble skjært bort ved hjelp av en liten skarp kniv.

For å beskytte formmaterialet under støpingen, og å få en enda glattere overflate er formene lakkert. For å redusere kostnader ble «Trestjerner vannbasert gulvlakk» brukt som et billig alternativ. Vannbasert lakk kunne brukes, fordi denne ikke inneholder løsemidler som ville skadet formaterialet. Alle formene ble dekket med 3 strøk med lakk, med 4-8 timers tørketid mellom påføring av hvert strøk. Sikkerhetstiltak for lakkeringen kan leses i vedlegg 7.

Da lakken var størknet ble formene igjen pusset med P1200 våtslipepapir for å få en glatt overflate. Dette var viktig både for at frontvingen skulle få en fin og glatt overflate uten å måtte pusses etter støping, og at delene enklere skulle løsne fra formene.

For at støpene ikke skulle henge igjen i formene ble alle former smurt med slippmiddelet «Easy Composites Mould Release». Dette produktet inneholder helseskadelige kjemikalier, så for å sikre trygge arbeidsforhold ble sikkerhetsdatablad (Vedlegg 8) gjennomgått på forhånd. Det ble på bakgrunn av dette besluttet at påføringen av slippmiddel skulle gjøres utendørs med Støv- og gassmaske og nitrilhansker. Slippmiddelet ble påsmurt ved hjelp av en lofri klut med sirkelbevegelser. Deretter fikk det tørke i omtrent 15 minutter før det helt forsiktig ble glattet ut med en ny lofri klut før nytt lag ble påført, dette ble gjentatt 3 ganger for hver form.



Figur 34: Fjerning av ujevnheter med kniv

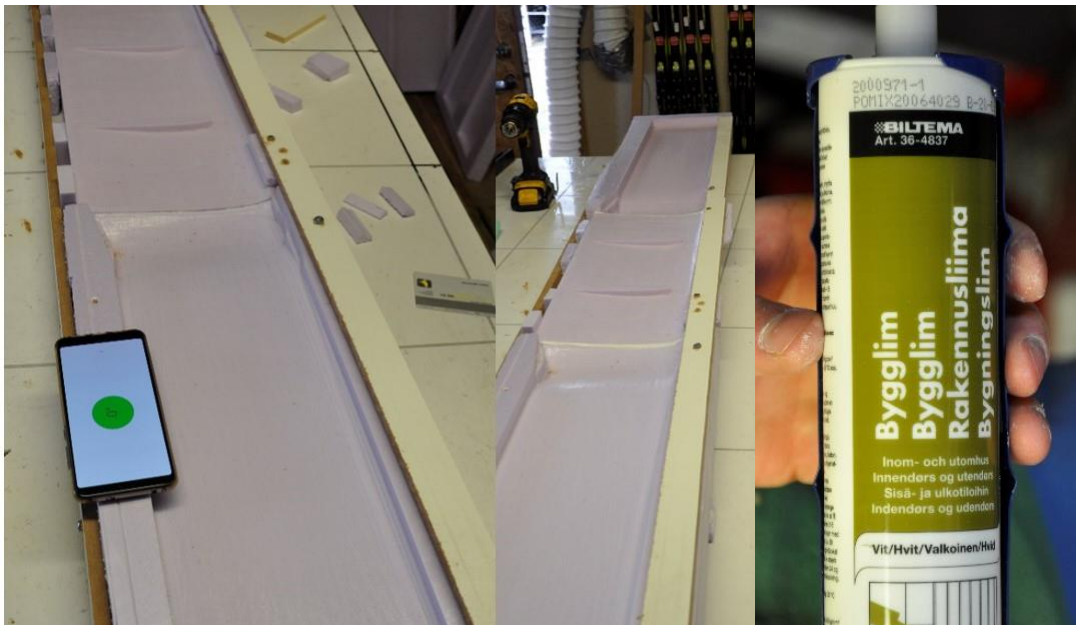


Figur 35: Lakkering av former



Figur 36: Smøring med slippmiddel

På grunn av at noen former var større enn fresemaskinens arbeidsområde ble disse frest ut i flere deler som senere måtte skjøtes sammen til en form. Dette gjaldt hovedvingen og nesekonen. Formdelene ble justert i riktig posisjon i forhold til hverandre og avstivet ved hjelp av lange trelister som ble skrudd fast i XPS-platene, som vist i bilde til under. Bygglim av typen på bilde under ble brukt for å lime platene i skjøtene, for å tette fugene og å få jevne overganger mellom formdelene.



Figur 37: Sammenføring av former og limtype som ble brukt

### 3.3.5 Støpeprosess

#### 3.3.5.1 HMS under støpeprosessen

Støping av karbonfiberprodukter krever at det arbeides med helseskadelige kjemikalier. Dette må tas hensyn til for å redusere risiko for skader. Før prosessen kunne settes i gang måtte det derfor gjøres en «Sikker jobb-analyse» av arbeidet (Vedlegg 9). Denne analysen innebar å gå gjennom alle sikkerhetsdatablad tilhørende de forskjellige kjemikaliene som skulle brukes (Se vedlegg 10 og 11). Ut fra dette ble det besluttet at det skulle brukes verneutstyr hele tiden under arbeidet i støperommet. Verneutstyr som ble benyttet var: Støv- og gassmaske, vernebriller, to lag med nitrilhansker og vanntett engangsoverall til å ha utenpå klær. I tillegg ble det montert opp en avtrekksvifte for å bedre luftkvaliteten i produksjonsrommet. På grunn av at uherdet epoksy er skadelig for miljøet, ble det lagt vekt på hindre søl av herder og resin under oppmåling. Dette gjorde at det ikke ble behov for å levere søppel som spesialavfall. De samme vernetiltakene som ble brukt under støping ble også brukt under pussing av delene etter støp, da karbonfiberstøv kan være helseskadelig og skape irritasjon på hud.

#### 3.3.5.2 Støping av karbon

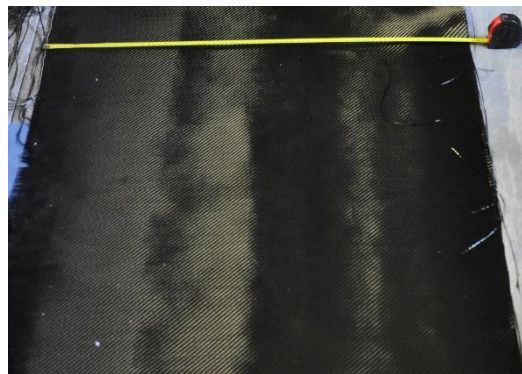
Som produksjonsmetode ble det valgt våt-håndopplegg med vakuum som sammenpressingsmetode. Dette er den enkleste formen for opplegg av komposittmateriale og er hovedsakelig valgt på grunn av forutsigbarhet og kostnad. Ved håndopplegg er det kun behov for standard utstyr som malerkoster/roller, vekt og enkelt vakuumutstyr, noe som er med på å redusere kostnadene ved bruken. Gruppedeltakerne har også erfaring fra bruk av håndopplegg fra tidligere prosjekter og dette har veid tungt i beslutningen.

Sikker Jobbanalyse (SJA)		
NTNU Campusservice		
Arbeidsoppgave: Støping av karbonfiber		
Dato: 09.05.20-12.05.20	Sted: Privat garasje	
Deltakere: Sindre Folkvord, Øystein Nordbotten		
SJA-ansvarlig: Sindre Folkvord		
Arbeidsbeskrivelse: (Hva og hvordan?) Støpe karbonfiberdelene ved hjelp av epoksy og karbonfiberduk.		
Risiko forbundet med arbeidet:		
<b>Mekaniske farer</b> <input type="checkbox"/> Stabilitet <input type="checkbox"/> Styrke/spenning <input type="checkbox"/> Kutt-/klemfare <input type="checkbox"/> Slag <input type="checkbox"/> Sklifare <input type="checkbox"/> Fallende/svingende last <input type="checkbox"/> Løs gjenstand <input type="checkbox"/> Trange rom	<b>Elektriske farer</b> <input type="checkbox"/> Støt/krypstrøm <input type="checkbox"/> Høy spenning <input type="checkbox"/> Elektrostatisk støt <input type="checkbox"/> Tap av strømføler <b>Kjemikalier</b> <input checked="" type="checkbox"/> Hudkontakt/inhalering <input type="checkbox"/> Brann/eksplosjon <input type="checkbox"/> Etsing <input type="checkbox"/> Forgiftning <input type="checkbox"/> Utslipp/forurensing	<input type="checkbox"/> Arbeid i høyden <input type="checkbox"/> Asbest <input type="checkbox"/> Muggsopp <input type="checkbox"/> Støy <input type="checkbox"/> Vibrasjon <input type="checkbox"/> Oksygenmangel <input type="checkbox"/> Brannfare <input type="checkbox"/> Stråling <input type="checkbox"/> ANNET
Beskyttelse/sikring: Bruke tilstrekkelig verneutstyr som følger av kjemikalienes sikkerhetsdatablad. Dette for å sikre at det unngås direkte kontakt med farlige kjemikalier og støv. Støv-gassmaske, vernebriller, vernehansker, ventilasjonssystem		
Konklusjon/kommentar: Gruppens vurdering er at arbeidet kan utføres sikkert så lenge beskyttelsestiltakene følges til enhver tid.		
Utvædet SJA skal brukes når flere arbeidsgrupper samarbeider/eksterne firmaer er involvert		

Figur 38: Sikker jobb-analyse for støpeprosessen

### 3.3.5.3 Klipping og veing av karbonfiberduk

Før klippingen av karbonfiberduken ble det tatt mål av de aktuelle formene, for å minimere overskuddsmateriale. Deretter ble det klippet opp karbonfiberduk med en vanlig kjøkkensaks, og duken ble tilpasset kantene på formene. Etter rådføring hos professor Sotirios Grammatikos, skolens ekspert på komposittmaterialer, ble det besluttet at det skulle brukes fire lag med karbonfiberduk som utgangspunkt. Etter klipping ble dukene tilhørende de forskjellige formene veid separat for å kunne regne ut nødvendig epoksymengde.



Figur 39: Oppmåling av karbonfiberduk før klipping

### 3.3.5.4 Klargjøring av vakuumsystem

Skolen hadde mindre vakuumposemateriale enn forventet, og det måtte derfor forsøkes å utnytte materialet maksimalt. Alt tilgjengelig materiale måtte benyttes for å lage vakuumposen. Materialet ble skjøtet sammen ved å bruke butylteip, for å lage en tett pose.

Det ble så klippet hull til vakuumentilen som skulle benyttes, og denne ble koblet til vakuumpumpen for sjekk av koblingen. Gruppen hadde kun tilgang til en «hjemmelaget» vakuumpumpe, som var en kompressor med påmontert ledning for utsuging av luft, og det ble sjekket at denne fungerte.

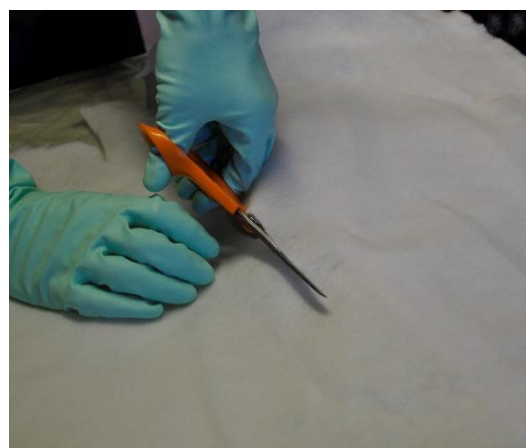
«Pusteduken» og perforert slippfolie ble også klippet opp for å passe til formene som skulle støpes.

Slippfolien er laget for å kunne plasseres rett oppå epoksyen uten at denne sitter fast etter herding.

Pustematerialet ble deretter lagt oppå denne for å jevne ut vakuumtrykket og trekke til seg overflødig epoksy under vakuumering.



Figur 40: Klargjøring av vakuumpose



Figur 41: Klipping av pustemateriale

### 3.3.5.5 Oppmåling og blanding av epoksy

For de fire første formene som skulle produseres som en test, ble karbonfiberdukene veid til å være 35, 35, 37 og 37 gram. Det ble besluttet å følge blandingsforholdet som ble anbefalt av komposittleverandøren Easy Composites. Dette innebar å bruke et 50/50 blandingsforhold mellom epoksy og karbonfiberduk etter vekt. Epoksyen som ble brukt var West System B-pakke med langsom herder, og fra produsenten ble det opplyst om at blandingsforholdet mellom resin og herder skulle være 5:1.

Tabell 5:

Oversikt over blanding av karbonfiberduk og epoksy for teststøp

Formdel	Fibervekt (gram)	Nødvendig utblandet epoksy (gram)	Nødvendig resin (gram)	Nødvendig herder (gram)
Feste fra neseikon 1	35	35	29,2	5,8
Feste fra neseikon 2	35	35	29,2	5,8
Feste fra neseikon 3	37	37	30,8	6,2
Feste fra neseikon 4	37	37	30,8	6,2

Siden den nødvendige mengden av resin og herder kom ut med flere desimaler enn det vekten som ble brukt kunne måle, ble nødvendig mengde rundet opp/ned til nærmeste hele gram. Etter oppveing ble blandingen mikset godt sammen for å sikre at epoksyen skulle herde som ønsket. På grunn av at herderen gruppen fikk tilgang på var av «langsom» type, var arbeidstiden lang nok til at epoksy til alle fire testformer kunne blandes samtidig.

### 3.3.5.6 Håndoplegg av karbonfiber og epoksy i teststøp

Selve støpeprosessen ble gjennomført innenfor et tidsrom på 20 minutter. Ett lag epoksy ble smurt i de klargjorte støpeformene før første lag med karbonfiberduk ble lagt. Dette ble gjort for å sikre at overflaten på det ferdige produktet skulle ha ønsket utseende og egenskaper. Epoksyen ble her lagt på med en malerulle, og denne viste seg å trekke til seg mer epoksy enn forventet. De forskjellige lagene ble deretter lagt i formene én om gangen og epoksy ble penslet på duken med en malerkost mellom hvert lag.

Alle lagene ble lagt på med samme retning på fibre (0/90 grader). Det ble særlig fokusert på å få epoksy inn i vanskelig tilgjengelige områder, for å unngå svake punkter i det ferdige produktet. På grunn av at malerullen trakk til seg mer epoksy enn forventet ble det nødvendig å blande opp ytterligere 30g med utblandet epoksy, for å få til god dekning av materialet. Fire former ble støpt i denne prosessen, og siden gruppen bestod av to medlemmer ble det derfor støpt to hver.



Figur 42: Fullt verneutstyr på under



Figur 43: Pensling av epoksy på karbonfiberduken i støpeformen

### 3.3.5.7 Vakuumering av støpeformene

Etter at karbonfiberdukene var ferdig mettet med epoksy ble slippfilm og pustemateriale lagt over formene. De ble deretter lagt inn i en vakuumpose der ventil og pumpe allerede var tilkoblet. Åpningen ble tettet igjen med mer butylteip og vakuumpumpen ble skrudd på. Det viste seg etter at pumpen var slått på at vakuumposen ikke var skikkelig tett, noe som gjorde det vanskelig å oppnå skikkelig vakuu rundt formene. For å forsøke å fikse dette ble kantene på vakuumposen brettet sammen og teipet igjen, og posen ble trykt ekstra godt ned på butylmassen. Da ingenting av dette ga ønsket resultat ble det besluttet å bruke en støvsuger for å oppnå et midlertidig vakuu rundt formene. Dette vakuuet ble kun holdt i ca. ett minutt for å unngå å ødelegge motoren på støvsugeren.



*Figur 44: Former satt under delvis vakuu*

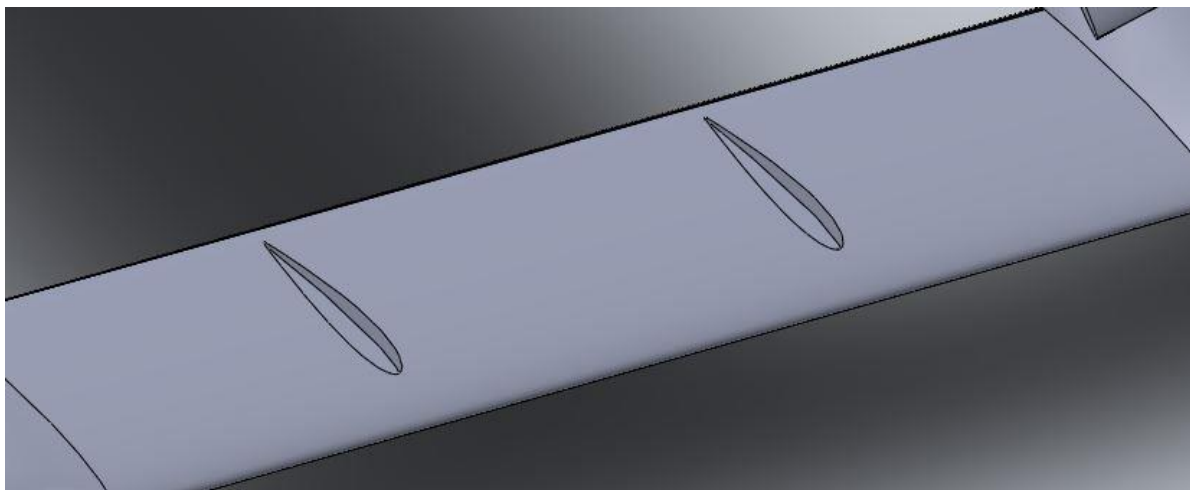
På grunn av at epoksyen som ble brukt var av «langsom» type, og produksjonslokalet som ble brukt var i grenseland kaldt i forhold til den påkrevde temperaturen på 16 grader celsius, ble støpene lagt til herding i 16 timer. Dette ble gjort for å sikre at epoksyen hadde herdet tilstrekkelig til at delene kunne tas ut av formene.



### 3.3.6 System for montering av ferdig støpte karbonfiberdel

Siden alle delene av frontvingen og nesekonen har blitt designet for å produseres i to halvdeler, må disse limes sammen før montering av vingen. Her er presisjon et særdeles viktig element, for å unngå skjevheter som vil påvirke vingens egenskaper ved bruk.

Hver enkelt del har enten blitt designet med en forlenget del, eller med et utsnitt i overflaten. Dette har blitt gjort for at den forlengede delen skal kunne føres inn i utsnittet i overflaten og limes sammen, noe som vil føre til økt stabilitet og styrke for det ferdig monterte produktet. I tillegg har det blitt gjort en vurdering rundt festepunktene som knytter nesekonen sammen med festene, og festene sammen hovedvingen. Disse punktene har blitt planlagt montert med en bolt innstøpt oppe og nede på festene, for å gi festene større styrke enn med kun lim.



*Figur 45: Utsnitt i hovedvingen til montering*

# 4 Resultat

## 4.1 Design

Resultatet fra designprosessen ble en nesecone omtrent lik den på formel 1 replikaen og en frontvinge med tre forskjellige vingeprofiler, to sideplater, én nesekon og to fester fra nesekon til vingen.



*Figur 46: Datagenerert bilde av frontvingen fra Fusion 360*

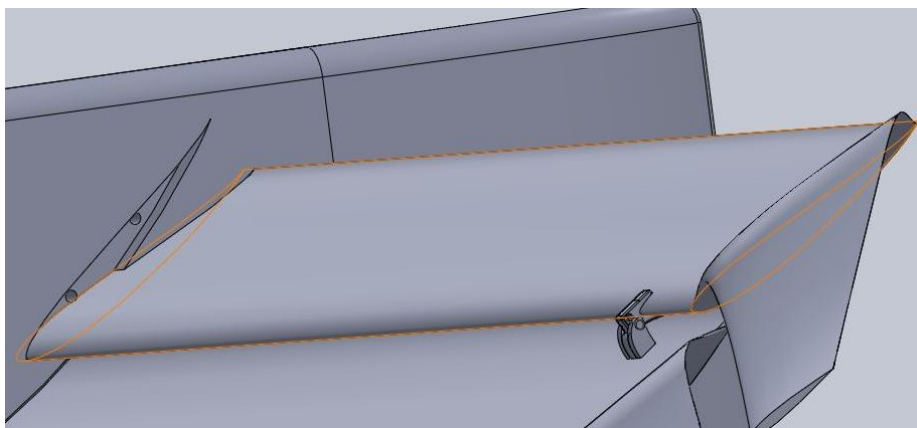
Nesekonens design er basert på eksisterende design fra replikaen. Utformingen er hentet ut fra skann av replikaen, slik at formen er lik som den. Den er forkortet for å tilpasse den tilgjengelig produksjonsutstyr.

Denne frontvingens design har store endringer fra den vingen som nå er på replikaen. Dette gir den en utforming som mer lik dagens moderne formel 1-biler. Designet er basert på dagens FIA (Federation Internationale de l'Automobile) regelverk, bilder av moderne formel 1-biler og aerodynamiske prinsipper. Vingens totale bredde, utformingen av midtre delen av hovedvingen og størrelsen på sideplatene har tatt utgangspunkt FIAs regelverk.

Vingeprofilenes utforming og posisjonering er bestemt ut ifra aerodynamiske prinsipper, simuleringresultater, og bilder av moderne formel 1-biler. Antall vingeprofilen er noe redusert og utformingen av disse noe forenklet, i forhold til de sett på bilder. Dette ble gjort for å forenkle produksjonsprosessen noe.

### 4.1.1 Adaptivt festesystem for øverste vinge

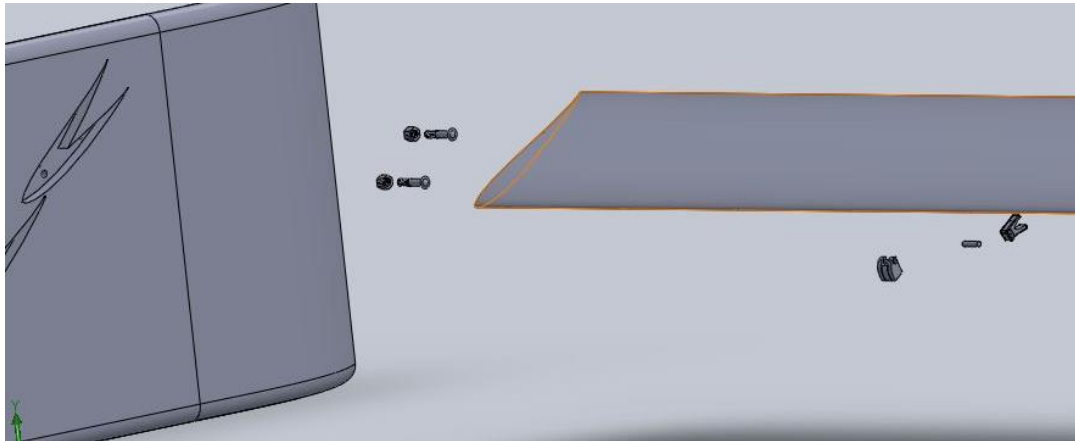
Det ble designet et system som muliggjorde at vinkelen på den øverste vingeprofilen kunne endres etter hvilken bane bilen skulle brukes på. Dette systemet består av to utsnitt av vingeprofilen i sideplatene, og en 3D-printet støtte med mulighet for å endre vinkel. Denne støtten festes i vingeprofilene nedenfor og bidrar til å stabilisere den øverste vingeprofilen. Et tilsvarende feste uten mulighet for vinkelendring ble også designet for å feste den midterste vingen til den nederste.



Figur 47: Adaptivt festesystem for øverste vinge

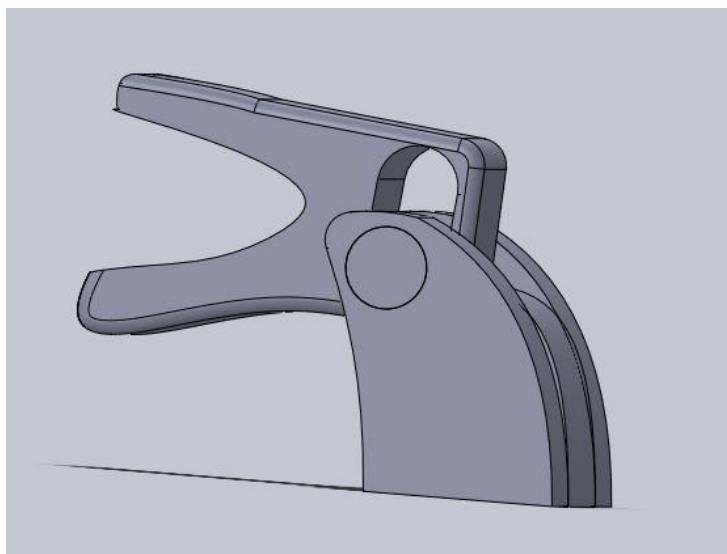
Ved å lime inn to bolter i den øverste vingen, og lage hull til disse i begge utsnittene på sideplatene, kan vinkelen endres. Boltene festes med små muttere på utsiden av sideplatene, og de er derfor mulige å løsne. Det samme gjelder for det 3D-printede festet, og siden begge festene kan løsnes, åpnes det også for at den øverste vingen kan tas av fullstendig. Dette gjør at frontvingen kan brukes i tre forskjellige konfigurasjoner, med øverste vinge i enten 30 eller 42,5 graders vinkel, samt at den kan tas helt av. Som utgangspunkt er vingen designet for bruk med 42,5 graders angrepsvinkel, men på baner med lite svinger med lavere krav til marktrykk og høyere hastigheter, vil en lavere angrepsvinkel redusere bilens luftmotstand.

Som resten av vingene er den øverste vingen ekstrudert i retning sideplaten, slik at den passer inn i utsnittet av vingeprofilen, og dette sørger for ekstra stabilitet.



Figur 48: Eksplodert visning av adaptivt festesystem

Figuren nedenfor viser en tenkt utforming av det 3D-printede festet, med mulighet for å endre vinkel. Disse er utformet med et ledd som kan justeres og låses i posisjonen slik at vingen får nødvendig støtte inn mot midten. Den har også mulighet for å justeres i høyderetningen uten å endre vinkel, for at avstanden mellom vingeprofilene skal holdes lik nå angrepsvinkelen endres.



Figur 49: 3D-printet feste

## 4.2 Simuleringer

### 4.2.1 Marktrykk og luftmotstand

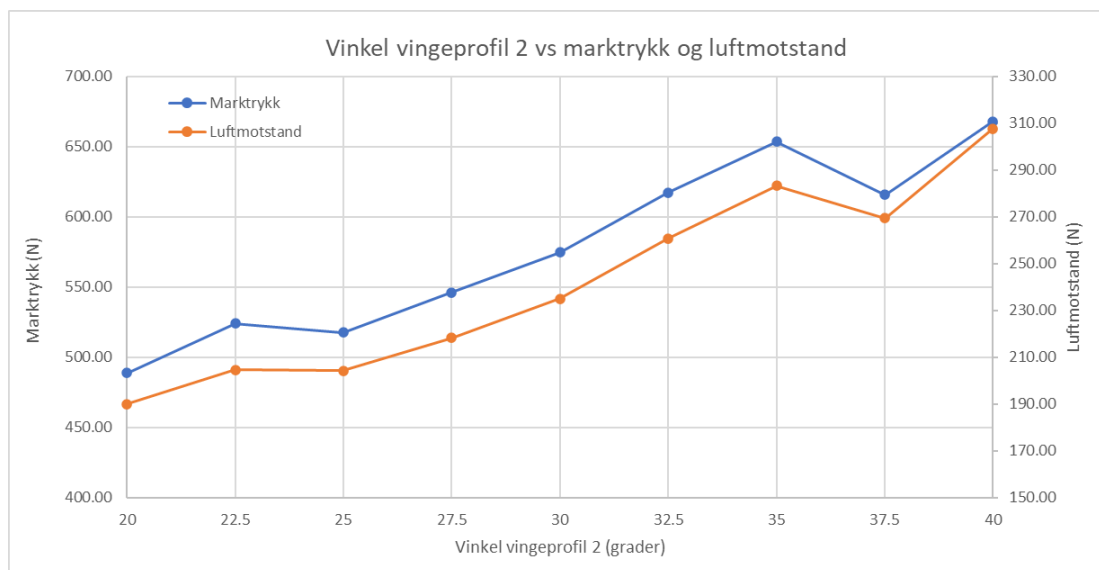
Resultatene fra simuleringene i Solidworks Flow Simulation er rapportert i tabeller i Excel, lik den i tabell 6. Denne viser verdier for marktrykk (Downforce), luftmotstand (Drag) og forholdet mellom disse i fire ulike hastigheten. Fra hver kombinasjon av vinkler som er simulert kom resultatene ut i tilsvarende tabeller. En fullstendig og systematisert oversikt over disse kan finnes i vedlagt Excel-dokument (vedlegg 2). Videre i rapporten vil resultatene vises i grafer med verdier fra tabellene når hastigheten er 50 m/s (Design Point 4). Tabellen viser verdier for halve fronten, mens resultatene vist i grafene senere er doblede verdier, slik at de gjelder for hele fronten.

Tabell 6:

*Marktrykk og luftmotstand for en bestemt vinkel ved ulike hastigheter*

25 grader	Design Point 1	Design Point 2	Design Point 3	Design Point 4
Velocity in Z direction (Initial and Ambient Conditions) [m/s]	-20	-30	-40	-50
Downforce (Y) [N]	-54.81	-124.26	-222.98	-350.60
Drag (Z) [N]	-24.89	-56.42	-100.80	-158.25
Downforce/Drag	2.20	2.20	2.21	2.22

Resultater fra simuleringene som ble gjort med kun vingeprofil 2 i ulike vinkler vises i grafen under. Disse grafene viser at både marktrykket og luftmotstanden øker ved økt angrepsvinkel, og at differansen mellom disse holder seg ganske jevn fram til 35 grader. Deretter går verdiene nedover igjen for både marktrykk og luftmotstand ved 37,5, før de igjen stiger ved 40 grader. Det kan også legges merke til at linjen for luftmotstand nærmer seg linjen for marktrykk for de to største angrepsvinklene, som betyr større økning av luftmotstand enn marktrykk. I tillegg viser grafen at marktrykket øker svært lite når angrepsvinkelen økes fra 35 til 40 grader. Videre simuleringer tar har derfor ikke med angrepsvinkel over 35 grader for vingeprofil 2.

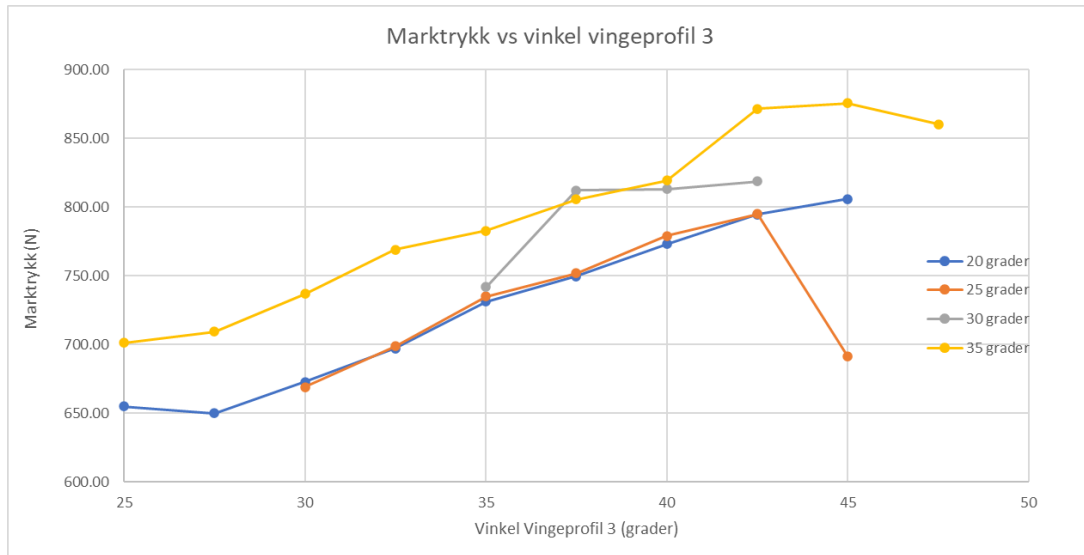


Figur 50: marktrykk og luftmotstand med vingeprofil 2 i forskjellige vinkler

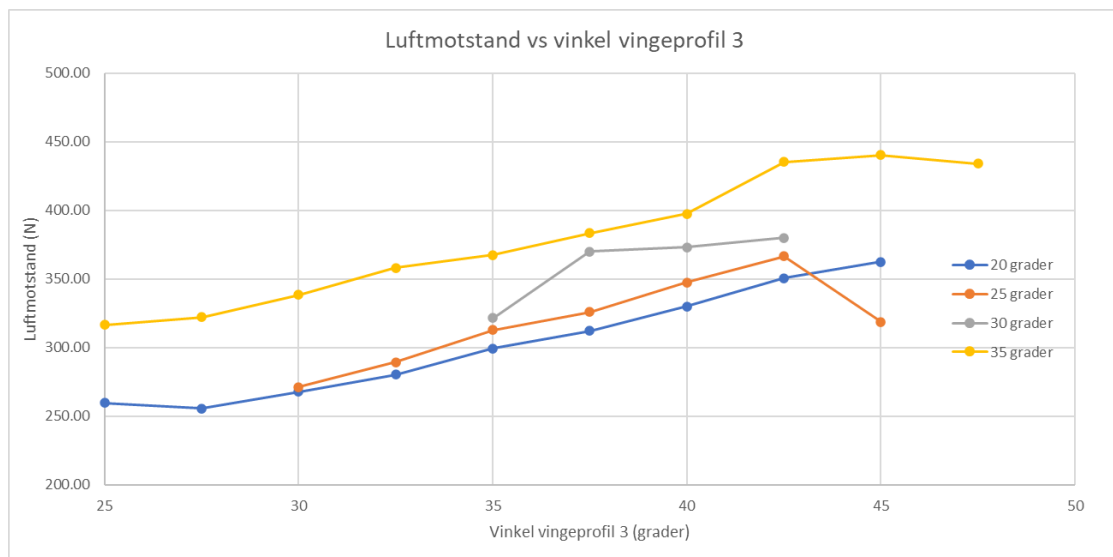
De tre figurene nedenfor viser resultater for marktrykk (øverst), luftmotstand (midterst) og forholdet mellom disse (nederst), fra simuleringer med begge vingeprofilene. I disse diagrammene er hver linje for vingeprofil 2 i en bestemt angrepsvinkel (20-35 grader), og hvert punkt bortover X-aksen er en 2,5 graders økning av angrepsvinkelen til vingeprofil 3. Dette viser da marktrykk og luftmotstand når angrepsvinkelen til de to vingeprofilene justeres i forhold til hverandre.

Grafene viser at marktrykket og luftmotstanden stiger ved økende angrepsvinkel opp til et punkt der grafene begynner å flate ut, og videre økning av angrepsvinkel medfører ikke større marktrykk. Noe som ikke kommer så tydelig fram i disse figurene, men som lettere kan legges merke til i tabellene i vedlegg 12 er nøyaktig hvordan marktrykk og luftmotstand endrer seg i forhold til hverandre. Tabellene viser samme utvikling som kan sees i grafen ovenfor, som er det er punkt der videre økning av angrepsvinkel medfører større økning i luftmotstand enn marktrykk.

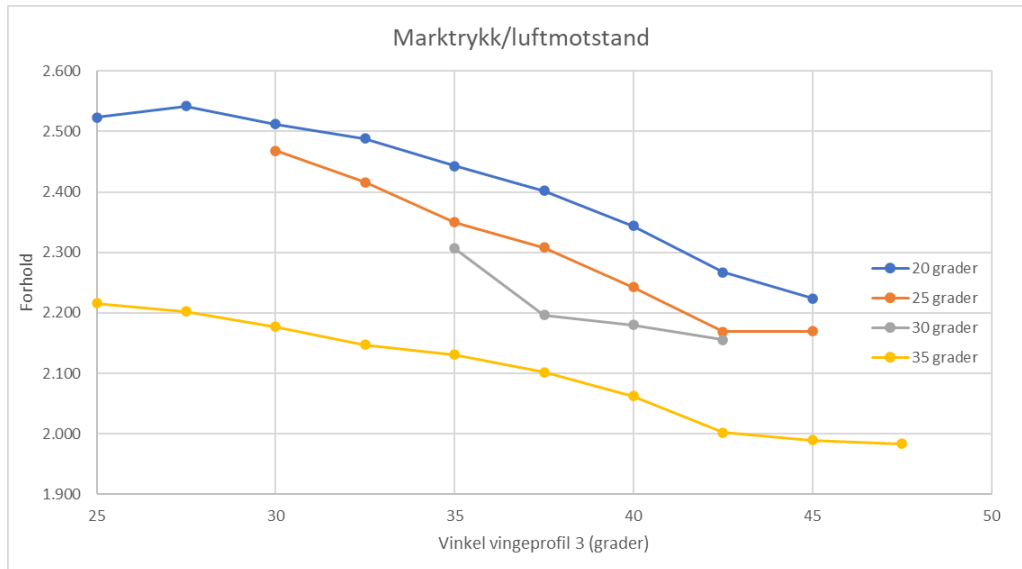
Resultatene fra simuleringen viser at ved store angrepsvinkler kan frontvingen skape marktrykk oppimot 860 N ved hastighet på 50 m/s (180km/t), men at luftmotstanden er størst for de vinklene som gir størst marktrykk. Det viser seg også at det største forholdet mellom marktrykk og luftmotstand oppstår ved små angrepsvinkler. En fullstendig oversikt over resultatene for alle hastigheter og angrepsvinkler finnes som nevnt tidligere i vedlegg 12.



Figur 51: Marktrykk i forhold til angrepsvinkler

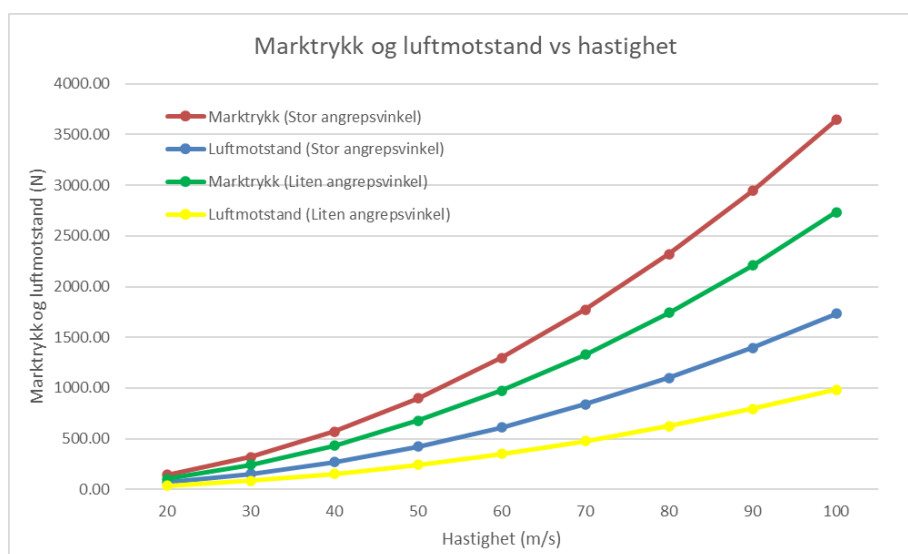


Figur 52: Luftmotstand i forhold angrepsvinkler



Figur 53: Forhold marktrykk/luftmotstand ved ulike angrepsvinkler

Plottet nedenfor viser hvordan marktrykk og luftmotstand for stor og liten angrepsvinkel påvirkes av hastigheten. Dette viser hvordan både marktrykk og luftmotstand øker raskere og raskere for høyere hastigheter. Dette stemmer overens med teorien som sier at motstanden øker med kvadratet av hastigheten ( $v^2$ ). Det kan også legges merke til at kurvene for stor angrepsvinkel stiger raskere enn når denne er liten, som stemmer med vingens tverrsnitt mot bevegelsesretningen øker (S). Resultatene går opp til høyere hastighet enn bilen er beregnet å kjøre, for å gi et tydeligere bilde på hvordan hastighet virker inn på marktrykk og luftmotstand.

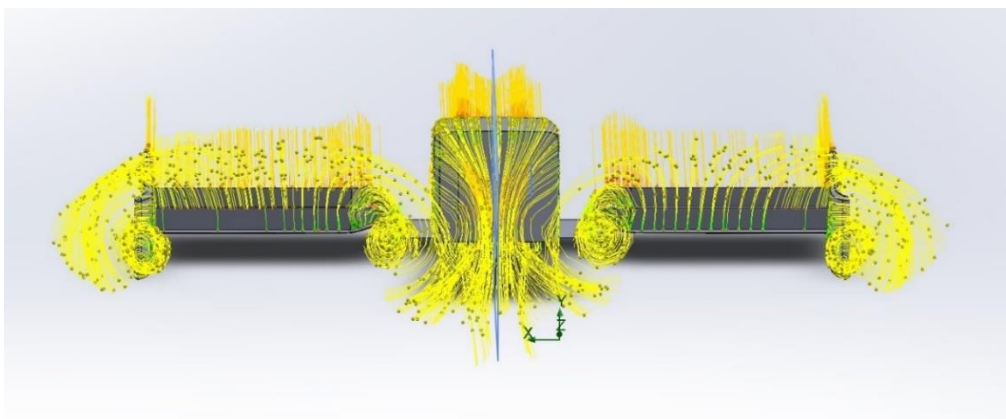


Figur 54: Marktrykk og luftmotstand i forhold til hastighet



## 4.2.2 Luftstrømmer

I tillegg til å se på hvor mye marktrykk og luftmotstand som skapes er det sett på hvordan luftstrømmene beveger seg videre bakover bilen ved hjelp av «Flow Trajectories». Figuren nedenfor viser frontvingen sett fra baksiden, og hvordan strømningslinjene beveger etter at de har passert denne. Dette viser at det oppstår vortexer bak endene av vingeprofilene mot midten av bilen og bak sideplatene. Vortexene blir da på innsiden og utsiden av der hjulet vil være plassert. Sideplatene leder luften rundt hjulet og reduserer dermed luftmotstanden og øker effekten av aerodynamiske komponenter bakover bilen.



Figur 55: plot av «Flow trajectories»

Plottet nedenfor viser et med trykkforskjeller rett etter at luften har passert fronten. Dette viser også vortexene som sirkulære områder med lavt trykk (blått) rett bak endene på vingeprofilene og sideplatene. Det kan også legges merke til at det er lavt trykk på undersiden av vingen, som tyder på at det skapes marktrykk. På den midtre delen av vingen ser det ut til at dette ikke er tilfelle og at luften passerer nokså upåvirket inn under bilen.

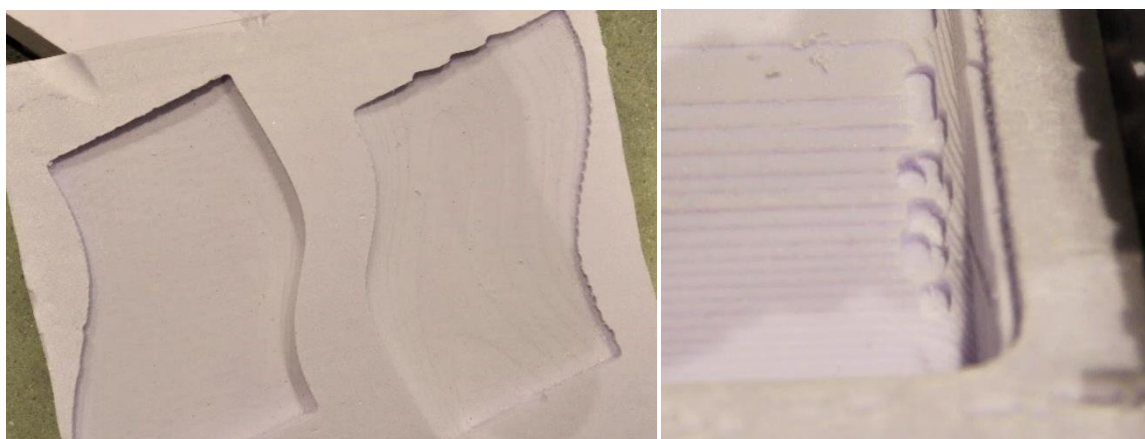


Figur 56: Plot med trykkforskjeller sett fra framsiden

## 4.3 Produksjon

### 4.3.1 Støpeformer

Kvaliteten på de produserte støpeformene endte opp overraskende bra. Av tretti produserte former, ble tjuen produsert uten skader fra freseprosessen. De to siste fikk mindre skader da skjærbaneprogrammet ble laget med for liten sikkerhetsklaring mellom skjæreverktøyet og formmaterialet (se figur 57). Dette var skader som måtte utbedres før støpeformene kunne benyttes til støping.

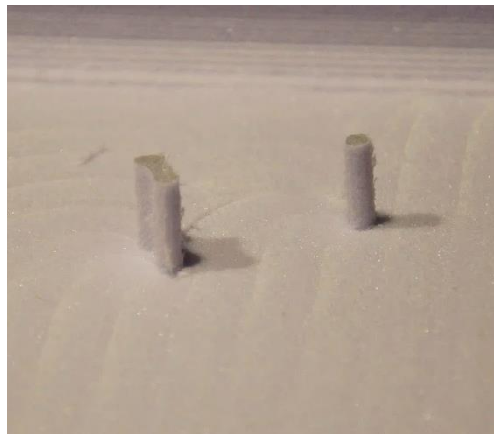


*Figur 57: Ferdig freste støpeformer og støpeform med skader etter feilinnstilling av skjærbaneprogram*

Presisjonen på X-carve-maskinen var veldig bra og resultatene som kom ut fra fresing trengte derfor veldig lite bearbeiding etterpå for å oppnå et fint resultat. Noen av formene kom ut fra fresingen med litt uklare grenser mellom modellområdet og området rundt, på grunn av uheldig plassering av formene i Fusion 360. Dette ble identifisert som en mulig utfordring for den kommende støpeprosessen.

Formene til de to halvdelene av hovedvingen ble frest ut i tre deler hver. Disse skulle senere limes sammen. På grunn av dårlig tid under fresingen ble det gjort en feil ved at modellene ble lagt inn i Fusion 360 med forskjellig høyde. Dermed ble samstillingen av formdelene vanskeligere enn nødvendig

På grunn av veldig små dimensjoner ble også noen av de minste detaljene på enkelte former ødelagt eller skadet under fres. Dette var ikke kritiske deler av formene og de ble hovedsakelig lagt inn for å forenkle monteringen av delene etter støp. Likevel viser disse feilene at X-carve-maskinen har begrensninger når det kommer til maskinering av veldig små detaljer, uten nødvendig støtte rundt.



*Figur 58: Svake smådetaljer etter fresing*



*Figur 59: Former til hovedvingen før sammenliming*

### 4.3.2 Karbonfiberstøp

Etter 16 timer herding ble støpene tatt ut av vakuumposen for å skilles fra formene. Ved første øyekast kunne det se ut som at karbonfiberdukene hadde blitt presset godt nok inn i alle kanter av støpeformene, og at mengden epoksy var passende.



*Figur 60: Ferdig herdet teststøp i støpeform*

Under prosessen med å separere støpene fra formene ble det klart at disse hadde satt seg bedre fast enn ønsket. For å få karbonfiberdelene ut måtte det derfor brukes en del makt og et par kiler. I denne prosessen ble derfor kantene på formene ødelagt, noe som hindret gjenbruk.

Det viste seg at grunnen til at delene satt så godt fast i formene var at epoksyen hadde festet seg fast til gulvlakken, og at delene derfor satt fast i selve formmaterialet. Et tynt lag av formmaterialet hang derfor fast i karbonfiberen sammen med lakken, og gjorde at overflaten trengte etterbehandling.



*Figur 61: En av karbonfiberdelene med formmateriale og lakk hengende fast i overflaten*

Etterbehandlingen ble gjort ved å montere et P100 pussepapir på en pusserondell med teip, og bruke denne på en drill. Dette gjorde at det var mulig å få bort det meste av lakken og formmaterialet fra overflaten. Etterpå ble delene pusset med våtslipepapir P800 og deretter våtslipepapir P1200. Overflatene ble etter denne prosessen overraskende bra, selv om den etter pussing ville måtte lakeres for å få en skinnende overflate. Pussingen viste også at noen områder av overflaten hadde fått mindre epoksy enn ønsket, og dette kunne tyde på at det var brukt noe for lite epoksy i forhold til fibermateriale.

Etter at delene var pusset ble de trimmet ned i kantene for å passe sammen til monteringen. Her viste det seg at det manglende vakuemet hadde gjort at karbonfiberduken hadde «sluppet» noen av hjørnene under herding, noe som gjorde det vanskelig å få til en god tilpasning av formdelene.



*Figur 62: Endelig overflate på karbonfiber etter pussing*

# 5 Diskusjon

## 5.1 Metode

### 5.1.1 Styrkeberegning

Når det gjelder styrkeberegninger ble det ikke prioritert å gjennomføre noen detaljerte beregninger, men det er gjort vurderinger i samråd med Sotirios Grammatikos, som har svært god kunnskap på dette området. Fordi det ikke ble gjort nøyaktige beregninger ble det lagt inn en ekstra sikkerhetsmargin i vurderingene. Det betyr at planlagt lagoppbygning med karbonfiber ikke ble optimalisert med tanke på styrke, vekt og materialforbruk, og derfor er det mulig å gjøre forbedringer på dette området.

Frontvingen er antatt å veie 10-15kg, som utgjør en svært liten del av bilens totale vekt som er anslått å bli på rundt 700kg. Dette betyr at selv om det kunne vært mulig å redusere frontvingens vekt noe ved å gjøre nøyaktige styrkeberegninger og optimalisere lagoppbygningen, så ville det hatt liten effekt på bilens totaltvekt

I tillegg er det komplisert å gjøre nøyaktige styrkeberegninger av komposittmaterialer. Dette skyldes at materialparameterne er avhengige av mange ulike faktorer, som type duk, type epoksy, mengde epoksy osv. Dette medfører varierende materialeparametere, som kunne gitt usikre resultater ved styrkeberegning. Det finnes simuleringsverktøy som skal være nøyaktige på simuleringer av komposittmaterialer, for eksempel Ansys. Ingen av gruppemedlemmene hadde erfaringer med Ansys fra tidligere, og dermed er det sannsynlig at det ville være en tidkrevende prosess å sette seg inn i programmet. Dette kunne gått på bekostning av annet arbeid, og ut fra vurderingene ovenfor er det sannsynlig at beregningene ville vært av liten betydning for sluttproduktet. Dette er likevel beregninger som det bør ses mer på i videre arbeid.

## 5.1.2 Simuleringer

### 5.1.2.1 Simuleringsmetode

Simuleringene som er gjort i denne oppgaven omhandler frontvingens aerodynamiske egenskaper. Dette ble gjort ved hjelp av Solidworks Flow Simulation, selv om dette ikke regnes som det beste programmet til å simulere aerodynamikk. Det ble lenge vurdert å bruke Abaqus for å gjennomføre disse simuleringene da dette regnes som bedre på aerodynamiske simuleringer. Årsakene til at Solidworks ble valgt framfor Abaqus, var at dette ble brukt i designprosessen og det forenklet prosessen med kontinuerlig analyse av modellene. Dette var særlig nyttig for å kunne justere angrepsvinkelen på vingeprofilene fortløpende. Ingen av grupped medlemmene hadde tidligere erfaring med Abaqus, og bruk av dette ville medført ekstraarbeid med å sette seg inn programmet. Selv om resultatene ikke er helt nøyaktige, antas det at disse gir verdier for marktrykk og luftmotstand med tilstrekkelig nøyaktighet til å gi et riktig bilde av hvordan ulike parametere påvirker vingen.

Når det gjelder selve simuleringsprosessen i Solidworks ble denne satt opp på en systematisk måte, noe som gir et tydelig bilde av hvordan ulike kombinasjoner av angrepsvinkler og hastighet påvirker marktrykk og luftmotstand.

Det er valgt å ikke gjøre videre simuleringer for større angrepsvinkler når verdiene for marktrykk flater ut, og når økningen i luftmotstand blir større enn økningen av marktrykk. Når økningen av marktrykk avtar eller faller, tyder det på at angrepsvinkelen er blitt for stor slik at luften på undersiden av vingen ikke lenge følger vingeprofilene oppover. Dermed oppstår turbulens på vingens bakside.

Simuleringene ble gjennomført uten hjul, og simuleringsresultatene viser derfor bare frontvingens effekt uten resten av bilen til stede. Det kunne vært vurdert å gjennomføre simuleringene med hjul, for å se hvordan dette påvirker marktrykk og luftmotstand.

### 5.1.2.2 Simuleringsresultat

Det kan være vanskelig å komme fram til et entydig svar på hva som er den beste kombinasjonen av angrepsvinkler. Dette skyldes at kravene som stilles til en frontvinge i Formel 1 kan variere mellom ulike baner. For eksempel vil en bane med mange krappe svinger og lavere hastigheter stille større krav til marktrykk, for å komme seg raskere gjennom svingene, enn en bane med lengre rette strekninger og høyere hastigheter.

I svingete baner med lavere hastighet vil det antakelig være lurt å gå for høyest mulig marktrykk, selv om dette medfører mer luftmotstand. I lavere hastighet vil motoren i større grad klare å kompensere for luftmotstanden enn ved høyere hastighet, fordi de aerodynamiske kreftene er relativt små i lavere hastigheter. For denne typen baner vil nok derfor nok en innstilling med vingeprofil 2 i 35 grader og vingeprofil 3 i 42,5 grader være det beste alternativet. Fordi bilen i dette prosjektet ikke er planlagt å kjøre i ekstremt høye hastigheter, ble dette vurdert til å være det beste alternativet.

Dersom banene har flere rette strekk og bilen har jevnt over høyere hastigheter er antakelig forholdet mellom marktrykk og luftmotstand viktigere. Det er da ønskelig med høyest mulig marktrykk i forhold til luftmotstand. Det er fortsatt ønskelig å skape stort marktrykk for å ta svingene i høyere hastighet, men når hastigheten blir stor blir også de aerodynamiske kreftene store. Dette gjør at motoren i mindre grade klarer å kompensere for den økte luftmotstanden. For denne typen baner vil muligens en innstilling med vingeprofil 2 i 20 grader og vingeprofil 3 i 27,5 grader være det beste alternativet.

Det mest gunstige vil være å ha et system for å kunne justere begge vingeprofilene. Da vil det være mulig å optimalisere vingen til ulike krav. På grunn av tidsbegrensninger i prosjektet ble det bare planlagt et system for å justere den øverste vingeprofilen, fordi justering av begge ville kreve et mer komplisert system. Denne løsningen mulighet for en innstilling med høyt marktrykk, en med større forhold mellom marktrykk og luftmotstand, og en tredje uten den øverste vingeprofilen som gir både mindre luftmotstand og mindre marktrykk. Innstillingen som gir størst forhold mellom marktrykk og luftmotstand er ikke optimalt, men det er likevel det beste alternativet så lenge det kun er den øvre vingen som kan justeres. Ved å justere begge kunne samme marktrykk vært oppnådd, men med betydelig lavere luftmotstand.



En forbedringsmulighet for videre arbeid med frontvingen er vil derfor være å designe et system for å kunne justere begge vingeprofilene. Siden produksjonen av vingen ikke ble fullført som planlagt er det fortsatt mulig å legge inn et slik system.

### **5.1.3 CNC-maskinering**

Arbeidet på laben viste at det er svært tidkrevende å frese ut mange støpeformer med en CNC-maskin, og at det kreves mye forarbeid for å sikre et godt resultat. Fordi gruppen hadde veldig dårlig tid til å gjennomføre fresingen, og minimal forhåndskunnskap, ble mye av forarbeidet gjort på laben. Dette førte til at arbeidsflyten til tider ble vesentlig redusert siden nye former og skjærbaneprogrammer ikke ble klare fortløpende. Utfordringer knyttet til feil-data fra samarbeidende grupper gjorde også at noen av formene måtte freses ut på nytt med nytt design. Dette tok unødvendig tid og ressurser, og viser hvor viktig det er med klar kommunikasjon og deling av data.

### **5.1.4 Støpeformer**

#### **5.1.4.1 Design av støpeformer**

Teststøpet viste at formdesignet kunne ha utfordringer knyttet til uklart definerte grenser for hvor støpeområdet sluttet inne i formene. Det burde derfor vurderes å merke formenes kanter tydeligere før videre produksjon, og det bør vurderes om det skal legges inn et innlegg i formene som viser grensene bedre. Dette innlegget kan også brukes til å gjøre sammenlimingen av karbonfiberdelene mer presis.

#### **5.1.4.2 Bearbeiding av støpeformer**

Formene ble etter fresing pusset med P1200 våtslipepapir, noe som gjorde at overflaten ble veldig glatt og lukket. Dette ble gjort før formene ble lakkert med gulvlakk, og kan ha vært medvirkende til at lakken slapp formene da støpene skulle tas ut. Formene burde derfor vært pusset med et grovere sandpapir før lakkering for å sikre god heft for lakken. Gulvlakken ga ellers en fin og forsterket overflate som gjorde støpeformene motstandsdyktige mot løsemidler, og ga økt overflatehardhet.

## **5.1.5 Støpeprosess**

### **5.1.5.1 HMS**

På grunn av epoksyens helseskadelige egenskaper ble det å benytte riktig verneutstyr under arbeidsprosessen, vurdert å være ekstremt viktig. Gruppen valgte å legge seg på en linje der det ble brukt noe mer verneutstyr enn det som var anbefalt som minstekrav fra produsenten. Dette ble gjort for å kunne arbeide så raskt som mulig, og samtidig ivareta sikkerheten med god margin. Denne bruken av verneutstyr anbefales også i det videre arbeidet, da sikkerhet alltid må være i førersetet.

### **5.1.5.2 Påføring av slippmiddel**

På grunn av at gulvlakken hang fast i de ferdige karbonfiberdelene er det naturlig å se på om slippmiddelet har blitt brukt på riktig måte. Formene viste tydelige forskjeller mellom de store overflatene og kantområdene, der nesten ingenting av lakken hadde løsnet i kantene. Dette var områder der det ble påført ekstra slippmiddel på grunn av en noe ruere overflate. Dette var også områder der det var vanskeligere å polere slippmiddelet etter påføring. Ut fra dette kan det tenkes at det har blitt pusset for hardt på slippmiddelet på de store flatene under polering, og at det derfor har vært for lite slippmiddel igjen.

For fremtidig arbeid bør det derfor tas særlig hensyn til at det påføres nok slippmiddel i formene, og at disse ikke pusses for hardt under polering.

### **5.1.5.3 Epoksymengde**

Teststøpet viste at blandingsforholdet med 50% ferdigblandet epoksy og 50% karbonfiberduk ga et noe dårligere resultat enn ønsket. For å unngå tørre områder på yttersiden av karbonfiberdelene bør det derfor vurderes å øke blandingsforholdet til 60% ferdigblandet epoksy og 40% karbonfiberduk.

#### **5.1.5.4 Mengde karbonfiberduk**

De ferdige karbonfiberdelene viste noen tegn til at karbonfiberduken hadde blitt noe forskjøvet under produksjonen, og enkelte kanter hadde derfor fått små «hull» mellom fibrene. Dette burde vært unngått ved å sørge for at de oppklippede karbonfiberdukene var tilstrekkelig større enn støpeformene.

Styrken til de ferdige testdelene har ikke blitt målt, og det kan derfor være ønskelig å teste disse før videre produksjon av frontvingen.

#### **5.1.5.5 Vakuumsystem**

For lite tilgjengelig forbruksmateriell til vakuumeringen medførte at denne prosessen ble mislykket under testingen. Gruppen fikk kun tilgang på en mindre mengde vakuumduk og butylteip, og måtte derfor gjøre det beste ut av dette. Vakuumduken hadde flere bittesmå riper på seg, noe som kunne indikere at den hadde blitt benyttet tidligere og muligens ikke var 100% tett. Gruppen hadde av ulike grunner problemer med å få satt skikkelig vakuum på støpeformene under herding, og det er derfor et stort forbedringspotensial for denne prosessen videre. Det manglende vakuomet påvirket også hvordan de ferdige karbonfiberdelene ble sende ut, og det må derfor regnes som en kritisk feil i produksjonsprosessen.

## 5.2 Sluttprodukt

Dette prosjektet fikk ikke det sluttproduktet som var ønskelig ved prosjektstart, og dette skyldes i all hovedsak nedstengningen av samfunnet på grunn av Covid-19. Det at NTNU var stengt ned under store deler av prosjektperioden gjorde det umulig for gruppen å produsere delene som var planlagt på forhånd. Fra gruppen kom inn igjen på skolens lab, var det kun femten dager igjen til innleveringsfristen, noe som var mye mindre tid enn nødvendig. I prosjektplanen ble det satt av tre hele uker til produksjon av frontvingen, i god tid før leveringsfristen, siden gruppen var avhengig av å ha tid til å skrive prosjektrapporten den siste tiden før innlevering.

Produksjonsprosessen ble også påvirket av at materialene som ble bestilt inn gjennom skolen ble kraftig forsinket på grunn av feil i bestillingsprosessen fra universitetet. Leveringen av materialene ble derfor forsinket utover gruppens allerede «pessimistiske» anslag på tre ukers leveringstid. Dette førte til at gruppen ikke fikk de nødvendige materialene tilgjengelig før prosjektfristen, og det måtte derfor tas i bruk alternative materialer i mindre kvantum. Disse produktene hadde annerledes egenskaper enn de som ble bestilt til prosjektet, og gjorde deler av arbeidet mer tidkrevende. Det anbefales derfor at det i videre arbeid tas hensyn til at bestillingsprosessen av materialer kan ta mye lenger tid enn det som kan forventes å være rimelig.

## 5.3 Miljø og etikk

Ferdig herdede komposittmaterialer kan i veldig liten grad gjenvinnes og dette er et viktig aspekt å være klar over ved bruk av materialet. Sett i et bærekraftperspektiv er det derfor et dårligere valg enn andre alternativ. Til denne typen prosjekt er det derimot ingen reelle alternativer til å benytte et komposittmateriale, da egenskapene som kreves er helt spesielle. Det må derfor tas et valg om produksjonen av denne frontvingen er forsvarlig i et miljøperspektiv med de begrensede mulighetene for gjenbruk som finnes, og med den begrensede nytteverdien produktet har. Denne vurderingen bør også gjøres for alle prosjektene tilknyttet produksjonen av Formel 1-replikaen ved NTNU. Utenom å være en

arena for læring for studenter har denne bilen liten nytteverdi annet enn som et rent «leketøy», og dette passer dårlig med det økende fokuset på bærekraft i samfunnet.

De uherdede kjemikaliene som blir brukt til å lage karbonfiberprodukter er også skadelige for liv i vann, og det er særlig viktig å sørge for at avfallet fra disse blir behandlet på riktig måte (følger av sikkerhetsdatablad).

## **5.4 Alternative materialer og løsninger**

I dette dette prosjektet har det blitt vurdert en rekke alternative materialer og metoder. Dette inkluderer forskjellige formmaterialer som MDF-plater og en rekke ulike typer skummaterialer med tilsvarende egenskaper som XPS-skum. Disse har blitt valgt bort etter vurdering av faktorer som pris, tilgjengelighet og egenskaper. Særlig pris har vært en viktig faktor gjennom prosjektet, siden lav pris var viktig for å få tillatelse til å produsere frontvingen.

Det er også blitt vurdert forskjellige metoder for støping av karbonfiberdelene, og dette inkluderer bruk av såkalte pre-impregnerte karbonfiberduker og støp med vakuuminfusjon av resin. Disse metodene har også blitt vurdert etter pris, tilgjengelighet og egenskaper, men også etter vanskelighetsgrad i bruk. Dette er grunnen til at de ble valgt bort.

For festesystemet har det blitt sett på flere ulike typer fester, men på grunn av uklare rammer for hvor mye plass som er tilgjengelig rundt bilens fremre hjuloppheng har det vært vanskelig å konkludere. Gruppen har likevel kommet med et forslag til en type festesystem som vil ha de ønskede egenskapene, og som anbefales brukt i videre arbeid.

## 6 Konklusjon

Målsetningene med dette prosjektet var å utvikle og produsere en frontvinge og en neseikon til en formel 1-bil som skulle være i stand til å generere marktrykk under kjøring i opptil 180km/t. Disse skulle også manipulere luftstrømmene videre bakover bilen. I tillegg skulle neseikonen konstrueres for å ta opp krefter ved krasj og passe sammen resten av bilen. Det skulle også være samarbeid og kommunikasjon med andre grupper, for å sikre at delene er designet slik at de kan fungere som en hel bil. Disse målsetningene er delvis oppnådd.

Det er designet en datamodell av frontvingen og neseikonen. Strømningsanalysene av datamodellen har vist at det skapes et betydelig marktrykk ved bilens topphastighet på 180km/t, og at marktrykket er betydelig høyere enn luftmotstanden. I tillegg viser analysene at luftstrømmene manipuleres videre bakover bilen, ved at det dannes vortexer på ønskede steder under kjøring. Målsetningene for disse avanserte aerodynamiske elementene ved frontvingen vurderes som oppnådd. Derfor anses denne delen av prosjektet som svært vellykket.

Når det gjelder produksjonsdelen er metoden for denne nøye planlagt og beskrevet i oppgaven. På grunn av stengte laboratorier grunnet utbruddet av Covid-19 endret prosjektets rammer seg betydelig underveis. Stengte laboratorier førte til at det lenge var stor usikkerhet knyttet til om produksjonsdelen i det hele tatt kunne gjennomføres. Når det til slutt ble åpnet for tilgang til laboratoriene hadde situasjonen allerede medført store forsinkelser i forhold til den opprinnelige planen for oppstart av produksjon. Den opprinnelige planen var å starte produksjon første uken i april, men det ble ikke gitt tilgang til laben før 5.mai, 15 dager før innleveringsfristen. I tillegg oppstod det problemer med tilgang på nødvendige materialer og utstyr til produksjonsprosessen. Dette medførte at produksjonsdelen ble påbegynt, men gruppen lyktes ikke med å fullføre denne delen av prosjektet. Det ble frest ut støpeformer til alle deler av frontvingen og neseikonen, og dette arbeidet kan regnes som vellykket.

Med tanke på at situasjonen de siste månedene har vært ekstraordinær i historisk målestokk, anses likevel prosjektet som vellykket på de områder gruppen har hatt mulighet til å påvirke. Totalt sett kan det konkluderes med at faktorer utenfor gruppens påvirkning har hatt så stor innvirkning på produksjonsdelen at det ikke kunne forventes at denne ble fullført som planlagt.

## **6.1 Anbefalinger for videre arbeid**

Siden gruppen ikke rakk å bli ferdig med hele produksjonsprosessen er det behov for videre arbeid med prosjektet. Det anbefales at de som skal ta dette prosjektet videre benytter seg av de støpeformer som er produsert, og at disse modifiseres og utvikles etter anbefalinger nevnt tidligere. Videre anbefales det at det, om mulig, gjennomføres tester av krasjelementer og karbonfiberstyrke for å få mer dokumentasjon på dette. I denne oppgaven det gjort en enkel vurdering av et festesystem, med utgangspunkt i systemer brukt på dagens formel 1-biler. Det anbefales at det gjøres en detaljert vurdering av egnede innfestingssystemer for frontvingen etter at endelig design for grenseområdet mellom frontvinge og monocoque er bestemt. I tillegg anbefales også å se på mulige løsninger for justering av både vingeprofil 2 og 3, slik at effekten av frontvingen kan tilpasses.

# 7 Litteraturliste

- Autosport (2017a) *F1 airflow explained - part 2*. Tilgjengelig fra: <https://www.youtube.com/watch?v=qXKQezy12Oo> (Hentet: 05.02 2020).
- Autosport (2017b) *F1 airflow explained - part 1*. Tilgjengelig fra: <https://www.youtube.com/watch?v=xjsUwFHQbWo> (Hentet: 05.02 2020).
- Autosport (2017c) *F1 airflow explained - part 2* [Utklippet bilde fra video]. Tilgjengelig fra: <https://www.youtube.com/watch?v=qXKQezy12Oo> (Hentet: 11.05.20).
- BMW Sauber AG (2006) *Ukjent* [Digitalt bilde]. Tilgjengelig fra: <https://www.auto123.com/en/racing-news/f1-technique-testing-wing-airflows-in-water-tanks?artid=172810> (Hentet: 11.05.20).
- Brainscape (2020) *Kapittel 5: Massebevarelse, Bernoulli og Energilikninger*. Tilgjengelig fra: <https://www.brainscape.com/flashcards/kapittel-5-massebevarelse-bernoulli-og-en-3404307/packs/5103434> (Hentet: 29.04 2020).
- Browne, E. M. (2016) *Optimalisert karbonfiber krasjese for høyttelses Formula Student racerbil*. Master, NTNU. Tilgjengelig fra: [https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2404717/15862\\_FULLTEXT.pdf?sequence=1&isAlloved=y](https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2404717/15862_FULLTEXT.pdf?sequence=1&isAlloved=y).
- Easy composites Ltd (2020a) *Vuduglu-25ml* [Digitalt bilde]. Tilgjengelig fra: <https://3937524.app.netsuite.com/core/media/media.nl?id=10697&c=3937524&h=1390783915bf6b8eee20> (Hentet: 13.05.20).
- Easy composites Ltd (2020b) *carbon-fibre-cloth-fabric-22-twill-195g*. Tilgjengelig fra: <https://system.eu2.netsuite.com/core/media/media.nl?id=3989&c=3937524&h=5909500684992e2d4f5a> (Hentet: 13.05.20).
- F1Technical (2018) *The ground effect*. Tilgjengelig fra: <https://www.f1technical.net/features/21667> (Hentet: 05.02 2020).
- FIA (2020) *Regulations*. Tilgjengelig fra: <https://www.fia.com/regulation/category/110> (Hentet: 28.04 2020).
- Giuni, M. (2013) *Formation and early development of wingtip vortices*. PdD, University of Glasgow. Tilgjengelig fra: <http://theses.gla.ac.uk/3871/>.
- Grøn, Ø. (2019) *Newtons lover*. Tilgjengelig fra: [https://snl.no/Newtons\\_lover](https://snl.no/Newtons_lover) (Hentet: 20.04 2020).
- JAES Company (2019) *How do airplanes fly? Components - Coandă effect or Bernoulli effect- Downwash - 3D animation*. Tilgjengelig fra: <https://www.youtube.com/watch?v=OCh4svEfDmE> (Hentet: 28.04 2020).
- Ltd, C. M. C. (2020) *Camloc 50F 3700N* [Fotografi]. Tilgjengelig fra: <https://camloc.fr/camloc-quarts-de-tour/quart%20de%20tour%2050F-3700N.jpg> (Hentet: 12.05.20).
- Mclaren racing (2020) *Dirty air*. Tilgjengelig fra: <https://www.mclaren.com/racing/f1-playbook/dirty-air/> (Hentet: 28.04 2020).
- Meteorologisk institutt (2017) *Laminær strømning*. Tilgjengelig fra: [https://snl.no/lamin%C3%A6r\\_str%C3%B8mning](https://snl.no/lamin%C3%A6r_str%C3%B8mning) (Hentet: 28.04 2020).
- Ormestad, H., Grøn, Ø. og Pedersen, B. (2019) *Hydrodynamikk*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/hydrodynamikk> (Hentet: 23.04 2020).



- Pedersen, B. (2017) *Bernoulliligningen*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/Bernoulliligningen> (Hentet: 23.04 2020).
- Pfeiffer, N. (2019) *Formula Student Aerodynamics – Growing Wings with CFD*. Tilgjengelig fra: <https://www.simscale.com/blog/2017/07/formula-student-aerodynamics/> (Hentet: 20.04 2020).
- Science Learning Hub (2020) *Wing and lift*. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/300-wings-and-lift> (Hentet: 28.04 2020).
- Tandberg, E. (2019) *Indusert motstand*. Tilgjengelig fra: [https://snl.no/indusert\\_motstand](https://snl.no/indusert_motstand) (Hentet: 29.04 2020).
- University of Illinois at Urbana-Champaign Applied Aerodynamics Group (U.år) *UIUC Airfoil Coordinates Database*. Tilgjengelig fra: <https://m-selig.ae.illinois.edu/ads.html> (Hentet: 10.02 2020).
- University of Illinois at Urbana-Champaign, D. o. A. E. (U.år-a) *Eppler E212 low Reynolds number airfoil* [Digitalt bilde]. Tilgjengelig fra: <https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/afplots/e212.gif> (Hentet: 20.01.20).
- University of Illinois at Urbana-Champaign, D. o. A. E. (U.år-b) *Selig/Donovan SD8020 low Reynolds number airfoil* [Digitalt bilde]. Tilgjengelig fra: <https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/afplots/sd8020.gif> (Hentet: 20.01.20).
- Vistnes, A. I. (2006) *Notat om luftmotstand*. Tilgjengelig fra: [https://www.uio.no/studier/emner/matnat/fys/FYS-MEK1110/v06/luftmotst\\_notat2.pdf](https://www.uio.no/studier/emner/matnat/fys/FYS-MEK1110/v06/luftmotst_notat2.pdf).
- World Hovercraft Organization (2004a) *DiscoverHover CURRICULUM GUIDE #8 BERNOULLI'S PRINCIPLE AND THE COANDA EFFECT*. Tilgjengelig fra: <http://www.discoverhover.org/infoinstructors/guide8.htm> (Hentet: 29.04 2020).
- World Hovercraft Organization (2004b) *Angleofattack* [Digitalt bilde]. Tilgjengelig fra: <http://www.discoverhover.org/infoinstructors/guide8.htm> (Hentet: 15.01.20).

# 8 Vedlegg

Vedlegg 1: Inndata Simuleringer

Vedlegg 2: Simuleringstabeller

Vedlegg 3: Arbeidsplan lab

Vedlegg 4: Sikker jobb-analyse CNC

Vedlegg 5: Risikovurdering labarbeid

Vedlegg 6: Parametre CNC-fres

Vedlegg 7: Sikkerhetsdatablad gulvlakk

Vedlegg 8: Sikkerhetsdatablad slippmiddel

Vedlegg 9: Sikker jobb-analyse støpeprosess

Vedlegg 10: Sikkerhetsdatablad Herder West Systems

Vedlegg 11: Sikkerhetsdatablad Resin West Systems

Vedlegg 12: Simuleringstabeller med grafer

Vedlegg 13: Prosjektplan

Vedlegg 14: HMS-datablad Jackofoam 250 XPS

Vedlegg 15: Sikkerhetsdatablad bygglim

Vedlegg 16: Resultat flow trajectories

Vedlegg 17: Timelister

Vedlegg 18: Medforfatterdeklarasjon

## Vedlegg 19: Solidworks CAD-modeller

