



Heilig-Hartinstituut
derde graad
Naamsesteenweg 355
3001 HEVERLEE

Windtunnel

Ontwerp en constructie van een open windtunnel

**Maarten Espeel
Wolf Vierbergen
Kobe Vlasselaer
6 Techniek-Wetenschappen
GIP**

Schooljaar 2019-2020



Heilig-Hartinstituut
derde graad
Naamsesteenweg 355
3001 HEVERLEE

Windtunnel

Ontwerp en constructie van een open windtunnel

**Maarten Espeel
Wolf Vierbergen
Kobe Vlasselaer
6 Techniek-Wetenschappen
GIP**

Schooljaar 2019-2020

VOORWOORD

Deze geïntegreerde proef gaat over het ontwerpen, bouwen en testen van een windtunnel. Deze paper is geschreven in het kader van de GIP van 6 TW in het Heilig Hart Instituut Heverlee. Van september tot april hebben wij aan deze paper gewerkt.

Samen met onze mentor, Ludo Verluyten, hebben wij de onderzoeksvragen opgesteld. De bouw liep in het begin traag wegens problemen met het bestellen van de onderdelen maar is mooi afgewerkt geraakt. Zo hebben we ook op de onderzoeksvraag kunnen beantwoorden. Tijdens het schrijven konden we aan onze mentor, Ludo Verluyten, altijd onze vragen stellen zodat we vlot verder konden.

Hierbij willen wij graag onze mentor bedanken om ons afgelopen maanden altijd te ondersteunen. Daarnaast onze leerkracht Nederlands voor het verbeteren van elke versie. Ook willen we Harm Ubbens bedanken voor zijn tips en feedback en vooral in het begin van het onderzoek te helpen waar nodig. Zonder deze hulp zou dit onderzoek onmogelijk zijn.

Ook willen wij alle vrienden en familie bedanken die zowel mentaal als financieel hulp boden tijdens het ontwerpen, bouwen, testen en uitschrijven van deze paper. Dankzij hen kunnen we dit onderzoek goed afsluiten.

Wij wensen u een aangename leeservaring toe.

Kobe Vlasselaer
Maarten Espeel
Wolf Vierbergen

Leuven, februari 2020

Inhoud

VOORWOORD.....	5
INLEIDING	8
1 literatuurstudie	9
1.1 Aerodynamica.....	9
1.1.1 Geschiedenis van de aerodynamica	9
1.1.2 Belang van een aerodynamisch voorwerp	10
1.2 Bepaling Laminaire of turbulente stroming.....	10
1.3 Wet van Bernoulli	10
1.4 Toepassing: Werking van een vliegtuig	11
1.4.1 Voortstuwing	12
1.4.2 Weerstand	12
1.4.3 Lift	13
1.4.4 Invalshoek	15
1.5 Bepaling van de windsnelheid.....	16
1.6 Windtunnel	17
1.6.1 Definitie en principe	17
1.6.2 Soorten windtunnels	17
1.6.3 Doel van het project.....	18
2 Materialen en methoden.....	19
2.1 Vereisten en onderdelen van een open windtunnel.....	19
2.1.1 Honinggraat.....	19
2.1.2 Schermen	20
2.1.3 De Trechter	21
2.1.4 De testsectie	23
2.1.5 Diffuser.....	24
2.1.6 Ventilatoren	25
2.2 Montage van de windtunnel.....	27
2.3 Materialen voor de bouw van de windtunnel	27
2.3.1 Extra productiemachines.....	27
3 Praktische proef	28
3.1 Ontwerp van de windtunnel	28
3.2 Zichtbaar maken van laminaire stroom.....	29
3.3 Bepalen van de luchtsnelheid	30
3.3.1 Onderdelen van de proefopstelling bij bepaling van de luchtsnelheid.....	30
3.3.2 Meting van de luchtsnelheid bij maximale stand van de ventilator.....	31
3.3.3 Meting van de luchtsnelheid bij vooraf bepaalde instellingen	32
3.4 Bepaling van de lift van een vleugel bij verschillende invalshoeken	33
3.4.1 Werkwijze voor de meting van de lift op een vleugel.....	33
3.4.2 Bepaling van de liftkracht en liftcoëfficiënt in functie van de invalshoek	34
3.4.3 Liftkracht en Lift coëfficiënt in functie van de luchtsnelheid.....	36
4 Algemeen besluit	38
5 Literatuurlijst	39
6 Lijst met figuren	41
7 Lijst met tabellen	42

INLEIDING

Onze geïntegreerde proef (gip) gaat over windtunnels. Wij wilden absoluut onze gip maken over aerodynamica. We vinden het jammer dat aerodynamica niet tot het studiepakket van het secundaire onderwijs hoort en daardoor wilden we er graag onze gip op baseren.

Het doel van onze gip is om een windtunnel te bouwen die werkt waardoor we er proefjes op kunnen doen. We willen bewijzen dat het mogelijk is laminaire stroom op te wekken met onze zelfgebouwde windtunnel. Het was een lang project met veel tegenslagen en bijkomende problemen die we niet verwacht hadden.

Onze geïntegreerde proef bevat ook een experimenteel gedeelte: we deden proefjes in onze windtunnel en probeerden zo de optimale hoek en vorm te vinden voor een vleugel zodat die zo weinig mogelijk luchtweerstand ondervindt.

Onze informatie hebben we gezocht op het internet en we hebben ook een bezoek gebracht aan Bike Valley. Zij hebben een windtunnel gebouwd om proefjes te doen op de attributen van de wielersport (tenues, vorm fiets en helmen) zodat de wielrenner zo min mogelijk last heeft van luchtweerstand. Daar hebben ze ons veel tips gegeven voor de vorm en materialen van onze windtunnel.

Voor ons was het een zeer boeiende en leerrijke ervaring om een windtunnel te bouwen en we hopen dat u een leerrijke en plezierige ervaring overhoudt aan het lezen van onze geïntegreerde proef.

1 literatuurstudie

1.1 Aerodynamica

Aerodynamica is de wetenschap die de beweging van gassen en vloeistoffen beschrijft. Het maakt deel uit van het vakgebied stromingsleer. Het beschrijven van het stromingsgedrag van een vloeistof of gas kan betrekking hebben op stroming in een vrije ruimte of op een lichaam zoals een vleugel van een vliegtuig [4].

1.1.1 Geschiedenis van de aerodynamica

De wetenschap aerodynamica bestaat pas sinds de 17e eeuw. Daarvoor werd er echter ook al lang gebruik gemaakt van de wind door de mens, zoals bijvoorbeeld bij een zeilboot en een windmolen.

De eerste persoon die een theorie van de luchtweerstand kon ontwikkelen was Isaac Newton. Hij werd gevolgd door Daniel Bernoulli, die een verband vond tussen druk, dichtheid en stromingssnelheid in een onsamendrukbare stroming. Daarna ging de kennis over de aerodynamica in speltempo vooruit dankzij bijdragen van onder andere Leonhard Euler en Sir George Cayley.

In het begin van de 18de eeuw begon Benjamin Robins met luchtweerstand te meten met een 'whirling arm' ('wervelende arm'). Ook Frank H. Wenham experimenteerde hiermee, maar de resultaten hiermee waren niet bevredigend. Zo kwam het idee van een windtunnel. In 1871 werd de eerste windtunnel dan gebouwd door de Brit Francis Herbert Wenham waardoor nauwkeurige metingen van aerodynamisch krachten mogelijk waren. De experimenten die hij uitvoerde waren gerelateerd aan lift en luchtweerstand [17]. Een replica van deze eerste windtunnel kan je terugvinden in figuur 1.



Figuur 1: Replica van de eerste windtunnel

De Duitser Otto Liliental was de eerste mens die een vlucht maakte met een zweefvliegtuig. Dat lukte hem door een nieuw model van de vleugels, ze hadden een dun en gebogen draagvlakke zodat ze een hoge lift en een lage weerstand zouden produceren. Dankzij de nieuwe vleugels van Liliental en eigen onderzoek in hun windtunnel konden de gebroeders Wright voor het eerst een succesvolle vlucht maken met een gemotoriseerd vliegtuig op 17 december 1903. [4]

1.1.2 Belang van een aerodynamisch voorwerp

Lucht is een materie die op een voorwerp een kracht uitoefent als het erlangs stroomt. Tijdens het proces blijft de lucht een beetje aan het voorwerp kleven, dat noemen we luchtweerstand. Voor een zo aerodynamisch mogelijk voorwerp moet de luchtweerstand minimaal zijn. De wind blijft dus een beetje plakken op het voorwerp maar een beetje boven het voorwerp gebeurt dat niet. Er ontstaat dus een snelheidsverschil tussen de lucht die het voorwerp raakt (onderste luchtstroom) en de lucht die er een beetje boven stroomt (bovenste luchtstroom). Er ontstaat dus een grenslaag tussen de twee verschillende luchtstromen. Als de onderste luchtstroom loskomt van het voorwerp en tegen de bovenste luchtstroom botst, ontstaat er turbulente stroming. De winddeeltjes vormen door de botsing een kolkende baan waardoor er veel luchtweerstand is. Als de onderste luchtstroom niet van het voorwerp loskomt is er geen botsing dus blijft de stroom laminair.

Om een zo aerodynamisch mogelijk voorwerp te bekomen moet men dus zorgen dat de luchtstroom blijft plakken tegen het voorwerp en er niet of zo weinig mogelijk los van komt. Men probeert dus hoeken te vermijden en een mooie gladde laag te bekomen. [19]

1.2 Bepaling Laminaire of turbulente stroming

Osbourne Reynolds definieerde in 1883 het Reynoldsgetal. Hij was een Ierse natuurkundige die zich vooral bezighield met hydraulica en hydrodynamica.

Het Reynoldsgetal is een dimensieloze grootheid dat gebruikt wordt om te bepalen of een stroom laminair of turbulent is. Een dimensieloos getal wil zeggen dat het getal geen eenheid heeft. Het getal kan berekend worden met behulp van de volgende formule:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

Waarbij: ρ = de dichtheid in kg/m^3
 v = de snelheid in m/s .
 D = karakteristieke lengte in m .
 μ = de dynamische viscositeit uitgedrukt in kg/m.s

Als het Reynoldsgetal een lage waarde heeft, heb je laminaire stroom en bij een hoge waarde is de stroom turbulent. Bij stroming in buizen heb je bijvoorbeeld laminaire stroom als het Reynoldsgetal een waarde heeft van onder de 2300 en heb je een turbulente stroming als het Reynoldsgetal een waarde heeft van boven de 3500. Als het getal een waarde tussen de 2300 en 3500 heeft is het afhankelijk van verschillende factoren zoals wandruwheid of je turbulente of laminaire stroom hebt. [8, 25 & 37]

1.3 Wet van Bernoulli

Daniel Bernoulli was een Zwitserse natuurkundige die leefde in de 18de eeuw. In 1725 verhuisde hij naar Sint-Petersburg in Rusland waar hij ging studeren aan de pas opgerichte academie. Daar leerde hij Leonard Euler kennen waarmee hij later nauw mee zou samenwerken. De wet van Bernoulli beschrijft het stromingsgedrag van gassen en vloeistoffen en geeft een

verklaring aan de drukverandering bij hoogte en snelheidsveranderingen. Zo schrijft hij dat hoe sneller een gas of een vloeistof een voorwerp passeert hoe lager de druk op dat voorwerp zal zijn. Natuurlijk werkt de wet ook omgekeerd, dat wil zeggen dat hoe trager een vloeistof of gas een voorwerp passeert hoe groter de druk op dat voorwerp zal zijn [34, 7]. Bernoulli heeft hierbij een formule afgeleid die gebruik maakt van de wet van behoud van energie. De som van de kinetische energiedichtheid (dynamische druk), de gravitatiedruk en de druk is gelijk aan een constante.

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh + p = \text{constant}$$

Met ρ = de dichtheid (kg/m³)
 v = de snelheid (m/s)
 g = de valversnelling (m/s²)
 h = het hoogteverschil (m)
 p = de druk (Pa)

De wet van Bernoulli geldt onder een aantal voorwaarden. Deze zijn de volgende:

1. De dichtheid is constant. De stof mag dus nergens samengedrukt of uitgerekt zijn.
2. De stof mag geen inwendige wrijving hebben. De viscositeit moet nul zijn.
3. De stroming is stationair (= constante snelheid).

1.4 Toepassing: Werking van een vliegtuig

Zoals elk voorwerp op onze aarde wordt een vliegtuig aangetrokken door de zwaartekracht. Om een vliegtuig in de lucht te brengen zullen dus krachten moeten inwerken die de zwaartekracht tegenwerken. Deze kracht, die ervoor moet zorgen dat een vliegtuig niet naar beneden valt, wordt ook wel 'de lift' genoemd. Deze inwerkende liftkracht moet groter zijn dan de zwaartekracht en in tegengestelde zin.

Daarnaast moet een vliegtuig kunnen voortbewegen in de lucht. Ook hier ondervindt het vliegtuig een tegenwerkende kracht, namelijk de weerstand van de lucht. Om zich in de lucht te verplaatsen moet het vliegtuig dus extra arbeid verrichten die geleverd wordt door de motoren van het vliegtuig.

In figuur 2 wordt de inwerking van de verschillende krachten geïllustreerd.



Figuur 2: krachten op een vliegtuig

1.4.1 Voortstuwing

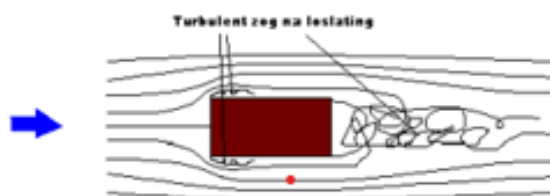
Om een vliegtuig te laten voortbewegen in de lucht moet het een stuwkracht naar voren uitoefenen. Er zijn twee soorten motoren die deze stuwkracht kunnen veroorzaken, namelijk motoren met propelleraandrijving of straalaandrijving.

Bij een propelleraandrijving wordt een draaiende beweging van een propeller of luchtschroef veroorzaakt door een motor. De propeller draait in de lucht en zo ontstaat er een drukverschil aan de voor- en achterzijde van de propellerbladen zodat er een voorwaartse kracht ontstaat. Deze kracht duwt het vliegtuig vooruit.

Bij straalaandrijving wordt lucht aan de voorkant van een straalmotor ingezogen en daarna samengeperst door een compressor. De lucht wordt gemengd met de brandstof en bij verbranding creëert dit een grote hoeveelheid warmte. Deze verwarmde gassen zullen bij het verlaten van de motor aan de achterkant sterk uitzetten. De bijhorende drukverschillen veroorzaken de voortstuwende kracht. De voortstuwende kracht opgewekt door de motor moet minstens even groot zijn als de weerstandskracht van de lucht.

1.4.2 Weerstand

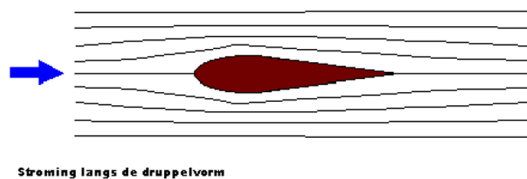
Wanneer een object voortbeweegt in de lucht ondervindt dit voorwerp een weerstand van de luchtdeeltjes die de voortbeweging tegenwerkt. Deze aerodynamische kracht is een kracht veroorzaakt door interactie van het voorwerp met de lucht. Lucht heeft een bepaalde viscositeit en zal als het ware blijven kleven aan het object. Er ontstaat zo een snelheidsverschil tussen de lucht boven het oppervlak van het voorwerp en de lucht grenzend aan het voorwerp. Dit veroorzaakt een variatie in stroming. Een laminaire stroming die weinig weerstand biedt kan zo omslaan naar een turbulente stroming waarbij de luchtdeeltjes draaiende bewegingen maken die de weerstand verhogen. Bovendien hebben de luchtdeeltjes het moeilijk om langs een scherpe hoek voort te bewegen. Er ontstaat dan achter het blok een leegte met turbulente stromingen die veel weerstand bieden, zoals weergegeven in figuur 3.



Een blok in de stroming

Figuur 3: turbulente stroming bij een blok [39]

Deze turbulente stromingen moeten zo veel mogelijk vermeden worden omdat dit ervoor zorgt dat het vliegtuig meer kracht gaat moeten ontwikkelen om voort te bewegen. Om deze turbulente stromingen te verminderen zal men ervoor moeten zorgen dat het vliegtuig en de vleugels een vorm aannemen die meer 'aerodynamisch' is. Hierbij moet men onder andere scherpe hoeken aan het vliegtuig vermijden. Wetenschappers hebben kunnen aantonen dat een vleugel/vliegtuig die een druppelvorm heeft de beste resultaten zal opleveren [19]. Bij deze druppelvorm is de vleugel vooraan afgerond en eindigt bij achteraan in een spits. Zo blijft de laminaire stroming behouden zoals weergegeven in figuur nr. 4. De druppel zoals weergegeven is figuur 4 is het meest aerodynamisch.



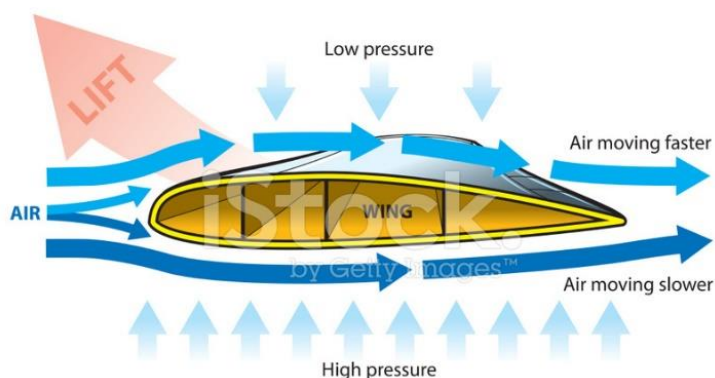
Figuur 4: stromingen langs een druppelvorm (27)

Daarbovenop ontstaat er door de luchtmoleculen een wrijvingskracht op het vliegtuig. Men heeft kunnen aantonen dat wanneer het oppervlak van het vliegtuig glad is er minder wrijving optreedt dan bij een ruw oppervlak [19].

1.4.3 Lift

Om lift bij een vliegtuig te verkrijgen moet de opwaartse kracht groter zijn dan de neerwaartse zwaartekracht, want volgens de tweede wet van Newton kan een voorwerp maar een lift ondergaan als de som van alle krachten die op dat voorwerp inwerken een netto opwaartse kracht oplevert. Er zijn verschillende theorieën beschreven om lift van een vliegtuig te verklaren en sommige theorieën zijn meer aanvaard dan anderen. Belangrijk is steeds dat lift enkel kan verkregen worden, wanneer een fluïdum zoals lucht aanwezig is waardoor, bij voortbeweging van het vliegtuig, de vleugel botst tegen de luchtmoleculen.

In een eerste theorie wordt de wet van Bernoulli toegepast. De opwaartse kracht wordt opgewekt door de specifieke asymmetrische kromming van de vleugel die ervoor zorgt dat de stroming bovenaan de vleugel sneller stroomt dan onder de vleugel. Door de vorm van de vleugel zal de luchtstroom namelijk een grotere afstand afleggen aan de bovenkant dan aan de onderkant. Hierdoor moet de lucht langs boven over de vleugel sneller gaan. Deze lichtsnelheidsverschillen worden via de wet van Bernoulli omgezet in drukverschillen. Hoe groter de snelheid van de lucht is, hoe lager de druk is (zie figuur 5) [21].

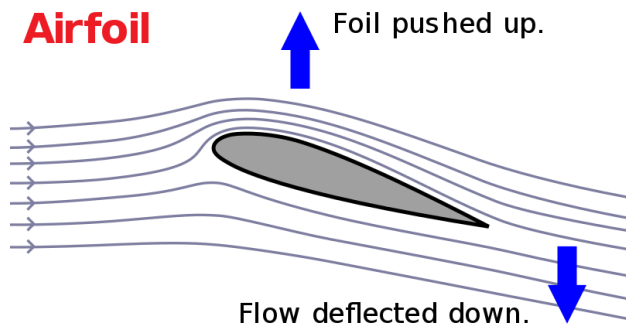


Figuur 5: Drukverschillen op een vleugel [21]

Dit betekent dat de druk van de lucht onderaan de vleugel hoger is dan bovenaan. Deze drukverschillen zorgen bijgevolg voor een verticale liftkracht naar boven. Deze theorie vindt men in vele tekstboeken terug, echter deze theorie klopt niet helemaal. Om lift te krijgen moet de vleugel volgens deze theorie een asymmetrische vorm hebben waarbij de lucht bovenaan de vleugel een langere weg aflegt dan onderaan de vleugel. Er is echter aangetoond dat er evenzeer lift kan ontstaan bij vleugels met een symmetrische vorm. Bovendien ziet men in vliegtuigshows soms vliegtuigen ondersteboven vliegen. Hierbij zullen dan de luchtmoleculen een

langere weg afleggen aan de onderkant ten opzichte van de bovenkant. Ook deze vliegtuigen blijven in de lucht hangen en krijgen dus een liftkracht naar boven [26]

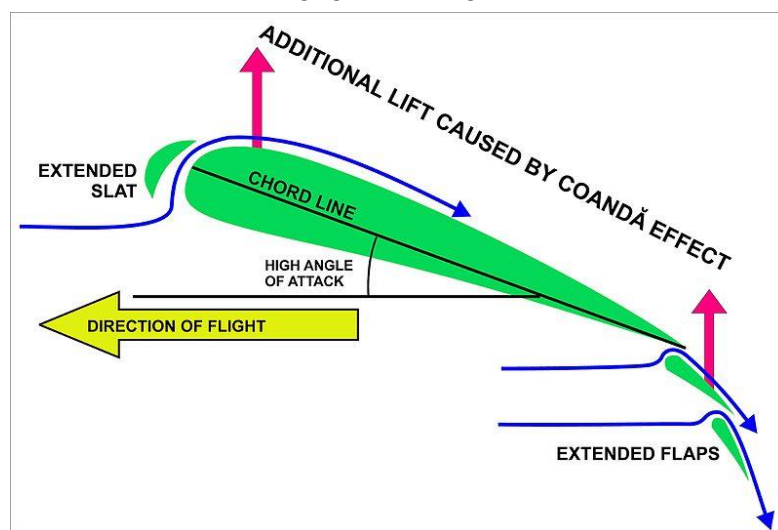
Een andere en momenteel meer aanvaarde verklaring voor de liftkracht is het feit dat door de vorm en de hoek die een vleugel maakt, de lucht zal bewegen in een neerwaartse richting. Door de tweede wet van Newton zal er hierdoor een neerwaartse kracht op de lucht ontstaan. Deze neerwaartse kracht veroorzaakt vervolgens volgens de derde wet van Newton (actie en reactie) een opwaartse kracht naar boven. Dus de vleugel oefent een neerwaartse kracht op de lucht en de lucht oefent hierdoor een opwaartse kracht op de vleugel zoals weergegeven in figuur 6.



Figuur 6: Neerwaartse en opwaartse krachten op een vleugel door de stroming van de lucht [43]

Er wordt bovendien door de stroming van de lucht onder de vleugel een overdruk gegenereerd aan de onderkant van de vleugel ten opzichte van de bovenkant. Deze drukverschillen veroorzaken vervolgens een liftkracht.

Daarnaast is er ook sprake van het feit dat er extra lift kan gecreëerd worden door het Coanda-effect. Als lucht botst tegen een oppervlakte dan heeft deze de neiging om de vorm van het oppervlakte te volgen. De voorwaartse beweging van het vliegtuig veroorzaakt zo een luchtstroming die de bolvormige vorm van de vleugel zal volgen. Hierdoor zal de luchtsnelheid verhogen en door de wet van Bernoulli zal de druk verlagen boven de vleugel. Wat extra lift veroorzaakt. Door gebruik te maken van extra flappen aan de vleugel kan men dit effect nog versterken zoals weergegeven in figuur 7



Figuur 7: Het coanda-effect op een vleugel [6])

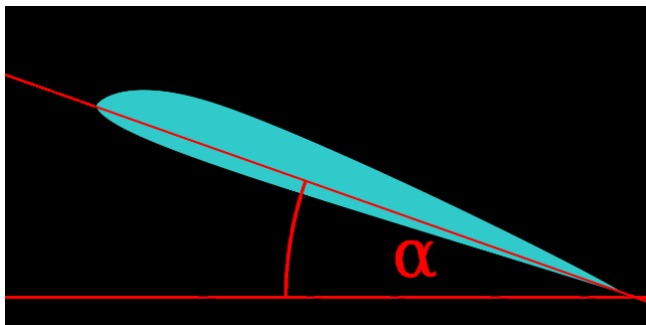
1.4.4 Invalshoek

Volgens de wet van Bernoulli wordt de liftkracht bepaald door de dichtheid van de lucht, de lichtsnelheid, de oppervlakte van de vleugel en de liftcoëfficiënt zoals weergegeven in volgende formule [32]:

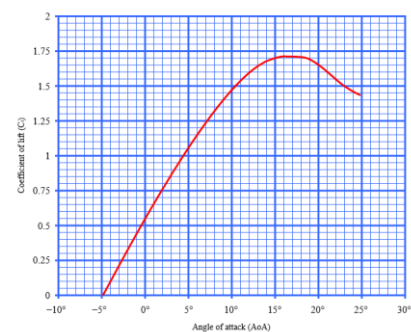
$$L = \frac{1}{2} \rho \times v^2 \times S \times C_L(\alpha)$$

Waarbij: L = lift
 ρ = de dichtheid van lucht in kg/m^3
 v = lichtsnelheid (m/s)
 S = oppervlakte van de vleugel in m^2
 $C_L(\alpha)$ = liftcoëfficiënt ten opzichte van de invalshoek α (figuur 9)

Deze liftcoëfficiënt wordt bepaald door de hoek die de vleugel maakt ten opzichte van de luchtstroming. Deze hoek wordt ook de invalshoek genoemd. De bepaling van deze invalshoek wordt weergegeven in figuur 8. Als de invalshoek 0° is krijgt men reeds een liftkracht doordat de stroming van de lucht al naar onder wordt afgebogen door de asymmetrische vorm van de vleugel. Naarmate de invalshoek toeneemt stijgt de liftcoëfficiënt tot deze een maximale waarde bereikt. De stijging wordt veroorzaakt door de steeds toenemende snelheid van de lucht aan de bovenkant van de vleugel en bijgevolg lagere druk tegenover de onderkant van de vleugel. De liftcoëfficiënt in functie van de invalshoek wordt weergegeven in figuur 9.

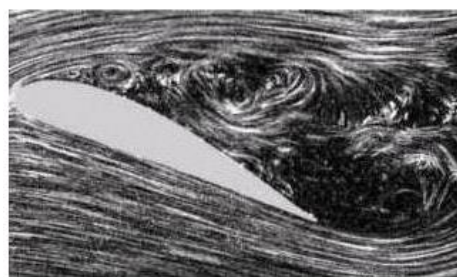


Figuur 8: De invalshoek



Figuur 9: De liftcoëfficiënt in functie van de invalshoek

Bij een te grote invalshoek (gewoonlijk rond de 15°) kan de luchtstroming aan de bovenkant van de vleugel niet meer volgen en komt hij ervan los door de te lage druk. Hierbij ontstaan luchtwervelingen bovenop de vleugel waardoor de opwaartse kracht wordt teniet gedaan (zie figuur 10) [32]

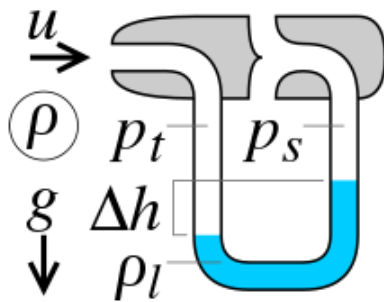


Figuur 8: Stroming op een vleugel bij kleine invalshoek (links) en bij een grote invalshoek (rechts)

1.5 Bepaling van de windsnelheid

Om de windsnelheid op te meten in een windtunnel wordt er gebruik gemaakt van een pitotbuis. Dit is een eenvoudig meettoestel bestaande uit een simpele metalen buis waarin enkele gaten geboord worden. Het eerste gat wordt geboord in de voorkant van de buis zodat dit gat evenwijdig staat met de luchtstroming doorheen de windtunnel. Het tweede en een derde gat worden hier loodrecht op geboord zodanig dat ze loodrecht staan op de luchtstroming in de windtunnel. Deze gaten laten lucht binnen in de pitotbuis en maken het mogelijk om een drukverschil op te meten tussen de lucht die binnenkomt vooraan de pitotbuis en aan beide zijkan-

ten. De schachten in de pitotbuis loodrecht op de luchtstroming ondervinden enkel een statische druk (de atmosferische druk). De schacht verbonden aan het gat in de voorkant van de pitotbuis ondervindt echter zowel de statische atmosferische druk als een bijkomende dynamische druk ten gevolge van de luchtsnelheid. Het drukverschil dat ontstaat tussen beide schachten kan eenvoudig opgemeten worden door deze bijvoorbeeld te verbinden aan weerszijden van een buis gevuld met vloeistof en een meting te doen van de vloeistof in de U-buis (principe van verbonden vaten). Een schematische weergave van de pitotbuis is weergegeven in figuur 11.



Figuur 9: De pitotbuis

Het verschil van het vloeistofniveau kan later ingevuld worden in de vergelijking van Bernoulli om op die manier de luchtsnelheid op te meten.

$$p_t = p_s + p_d$$

$$v^2 = \frac{2 * (p_t - p_s)}{\rho_{lucht}}$$

Waarbij:

- p_t : totale druk
- p_s : statische druk (atmosferische druk)
- p_d : dynamische druk (druk ten gevolge van luchtsnelheid in windtunnel)
- v : luchtsnelheid in windtunnel
- ρ_{lucht} : dichtheid van de lucht

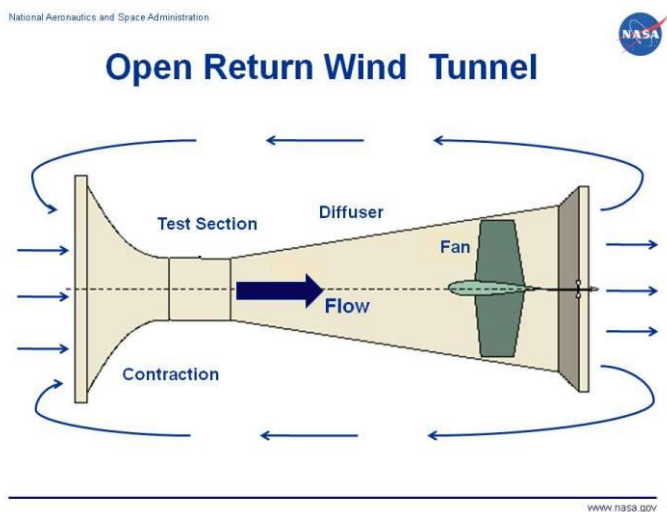
Een accurate meting van de luchtsnelheid met behulp van een pitotbuis vergt echter wel een voldoende grote luchtsnelheid. Bij erg lage luchtsnelheden zullen de fouten gemaakt op de metingen erg groot worden [29].

1.6 Windtunnel

1.6.1 Definitie en principe

Een windtunnel is een handig apparaat om verschillende types luchtstromingen te onderzoeken. In een windtunnel kan men zo de aerodynamische eigenschappen van een voorwerp bestuderen. Door een voorwerp te plaatsen in de windtunnel ziet men het effect van de lucht op het voorwerp en van het voorwerp op de luchtstroom. Op deze manier kan men het voorwerp aanpassen zodat dit zich ideaal gaat gedragen in de luchtstroom.

Een windtunnel, zoals weergegeven in figuur 12, bestaat steeds uit een trechter waarbinnen de lucht wordt ingezogen en gecontraheerd, een recht testgedeelte waarin het voorwerp geplaatst wordt en een breder deel 'de diffuser' die door de aanwezige ventilatoren (propellers) de lucht in de tunnel gaat zuigen.



Figuur 10: Schets van een windtunnel [27]

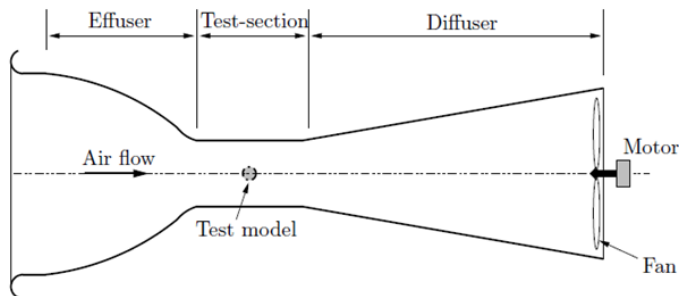
Het principe van een windtunnel is dus vrij simpel. De propellers in de diffuser achteraan draaien zodat er een luchtstroming gecreëerd wordt voor de opening van de windtunnel, in de richting van de windtunnel. De stroming die zo naar binnen gezogen wordt is turbulent van aard. Dit wordt opgelost door in het begin van windtunnel een specifieke trechterstructuur te maken waarin een honinggraat aanwezig is (zie verder). Hierdoor wordt de doorsneeoppervlakte verkleind en stijgt zo de snelheid van de lucht. Daarna komen we in de testsectie, de plaats waar de experimenten uitgevoerd worden. Na de testsectie vergroot de doorsneeoppervlakte weer en is er plaats voor ventilatoren.

Een voordeel van het gebruik van windtunnels is dat experimenten in een gecontroleerde omgeving kunnen uitgevoerd worden, in tegenstelling tot blootstelling aan de buiten omgeving. Een nadeel is dat vaak schaalmodellen gebruikt moeten worden, aangezien een object op ware grootte vaak te groot is voor veel windtunnels [31].

1.6.2 Soorten windtunnels

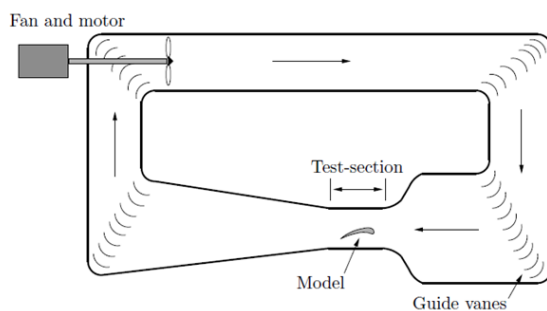
Er zijn twee types windtunnels, de open en de gesloten windtunnels. Elk heeft zijn voordelen. Het is aan ons om deze tegen elkaar af te wegen. Een open windtunnel is een windtunnel dat de lucht niet recirculeert. De windtunnel zuigt langst de voorkant lucht in de kamer. Zo passeert

de lucht langst alle onderdelen van een windtunnel en komt langs de achterkant opnieuw uit de kamer [10]. De grote voordelen van een open windtunnel zijn dat het eenvoudig en economischer te bouwen is dan een gesloten windtunnel. De extra moeite en kosten worden vermeden want er zijn minder kanalen die ontworpen en gebouwd moeten worden. Ook is de luchtstroomvisualisatie gemakkelijker (rook kan langst voor gemakkelijker binnen) en de luchttemperatuur stijgt minder snel. Er is geen zuivering van de lucht nodig en rookopstoppen worden vermeden. Een schets van een open windtunnel wordt getoond in figuur 13.



Figuur 11: Open windtunnel

Een gesloten windtunnel hergebruikt dezelfde lucht opnieuw. Eenmaal door de propeller aangedreven passeert de lucht door een aantal hoeken, daarna door de trechter met schermen en honinggraatstructuur. Tenslotte door de testsectie en de diffuser. Deze lijkt qua constructie bijna hetzelfde als een open windtunnel, met als enige zichtbare verschil dat de lucht telkens dezelfde weg aflegt. Dit brengt een aantal voordelen met zich mee [5]. Men moet minder energie verbruiken om een bepaalde luchtsnelheid te verkrijgen en de externe factoren in de kamer waar de windtunnel zich bevindt (luchtverplaatsingen of stof) hebben geen invloed op de luchtstroom. In een gesloten windtunnel stijgt de luchttemperatuur sneller. Daarom is er bij een gesloten windtunnel een luchtkoelingssysteem nodig, wat een extra complexiteit en kosten met zich meebrengt bij het maken bouwen ervan. [10, 5] Een schets van een gesloten windtunnel wordt getoond in figuur 14.



Figuur 12: gesloten windtunnel

1.6.3 Doel van het project

Het doel van dit project is dat we instaat zijn om zelf een windtunnel te ontwerpen en te bouwen die laminaire stroom kan genereren, zodat we hiermee experimenten kunnen uitvoeren waarvan de resultaten overeenkomen met die van industriële windtunnels. In het experimenteel deel van het project willen we een antwoord vinden op volgende onderzoeksvraag: Zijn wij in

staat om een windtunnel te bouwen waarin we laminaire stroming kunnen opwekken, die we vervolgens kunnen gebruiken om aerodynamische experimenten uit te voeren? Om op deze vraag te kunnen antwoorden moeten we onze hoofdonderzoeksvraag opdelen in deelvragen:

1. Wat heb je nodig om een windtunnel te bouwen?
2. Hoe wek je laminaire stroming op?
3. Hoe kan ik laminaire stroom zichtbaar maken?
4. Hoe meet je de luchtsnelheid?
5. Wat is de luchtsnelheid in de windtunnel?
6. Wat is de beste invalshoek om lift op een vleugel te creëren?

2 Materialen en methoden

2.1 Vereisten en onderdelen van een open windtunnel

Om een functionele open windtunnel te bouwen die laminaire stroom creëert moeten de onderdelen voldoen aan belangrijke eisen. Een open windtunnel bestaat uit 6 grote onderdelen: de honinggraat, schermen, trechter, testsectie, diffuser en ventilatoren.

Om een laminaire luchtstroming te verkrijgen zal er gebruik gemaakt worden van 1 honinggraat en 2 schermen en zal men een contractieverhouding van 5,09:1 gebruiken. [18]. Een contractieverhouding is de verhouding van de oppervlakte tussen de inlaat van de windtunnel en de uitlaat van de testsectie.

2.1.1 Honinggraat

De luchtstroom wordt laminair gemaakt via een honinggraatstructuur. De doorsnede van de individuele cellen van onze honinggraat is rond. Normaal is een honinggraat altijd hexagonaal maar in dit document zullen we toch altijd spreken van een 'honinggraat'. Een honinggraat is een verzameling van kanalen die dezelfde richting uitwijzen als de luchtstroom. Zo worden dwarsstromingen van de luchtstroom geminimaliseerd tijdens het binnenstromen van de windtunnel.

Een optimale verhouding tussen diameter en lengte van elke cel in de honinggraat is 1:10. [36] Dit is echter waar wij ook naar streven. Anderen beweren dat een verhouding 1:6 al genoeg is [28]. Uiteraard kan het geen kwaad als de cellen langer zijn. Als materiaal voor de cellen hebben wij rietjes gekozen, deze zijn goedkoop en hebben een optimale diameter van 0,6 cm. Het bruikbare deel van de rietjes (de plooibare kant niet erbij gerekend) is 18,0 cm lang. Deze 18,0 cm wordt telkens in 3 delen van 6,0 cm geknipt. Zo is de gewenste verhouding van 1:10 bereikt. Vervolgens worden de kortere rietjes naast elkaar gelegd en aan elkaar gelijmd. Er zijn naar schatting 2100 rietjes gebruikt voor de honinggraat, dus bijna 6400 kleine, individuele rietjes op elkaar en naast elkaar gestapeld.

Om de honinggraat bij elkaar te houden zijn er rond de honinggraat 4 panelen van 3mm dik MDF bevestigd in een vierkant. De honinggraat is vervolgens geplaatst in het begin van de trechter. In dit gedeelte van de windtunnel is er namelijk een lage windsnelheid en hoge drukken zodat hierdoor de luchtstroming turbulent is.

Since the pressure loss is proportional to the mean speed of the fluid flow, the manipulators are generally installed in the low-speed portion of the wind tunnel. [SCHEIMAN, 1981, blz 1].
Vertaling: *Aangezien het drukverlies evenredig is aan de snelheid van de vloeistofstroom, zijn de manipulators (bij ons de honinggraat en de schermen) over het algemeen geïnstalleerd in het lage-snelheidsgedeelte van de windtunnel.*

Afbeeldingen van het maken van de honinggraatstructuur zijn weergegeven in figuur 15 en 16.



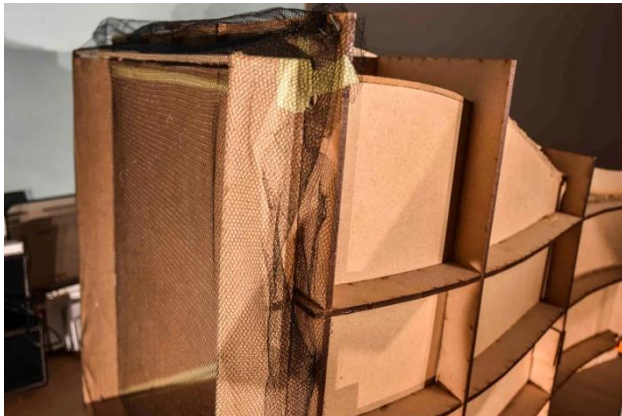
Figuur 15: opbouw van de honinggraat



Figuur 16: de afgewerkte honinggraat

2.1.2 Schermen

Naast de honinggraatstructuur zijn ‘de schermen’ ook een belangrijk onderdeel van de trechter om laminaire stroom te verkrijgen. De schermen die wij gekozen hebben zijn gemaakt van muggengaas met hexagonale vorm zoals weergegeven in figuur 17 en 18.



Figuur 17: De trechter met de schermen gemonteerd

De schermen zullen ervoor om te zorgen dat de axiale turbulentie door het drukverschil in de doorsnede, vermindert terwijl het honinggraat vooral de laterale turbulentie zal verminderen [35]. Beide constructies zijn dus nodig.

Om de opening van het muggengaas te berekenen maken we gebruik van volgende formule [23]:

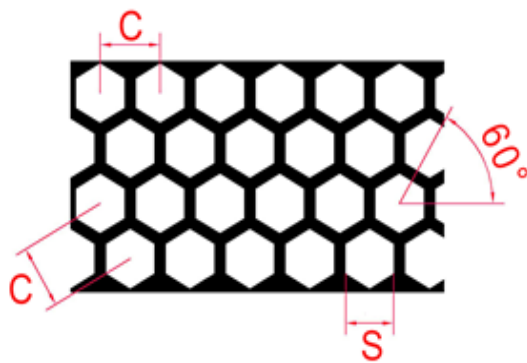
$$\frac{S^2 \times 100}{C^2} = \%$$

Met de openingsgrootte S van 2.0 mm en een tussenafstand C van 2,5 mm (deze metingen zijn gedaan met een digitale schuifmaat en weergegeven in figuur 18) bekommen we een percentage van 64%.

$$\frac{2.0 \text{ mm}^2 \times 100}{2.5 \text{ mm}^2} = 64\%$$

Het gebruikte scherm in de trechter is gewoven nyldraad en heeft dus een opening van 64% (met onze metingen).

Deze openingen moeten niet overeenkomen met de openingen van de honinggraat. We gebruiken in de windtunnel twee schermen, het eerste op 45mm van de honinggraat en het tweede op 45 mm van het eerste scherm. Het plaatsen van twee schermen is voor ons voldoende om het turbulentieniveau dat wij willen halen te bereiken. [38]



Figuur 18: De honinggraatstructuur van het muggengaas

2.1.3 De Trechter

De trechter heeft een specifiek gebogen vorm.

De vorm van deze buiging is gemaakt volgens een aantal voorwaarden:

1. Contractie verhouding van 5.09:1. [18]
2. De latjes moeten uitgesneden kunnen worden op een plaat die maximaal 60.0 cm lang is en 30.0 cm hoog is (dit is de maximale grootte dat in de lasersnijders past).
3. Minimale stroomscheiding (stroom komt los van een oppervlak).

Om de trechter te maken is er gebruik gemaakt van 3mm MDF voor zowel de skeletstructuur als de binnenkant. De skeletstructuur is uitgesneden met een lasersnijder in het Fablab Leuven aan de Arenberg campus III.

Om de vorm van de trechter te bepalen maken we gebruik van een polynoom van de vijfde orde (de hoogste macht in 5), voorgesteld door Bell & Metha [30].

$$y = (-10\zeta^3 + 15\zeta^4 - 6\zeta^5)(H_i - H_u) + H_i$$

Waarbij, $\zeta = \frac{x}{L}$

De door ons te bepalen variabelen zijn:

1. L , lengte van de contractie: We kozen voor L 58.0 cm, aangezien de maximumlengte van een latje 60.0 cm is en we wilden wat marge laten om het snijproces gemakkelijker te maken.
2. H_u , (hoogte van de contractie uitlaat gemeten vanaf de middellijn). In het oorspronkelijk ontwerp hebben we H_u gelijk aan 10.0 cm gekozen, maar wegens inaccuraat buigen is dit 9.5 cm geworden.
3. Voor H_i , (hoogte van de contractie-inlaat gemeten vanaf de middellijn) kozen we 22.56 cm.

Om een contractieverhouding van 5.09:1 te bereiken moeten we dus A_i 5.09 keer groter maken dan de A_u en zal de hoogte van de inlaat dus 22,56 cm zijn zoals uitgewerkt in volgende berekeningen:

$$A_u = \text{oppervlakte uitlaat:} \quad A_u = (H_u \times 2)^2 = 400 \text{ cm}^2$$

$$A_i = \text{oppervlakte inlaat:} \quad A_i = A_u \times 5.09 = 2036 \text{ cm}^2$$

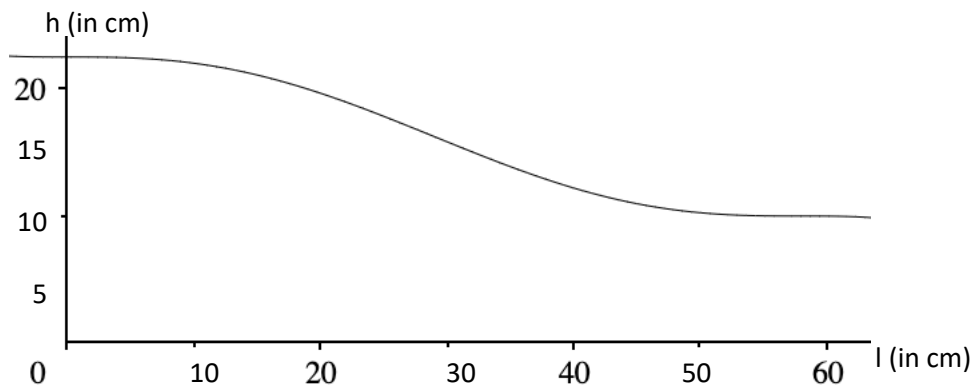
Nu moeten we deze oppervlakte A_i terugrekenen naar H_i .

$$A_i = (H_i \times 2)^2$$

$$H_i = \frac{\sqrt{A_i}}{2}$$

$$H_i = 22,56 \text{ cm}$$

Vullen we al deze waarden in de formule, dan ziet de grafiek eruit zoals weergegeven in figuur 19.



Figuur 19: De buiging van de trechter die wij gebruiken, het nuttige domein voor ons is: $l \in [0,58]$

Op deze manier is de vorm van de trechter vastgelegd. De trechter bestaat uit twee onderdelen: de skeletstructuur en de binnenwanden. De skeletstructuur bestaat uit 3 opeenvolgende vierkante kaders. In de opening van de kaders zijn langs alle zijden drie latjes met een gebogen vorm bevestigd. Dus twaalf latjes in totaal. Deze vormt de stevigheid van de trechter en de basis voor de binnenwanden. De skeletstructuur is weergegeven in figuur 20. In deze structuur worden vervolgens vier platen van 3mm MDF een voor een op elke zijde gebogen en gelijmd. Om de platen mee buigbaar te maken werden ze eerst bevochtigd met warm water. Hierna worden ze in de structuur gelegd en met gewichten (verspreid over de oppervlakte) in

de juiste vorm gebogen tot het hout is opgedroogd. Nu wordt het hout aan de structuur vastgelijmd. Dit gebeurt vier keer, een keer voor elke zijde. Het plaatsen van de binnenwanden en het gebruik maken van gewichten is weergegeven in figuur 21. Alle MDF-platen zijn uitgesneden in het FabLab van de Katholieke universiteit Leuven.



Figuur 20: de skeletstructuur



Figuur 21: De binnenwanden die geplooid worden door gewichtjes

De afgewerkte trechter is afgebeeld in figuur 22.



Figuur 22: de afgewerkte trechter

2.1.4 De testsectie

De testsectie is waar het allemaal om draait. Hierin wordt de hoogste luchtsnelheid bereikt en gebeuren dus ook de proeven. We streefden naar een testsectie van 20 x 20 cm. Omdat we aanpassingen hebben moeten doen meet onze testsectie nu 19,0 x 18,0 cm en is deze 58,0 cm lang. De lengte van de windtunnel is beperkt door de maximumlengte van de MDF platen, plus een ruime snijmarge. De wanden zijn van 9mm MDF gemaakt, uitgesneden in het Fablab. We hebben in de eerste helft, de voorkant en bovenkant van de testsectie, de MDF vervangen

door 2mm plexiglas. Hiermee kunnen we, zoals bij vele windtunnels van dit formaat, binnenkijken en luchtstroom visualiseren. Ook hebben we in het midden van het zichtbare deel van de testsectie een gat van 10 mm in de bodem. Hiermee kan testapparatuur gebruikt worden en kunnen er vliegtuigvleugels direct verbonden worden aan een externe balans. Een afbeelding van de testsectie is gegeven in figuur 23.

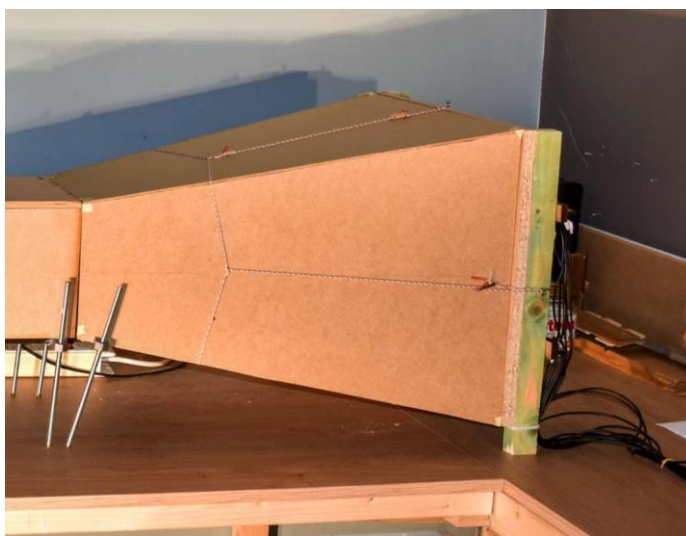
Om accurate resultaten te behouden mag het testvoorwerp in de testsectie de luchtstroming niet te veel te verhinderen. Hierbij is de regel: De oppervlakte van de dwarsdoorsnede van het testvoorwerp mag niet groter zijn dan 10% van de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van de testsectie [28].



Figuur 23: De afgewerkte testsectie

2.1.5 Diffuser

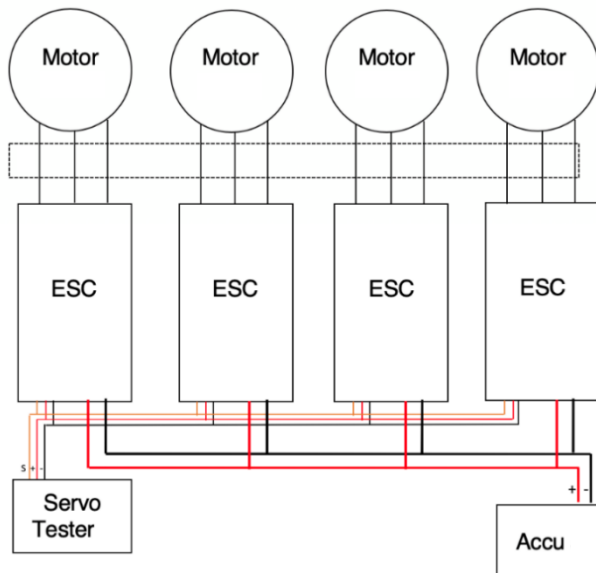
Om hogere snelheden te behalen in de testsectie zelf hebben we tussen de testsectie en de ventilatoren een diffuser geplaatst. Ook de diffuser heeft een trechtervorm opgebouwd uit 3 mm MDF platen aan elkaar gelijmd. Door de trechtervorm heeft de testsectie een kleinere doorsnede dan de diffuser en is de luchtdruk in de testsectie lager dan de luchtdruk in de diffuser, zie wet van Bernoulli. Hierdoor is de snelheid in de testsectie hoger dan de snelheid in de diffuser. Het voordeel van deze vorm is dat we de ventilatoren op een lagere snelheid (rpm) kunnen laten draaien, en dus ook minder last uitoefenen op het hele elektronische circuit. Een afbeelding van de diffuser is weergegeven in figuur 24.



Figuur 24: De diffuser

2.1.6 Ventilatoren

Voor een evenredige verdeling van de luchtaanzuiging hebben we voor vier ventilatoren gekozen. De 4 ventilatoren bestaan elk uit een propeller dat aangedreven is door een motor. Een schematische weergave van de elektronische aansturing van de motoren is weergegeven in figuur 25 en een foto van alle onderdelen van de ventilatoren is weergegeven in figuur 26.



Figuur 25. Schematisch overzicht van de elektronische aansturing van de motoren



Figuur 26: Alle onderdelen van de ventilatoren.

De ventilatoren zijn opgebouwd uit een aantal verschillende onderdelen met specifieke eisen:

1. We hebben gekozen voor propellers met 3 bladen. Zo is de luchtafvoer beter verdeeld over het oppervlak van alle ventilatoren samen. De diameter van deze propellers is gekozen in functie van de grootte van de diffuser-opening.
2. Als motor maken we gebruik van vier borstel loze motoren van het type "Racerstar BR2212 1400KV 2-4S Brushless Motor For RC-models". (zie tabel 1)
3. Op elke motor wordt een elektronische snelheidsregelaar geplaatst, ook wel ESC genoemd (Electronic Speed Controller). Deze zorgt dat de toeren per minuut (rpm) constant blijft.
4. De bedrading gebruikt tussen de motoren en de ESC's zijn 1.5 mm (diameter) met een flexibele pvc-behuizing
5. De accu die gebruikt wordt om de motoren aan te drijven is een LiPo (lithium-ion-poly-meer-accu) 6000mAh, 7.4V, 60C.
6. Een servo tester is nodig om de goede werking van ventilatoren te garanderen. Ze geven een signaal aan de ESC, zodat de ESC's weten hoeveel stroom ze moeten geven van de batterij naar de motoren.

Tabel 1 toont de specificaties bij spanning 11,1 V van de propellers die we aangekocht hebben via 'banggood.com website'. Wij hebben echter een spanning gebruikt van 7,4 V.

Model	Spanning (V)	Stroomsterkte (A)	Pull (g)	Vermogen (W)	Efficiëntie (g/w)
BR2212 1400KV	11.1	19.0	910	210	4.3

Tabel 1: Specificaties motoren

In tabel 2 vind je vervolgens een samenvatting van de onderdelen van de ventilatoren.

Onderdeel	Beschrijving	Specificaties
1.	Propeller	Diameter: 17.8 cm, 3 blad, plastic.
2.	Motor	ingangsspanning = 7.4-14.8V, 210W.
3.	Draden	Diameter: 1.5 mm, flexibel PVC.
4.	ESC	$I_{max} = 30 \text{ A}$.
5.	Accu	Li-ion polymeer batterij, 6000mAh, $I_{max} = 360\text{A}$, $U = 7.4\text{V}$ (2 cel).
6.	Servo tester	Input: $U = 4.2\text{-}6.0\text{V}$.

Tabel 2: Onderdelen van de ventilatoren

De propellers worden geplaatst in een gelamineerde OSB-plaat van 430 x 430 mm en 15 mm dik waarin 4 gaten zijn uitgesneden van 185,0 mm in diameter. Deze gaten zijn uitgesneden met een freesmachine volgens het patroon weergegeven in figuur 27. De ventilatoren zijn vervolgens aan elkaar gesoldeerd.

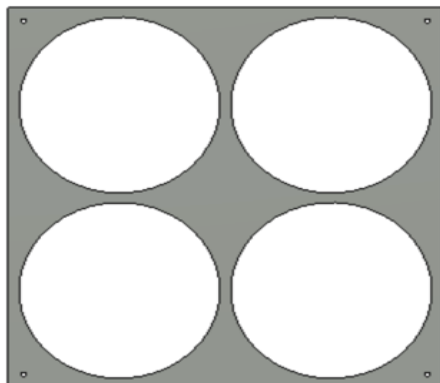


Figure 27: Het patroon waarin de gaten zijn uitgesneden.

Deze plaat waarin de propellers bevestigd zijn, wordt gekoppeld aan de diffuser met een gespannen touw zoals ook te zien is in figuur 24.

Samengevat worden de eisen van de verschillende secties van een windtunnel weergegeven in tabel 3. [18]

Onderdeel	Beschrijving	
1.	Honinggraat	$A = 43.5 \text{ cm} \times 43.5 \text{ cm}$, $0.6 \times 6.0 \text{ cm}$
2.	Schermen	64% open, 138M
3.	Trechter	$CV = 5.09$
4.	Testsectie	$A = 19.0 \text{ cm} \times 18.0 \text{ cm}$, $L=58.0 \text{ cm}$
5.	Diffuser	$\alpha = \pm 11^\circ$
6.	Ventilator (motoren + propellers + elektrisch circuit)	4x 210W max, 17.8 cm 3 blad

Tabel 3: vereisten van de onderdelen van een windtunnel

2.2 Montage van de windtunnel

De trechter, de testsectie en de diffuser met de propellers worden vervolgens tegen elkaar gezet en om de hele structuur te ondersteunen hebben we gebruik gemaakt van een systeem met verstelbare staanders. Deze zijn gemaakt van een draadstang en een bout. De bout wordt vastgehouden door een 3D-geprint onderdeel en bevestigd aan de verschillende delen van de windtunnel. De draadstang werd hieronder bevestigd. Door te draaien aan de draadstang verstelt het zich in hoogte. Een foto van de windtunnel met de poten is weergegeven in figuur 28.



Figure 28: De poten onder de windtunnel

2.3 Materialen voor de bouw van de windtunnel

- Voor het ontwerp hebben we gebruik gemaakt van een 3D-softwareprogramma 'Fusion 360 (educational licence)'
- Voor de trechter wand, de diffuser, frame van de honinggraat en de tussenstukken voor het muggengaas hebben we 3mm MDF (Brico) gebruikt. Deze panelen zijn telkens met een pendelzaag gesneden. MDF is een zacht en licht hout waarmee gemakkelijk gewerkt kan worden.
- Voor de trechter skeletstructuur hebben we ook 3mm MDF van het FabLab in Leuven gebruikt. We hebben deze ook gesneden in het FabLab met hun lasersnijders.
- Voor een deel van de testsectie is 9mm MDF gebruikt. Zo hangen de zijden beter aan elkaar vast, zonder dat we externe ondersteuning moeten gebruiken.
- Het doorzichtbare deel van de testsectie is gemaakt van 2mm plexiglas. Dit is ook gekocht in het FabLab en ook daar gesneden met hun lasersnijders.
- De propellerstructuur is uitgesneden uit een gelamineerde OSB-plaat van 430 x 430 mm en 15mm dik.
- De honinggraatstructuur is voornamelijk gemaakt van plastic rietjes. Deze worden aan elkaar vastgelijmd met knutsellijm en een kader van 3mm MDF wordt rond alle rietjes geplaatst.
- Het muggengaas is gemaakt van nylondraad zodanig gewoven dat er een hexagonaal muggengaas ontstaat.

2.3.1 Extra productiemachines

Om de bovenvermelde onderdelen te maken zijn verschillende machines en gereedschap gebruikt. Hieronder volgt wat meer technische informatie.

1. De lasersnijder die we gebruiken hebben staat in het fablab is van het merk Trotec Speedy 100R met volgende specificaties (610 x 305 mm werkruimte, 132 mm maximum materiaaldikte, 10-120 Watt laser)
2. De gebruikte freesmachine is zelf ontworpen en gemaakt met inspiratie gehaald van de DIY 3D Printed Dremel CNC” van Nikodem Bartnik. [33]. Deze freesmachine had volgende specificaties
 - 470 x 440 mm werkruimte
 - 80 mm materiaaldikte (wel gelimiteerd tot lengte boorkop).
 - 17 mm platkoppige dubbele fluit spiraal boorkop.
 - Multitool: *Dremel 4000*.
3. De 3D-printer (Prusa i3 MK2/S) is gebruikt om de vliegtuigvleugel en de bouten van de staanders uit te printen.
 - Cartesiaanse printer
 - 250 x 210 x 200 mm printvolume (XYZ).
 - 1.75mm PLA-plastic.
4. De multi-tool (Dremel 4000, 5000-35000 rpm en 175W): Deze is gebruikt om kleine dingen af te snijden en de details te bewerken. Zo stak er bij de trechter ergens een beetje materiaal uit en hebben we dit snel kunnen corrigeren met de multitool. Deze is ook gemonteerd op de freesmachine om de propellerstructuur uit te snijden.
5. Als rookmachine werd de magnum 800 gebruikt van het merk Martin.

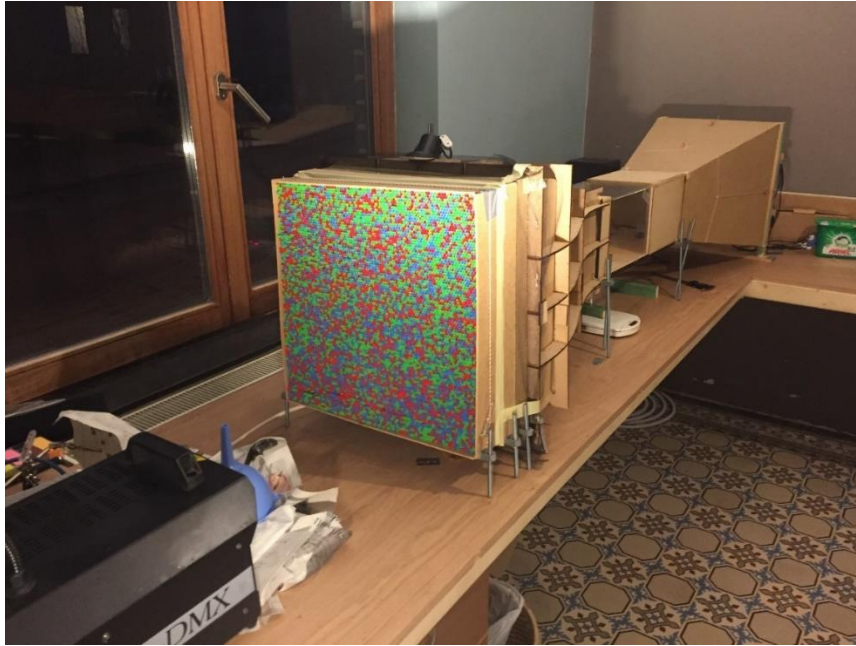
3 Praktische proef

3.1 Ontwerp van de windtunnel

Bij het ontwerp van de windtunnel zijn we door twee verschillende versies gegaan. De eerste versie is gemaakt voor we een bezoek brachten aan BikeValley. Bij ons bezoek vernamen we van Harm Ubens dat we rekening moesten houden met bepaalde elementen die voor het ontwerp van de windtunnel belangrijk waren [38]:

1. Harm Ubens van BikeValley vertelde ons dat de hoeken tussen de trechter en de testsectie niet te scherp mochten zijn. Bij een te scherpe hoek zal de stroom zich afscheiden van de wand en zo grote drukverschillen genereren in de testsectie.
2. Om een laminaire stroming te creëren moet de lichtsnelheid zo laag mogelijk zijn. Als dit gebeurt net voor de testsectie is de lichtsnelheid hoger dan net voor de diffusor. Hoe lager de snelheid in de honinggraatstructuur, hoe meer laminair de stroming is.
3. Het is aangewezen om gebruik te maken van 4 minder krachtige ventilatoren ten opzichte van gebruik te maken van één ventilator, die alle lucht zou aanzuigen. Bovendien moet de diffuser een trechtersvorm hebben zodat de ventilatoren minder hard moeten draaien.
4. De aanwezigheid van schermen zijn essentieel om de axiale turbulentie te verminderen. [30]

Zo zijn we gekomen tot het uitwerken van een tweede en definitieve versie. We hebben scherpe hoeken vermeden, schermen geïnstalleerd en de honinggraatstructuur voor de trechter geplaatst. Ook hebben we meerdere ventilatoren gebruikt. De volledige opstelling van de windtunnel is weergegeven in figuur 29



Figuur 29: De algemene opstelling van de windtunnel

3.2 Zichtbaar maken van laminaire stroom

Eens dat de windtunnel geassembleerd is, konden we beginnen aan ons experimenteel deel. Belangrijk hierbij is dat we de luchtstroming die we genereerden in de windtunnel konden visualiseren. Hierbij werd er gebruik gemaakt van een rookmachine die net voor de trechter geplaatst werd zoals weergegeven in figuur 29. Bij maximale snelheid van de ventilatoren konden we laminaire stroming aantonen zoals weergegeven in figuur 30, 31 en 32. Hierbij werden steeds andere vormen in de testsectie geplaatst.



Figure 30: stroming bij een bus



Figure 31: Stroming bij een oldtimer



Figure 32: stroming bij een racewagen

3.3 Bepalen van de lichtsnelheid

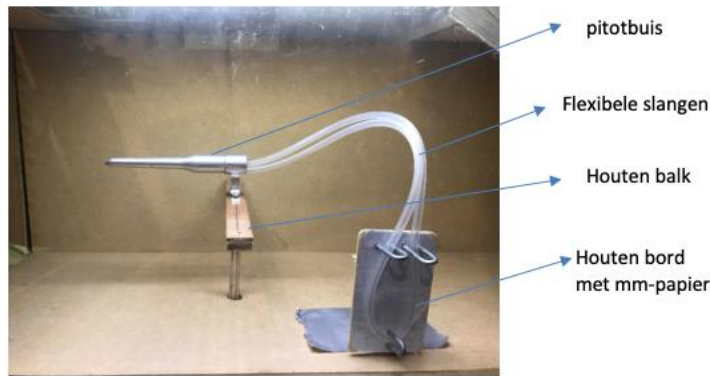
3.3.1 Onderdelen van de proefopstelling bij bepaling van de lichtsnelheid

Voor de bepaling van de lichtsnelheid zijn volgende materialen gebruikt:

- pitotbuis (PT60 tube air speed meter sensor kit differential for pixhawk APM PX4 flight)
- houten balk om pitotbuis met bouten te hechten
- gin met 40 V% alcohol
- 2 flexibele doorzichtige slangen
- U-vormige ijzeren krammen
- Houten bord met daarop mm-papier gekleefd

Om de lichtsnelheid te bepalen werd de pitotbuis op een houten balk gegeven en verbonden met flexibele slangen gevuld met gin (40 V% alcohol). De slangen worden in een U-vorm met ijzeren krammen vastgemaakt aan een plaatje waarop mm-papier gekleefd is. De ventilatoren worden in verschillende snelheidsstanden gezet en het hoogteverschil van de vloeistof wordt afgelezen via het mm-papier.

Een afbeelding van de volledige opstelling wordt weergegeven in figuur 33.



Figuur 33: Afbeelding van de opstelling van de pitotbuis in de testsectie

We hebben bij de meting van de luchtsnelheid moeten gebruik maken van een 40% alcohol-oplossing omdat er geen metingen konden gedaan worden met water. De cohesie tussen water en de slang was namelijk te groot om een verplaatsing van de waterkolom te verkrijgen.

Om de snelheid te berekenen werd er gebruik gemaakt van volgende formule:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta h \cdot \rho_{\text{gin}} \cdot g}{\rho_{\text{lucht}}}}$$

waarbij:

Δh =hoogteverschil

$\rho_{\text{vloeistof}}$ = dichtheid van vloeistof (930 kg/m³)

g = valversnelling (9,81 m/s²)

ρ_{lucht} = dichtheid van lucht bij 15°C (1,225 kg/m³)

Om de snelheid te meten op verschillende plaatsen in de testsectie wordt de pitotbuis ook verplaatst naar verschillende punten in de dwarsdoorsnede van de testsectie.

3.3.2 Meting van de luchtsnelheid bij maximale stand van de ventilator

De snelheid van de lucht werd bepaald bij de hoogste stand van de ventilator en op verschillende locaties in de testsectie van de windtunnel.

Zoals schematisch weergegeven in Tabel 4 werd de windtunnel denkbeeldig opgedeeld in negen gelijke delen. Telkens werd de pitotbuis geplaatst in het midden van een deel van deze denkbeeldige sectie en op elke locatie werd een meting gedaan. De resultaten van deze metingen worden weergegeven in Tabel 5.

Hoogte/breedte	Links	Midden	Rechts
Boven	9	3	6
Midden	8	2	5
Onder	7	1	4

Tabel 4: Plaats van de pitotbuis in de testsectie

Op de negen verschillende plaatsen in de meetsectie was de gemeten luchtsnelheid erg analoog. De luchtsnelheid lag tussen de 33 en 35 km/u. Hieruit kunnen we besluiten dat de luchtstroming homogeen verdeeld is in de dwarsdoorsnede van de testsectie.

Positie	Δh (mm)	v (in m/s)	v (in km/u)
1	5.5	9.1	33
2	5.6	9.1	33
3	5.2	8.8	32
4	6.1	9.5	33
5	6.0	9.5	34
6	6.1	9.5	34
7	6.2	9.6	35
8	5.6	9.1	33
9	5.8	9.3	34
Gemiddelde		9.3	33

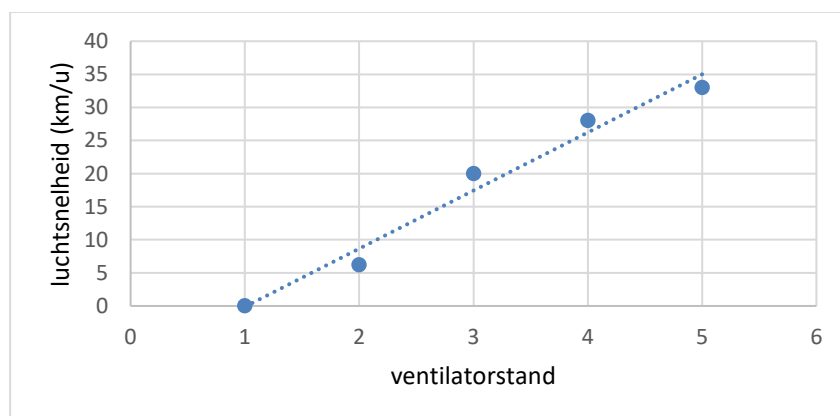
Tabel 5: Bepaling van homogeniteit bij maximale ventilatorstand

3.3.3 Meting van de lichtsnelheid bij vooraf bepaalde instellingen

Vervolgens werd de lichtsnelheid bij vaste instellingen van de ventilator gemeten telkens in het centrum van de windtunnel (positie 2 in tabel 4). De resultaten worden weergegeven in Tabel 6. We kunnen een lineair verband aantonen tussen de lichtsnelheid en de ventilatorstand zoals weergegeven in figuur 34.

ventilator-stand	Δh (in mm)	v (in m/s)	v (in km/u)
1	0.0	0.0	0.0
2	0.2	1.7	6.2
3	2.0	5.5	20
4	4.0	7.7	28
5	5.7	9.2	33

Tabel 6: Bepaling lichtsnelheid bij verschillende ventilatorstanden



Figuur 14: relatie lichtsnelheid ten opzichte van de ventilatorstand

3.4 Bepaling van de lift van een vleugel bij verschillende invalshoeken

3.4.1 Werkwijze voor de meting van de lift op een vleugel

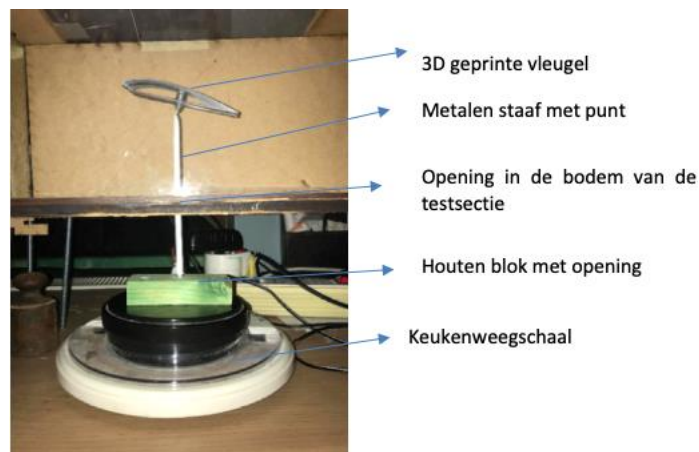
Voor het aantonen van de lift van een vleugel werden volgende materialen gebruikt:

- Keukenweegschaal (Brabantia max 3kg/1g)
- Houten blok met opening
- Metalen staaf met plooibare punt
- 3D geprinte vliegtuigvleugel (NACA 4412) (airfoiltools)
- Opening in de bodem van de testsectie van de windtunnel 10mm

Voor de meting van de lift van de vleugel wordt de 3D-geprinte vleugel op de punt van een metalen staaf geplaatst. De metalen staaf gaat dan in de opening van de bodem van de testsectie. Een keukenweegschaal wordt onder de testsectie van de windtunnel geplaatst. In een houten blok wordt een opening geboord en deze wordt op de weegschaal geplaatst. De weegschaal wordt op nul getarreed. De metalen staaf met de vleugel wordt in de geboorde opening geplaatst. De beginmassa van de vleugel wordt afgelezen. Dan worden de ventilatoren gestart aan een specifieke snelheid. De massa wordt nu opnieuw afgelezen. Dit wordt herhaald bij verschillende invalshoeken van de vleugel. Het massaverschil tussen de beginwaarde en de eindwaarde wordt vervolgens in een kracht omgerekend ($F = \Delta m \cdot g$).

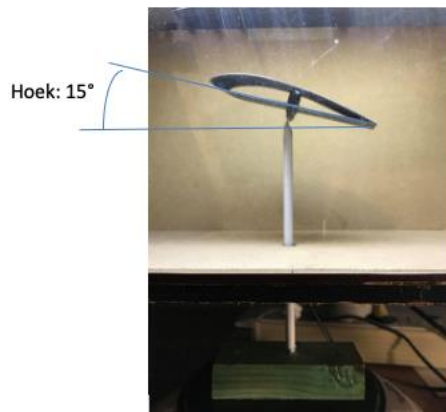
Om te voorkomen dat het houten blokje loskomt van de weegschaal (en zo incorrecte waarden gemeten worden) werd het bij hoge lichtsnelheden met kleefband vastgehecht aan de weegschaal.

Een afbeelding van de opstelling van de vleugel in de testsectie wordt weergegeven in figuur 35



Figuur 35: De opstelling van de vleugel in de testsectie

De vleugel werd steeds onder een bepaalde invalshoek geplaatst. De invalshoek werd gemeten zoals weergegeven op figuur 36. Een foto werd genomen van de vleugel onder een bepaalde hoek en met een geodriehoek werd de hoek bepaald t.o.v. het grondvlak.



Figuur 36: Meting van de invalshoek van de vleugel

3.4.2 Bepaling van de liftkracht en liftcoëfficiënt in functie van de invalshoek

Bij de maximale lichtsnelheid van 33 km/u werd de lift op de vleugel bepaald bij invalshoeken in het gebied van 0° en 60°. De resultaten worden weergegeven in tabel 7

invalshoek (°)	m (g)	Δm (g)	F lift (mN)	C_{lift}
-60	74	-12	-12.10	-0.52
-50	79	-8	-78	-0.35
-40	80	-16	-16.10	-0.69
-30	78	-17	-17.10	-0.74
-20	69	-8	-78	-0.35
-10	69	-6	-59	-0.26
0	49	2	20	0.09
10	46	9	88	0.39
20	33	20	20.10	0.87
30	32	31	30.10	1.3
40	34	30	30.10	1.3
50	30	25	25.10	1.1
60	45	10	98	0.43

Tabel 7: Bepaling van lift bij verschillende invalshoeken

In figuur 37 werd de liftkracht uitgezet in functie van verschillende invalshoeken (blauwe curve). We stellen vast dat deze toeneemt tot een kritische hoek van 30° waarna de liftkracht opnieuw daalt. De kritische invalshoek ligt bij onze vleugel hoger dan deze beschreven in de literatuur. Men beschrijft dat een vleugel zijn liftkracht verliest bij een hoek van 15° à 20° [11]. Dus bij onze experimenten ligt deze 10° hoger. Deze variatie is mogelijk te verklaren door een andere manier van het meten van de invalshoek. Bij negatieve hoeken merken we dat de massa van de vleugel toeneemt en dat dus de vleugel tegen de bodem geduwd wordt.

Uit de experimenten kan eveneens de liftcoëfficiënt bepaald worden door gebruik te maken van de formule van de wet van Bernoulli:

$$C_{Lift}(\alpha) = \frac{2 \cdot F_{Lift}}{\rho_{Lucht} \cdot v^2 \cdot S}$$

met:

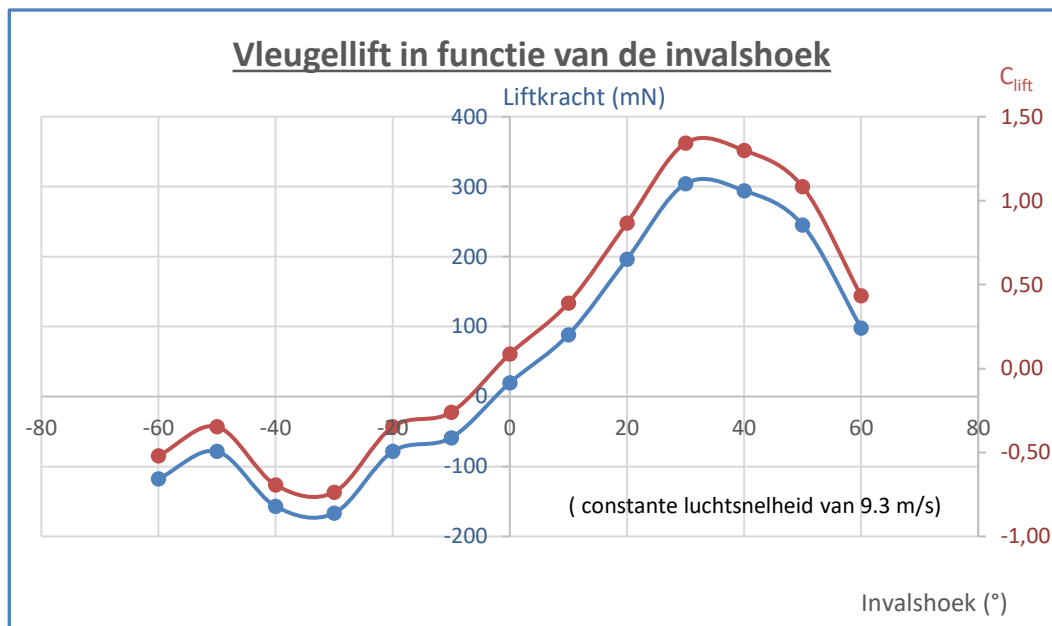
ρ de dichtheid van lucht (1,225 kg/m³)

v de luchtsnelheid (9,3 m/s)

S de oppervlakte van de vleugel (43 cm² = 43 · 10⁻⁴ m²)

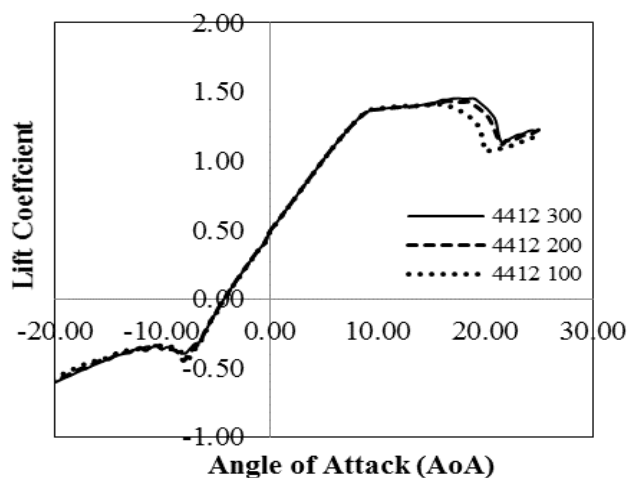
C_L de liftcoëfficiënt ten opzichte van de invalshoek α

Vervolgens werd ook de liftcoëfficiënt uitgezet in functie van de invalshoek in figuur 37 (rode curve).



Figuur 37: Vleugellift in functie van de invalshoek

De bekomen liftcoëfficiënten komen qua grootteorde goed overeen met wat in de literatuur vermeld wordt voor een vleugel van dit type (NACA 4412) (zie figuur 38) [20]



Figuur 38: Berekende en experimentele liftcoëfficiënt in functie van de invalshoek [20]

3.4.3 Liftkracht en Lift coëfficiënt in functie van de luchtsnelheid

Bij verschillende luchtsnelheden van tabel 6 werd de liftkracht op de vleugel experimenteel bepaald bij een constante invalshoek van 30°. Daarnaast werd ook de theoretische liftkracht berekend gebruik makend van volgende formule:

$$F_{Lift} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{Lucht} \cdot v^2 \cdot S \cdot C_L(\alpha)$$

Waarbij::

ρ de dichtheid van lucht bij 15°C (1,225 kg/m³)

v de luchtsnelheid (m/s)

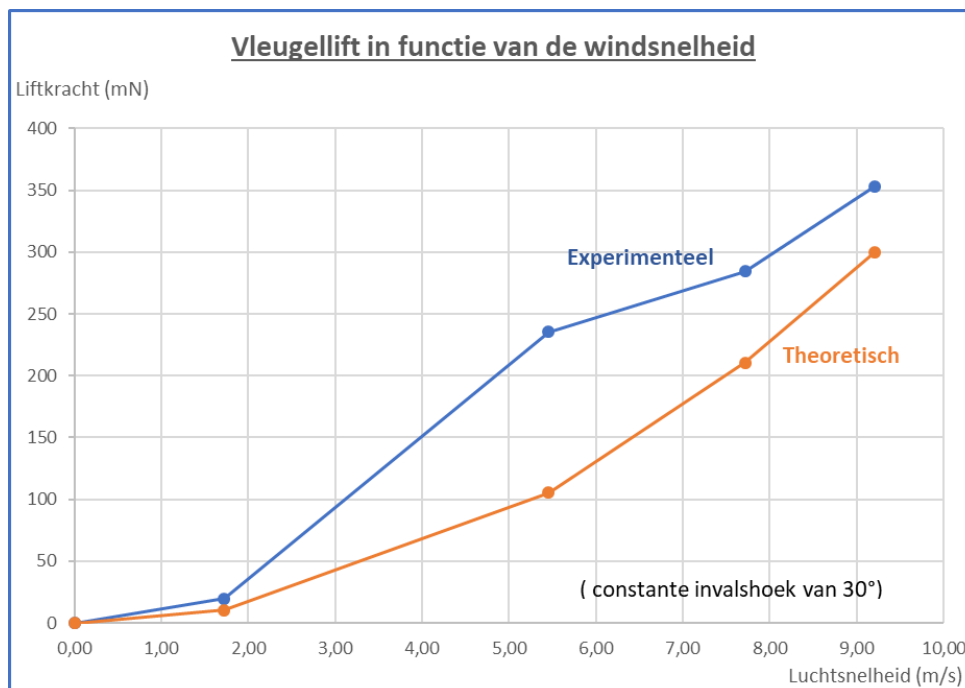
S de oppervlakte van de vleugel (43.10⁻⁴ m²)

C_L de liftcoëfficiënt ten opzichte van de invalshoek α van 30° is 1,3 (zie tabel 7)

De experimentele ($\Delta m \cdot g$) en de theoretische resultaten worden weergegeven in tabel 8 en uitgezet in figuur 39. Voor onze vleugel bedragen de experimentele waarden $C_{lift} = 1,34$ bij 30° invalshoek en is de oppervlakte van de vleugel 43 cm².

v(m/s)	Δm (g)	F lift (mN) (exp)	F lift (mN) (theor)
0.00	0	0	0
1.7	2	20	11
5.5	24	24.10	11.10
7.7	29	28.10	21.10
9.2	36	35.10	30.10

Tabel 8: Bepaling van lift met verschillende luchtsnelheden.



Figuur39: Vleugellift in functie van de windsnelheid

Als we de theoretische curve die een kwadratisch verloop vertoont, vergelijken met de experimentele curve, dan merken we dat de experimentele curve een gelijkaardig verloop vertoont buiten één afwijkend punt bij 5,5 m/s. De reden voor deze afwijking kan zijn door een onnauwkeurige meting van de massa van de vleugel bij die snelheid.

4 Algemeen besluit

Een windtunnel is een toestel waarmee een wetenschapper de luchtstroming op een voorwerp en de bijkomende krachten op het voorwerp kan onderzoeken. Oorspronkelijk werd een windtunnel gebruikt om de aerodynamische eigenschappen van een vliegtuig te bestuderen. Momenteel wordt een windtunnel gebruikt in heel wat disciplines zoals de autoindustrie, architectuur, sport, ...

In dit onderzoekswerk hebben we een open windtunnel gebouwd waarin we een laminaire stroom hebben kunnen generen. Een windtunnel bestaat steeds uit een trechter, een testsectie en een diffuser waarin ventilatoren aanwezig zijn. Om laminaire stroom te verkrijgen moet de trechter waarin de lucht gezogen wordt voldoen aan een aantal voorwaarden. Er moet een honinggraat aanwezig zijn die bestaat uit een heleboel kanalen (in ons geval rietjes van 6 cm) die dezelfde richting uitwijzen als de luchtstroom. Daarnaast zijn er ook schermen nodig om de grote drukverschillen op te vangen. Deze zijn gemaakt van nylandraad gewoven in een muggengaas. In de testsectie wordt de hoogste luchtsnelheid bereikt en daarin gebeuren ook de experimenten. Vervolgens is er een diffuser. Ook deze is gemaakt in de vorm van een trechter waarin 4 ventilatoren geplaatst worden.

Om de laminaire stroom zichtbaar te maken hebben we gebruik gemaakt van een rookmachine. Deze rookmachine werd voor de trechter geplaatst zodat de rook in de windtunnel gezogen werd. De luchtstroming hebben we zo kunnen visualiseren rond een bus, een oldtimer en een racewagen. Via verschillende standen van de ventilatoren werden er verschillende windsnelheden verkregen die we konden meten via een pitotbuis. Een maximale windsnelheid van 33 km/u werd zo gemeten. Vervolgens is er een vliegtuigvleugel van model NACA 4412 via een 3D-printer uitgeprint. Deze vleugel werd als testvleugel gebruikt om lift op de vleugel aan te tonen. De liftkracht op een vleugel werd bepaald bij verschillende invalshoeken. Zo konden we aantonen dat de liftkracht toeneemt tot een kritische hoek van 30° waarna de liftkracht opnieuw daalt. Deze kritische hoek is in onze experimenten hoger dan de 15° hoek die we konden terugvinden in de literatuur. Bijkomend werd de liftcoëfficiënt berekend bij verschillende invalshoeken. Deze liftcoëfficiënten stemmen goed overeen met de liftcoëfficiënten die we konden terugvinden in de literatuur voor dit vleugeltype. Als laatste experiment konden we een kwadratisch verband aantonen tussen de liftkracht op de vleugel en de windsnelheid.

5 Literatuurlijst

- 1) ABUNAN, B., *XFoil predicted lift coefficient for NACA 4412 versus experimental data*, internet, (9 februari 2020), (https://www.researchgate.net/figure/XFoil-predicted-lift-coefficient-for-NACA-4412-versus-experimental-data_fig1_309731963).
- 2) AIRFOILTOOLS, NACA 4412 airfoil, internet, (z.d.), (<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca4412-il>)
- 3) ANONIEM, Life (force), internet, Wikipedia, 29 January 2020, ([https://en.wikipedia.org/wiki/Lift_\(force\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Lift_(force)))
- 4) ANONIEM, *aerodynamica*, internet, Wikipedia, (21 november 2019), (http://www.woordenlijst.eu/betekenis_aerodynamisch.htm).
- 5) ANONIEM, *Closed return wind tunnel*, internet, (januari 2020), (<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tuncret.html>).
- 6) ANONIEM, *Coandă effect*, internet, Wikipedia, 21 December 2019, (https://en.wikipedia.org/wiki/Coand%C4%83_effect) (figuur 5).
- 7) ANONIEM, *Daniel Bernoulli*, internet, Wikipedia, (15 januari 2020), (https://en.wikipedia.org/wiki/Daniel_Bernoulli).
- 8) ANONIEM, *Het flowprofiel*, internet, (2020), (<https://www.flowmeters.nl/relevantezaken/flowprofiel>).
- 9) ANONIEM, *Laminaire stroming*, internet, *Wikipedia*, 12 november 2019 (https://nl.wikipedia.org/wiki/Laminaire_stroming).
- 10) ANONIEM, *Open return wind tunnel*, internet, (januari 2020), (<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunoret.html>).
- 11) ANONIEM, *Overtrek*, Internet, Wikipedia, 9 september 2019, (<https://nl.wikipedia.org/wiki/Overtrek>)
- 12) ANONIEM, *Propeller*, internet, *Wikipedia*, 12 December 2019, (<https://nl.wikipedia.org/wiki/Propeller>).
- 13) ANONIEM, *Straalmotor*, internet, *Wikipedia*, 2 februari 2020, (<https://nl.wikipedia.org/wiki/Straalmotor>).
- 14) ANONIEM, *Turbulente stroming*, internet, *Wikipedia*, 12 november 2019, (https://nl.wikipedia.org/wiki/Turbulente_stroming).
- 15) ANONIEM, *Vleugel (vliegtuig)*, internet, *Wikipedia*, 11 mei 2019, ([https://nl.wikipedia.org/wiki/Vleugel_\(vliegtuig\)](https://nl.wikipedia.org/wiki/Vleugel_(vliegtuig)))
- 16) ANONIEM, *Wet van Bernoulli*, niet-gepubliceerd eindwerk, 17blz.
- 17) ANONIEM, *Who invented the wind tunnel*, internet, (6 februari 2020). (https://www.centennialofflight.net/wbh/wr_experience/tunnel/testing/ED.htm).
- 18) CELIS, B. en UBBENS, H., *Design and construction of an open-circuit wind tunnel with specific measurement equipment for cycling*, niet-gepubliceerd eindwerk, Flanders Bike Valley, Paal-Beringen, 2016, 5blz.
- 19) CONVENT, MARC-ANTOINE, *Vliegen, kunst of fysica?*, internet, (onbekend), (<http://users.telenet.be/aerodynamica/>).
- 20) Danao, L., Abuan, E., Howell, R., *Design analysis of a horizontal axis tidal turbine*, Conference: Asian Wave and Tidal Conference, 2016
- 21) DREAMTIME, *Airplane wing*, internet, (z.d.), (<https://www.dreamstime.com/stock-illustration-airplane-wing-cross-section-body-lifting-forces-image48039697>)
- 22) EDITOR AEROLAB, *Closed Circuit Wind Tunnels*, internet, (onbekend), (<https://www.aerolab.com/products/closed-circuit-wind-tunnels/>).

- 23) EDITOR AEROLAB, *Open Circuit Wind Tunnels*, internet, (onbekend), (<https://www.aerolab.com/products/open-circuit-wind-tunnels/>).
- 24) EDITOR BOEGER, *How to Calculate Perforated Metal Sheet Open Area?*, internet, (onbekend), (<https://www.perforated-sheet.com/calculation/how-to-calculate-open-area.html>).
- 25) FOTOR, *Het getal van Reynolds*, internet, (10 september 2010), (<https://www.modelbouwforum.nl/threads/het-getal-van-reynolds.118439/>).
- 26) HALL, N, NASA Incorrect Theory, internet, (05 April 2018), (<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/wrong1.html>).
- 27) HALL, N, NASA Open Return Wind Tunnel , internet, (mei 05 2015), (<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunoret.html>).
- 28) HERNANDEZ, G. en LOPEZ, M., *Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel*, niet-gepubliceerd eindwerk, 2013, 22blz.
- 29) KEES, *Pitot-buis lucht- en scheepvaart*, internet, 19 november 2018, (<http://zienenweten.blogspot.com/2018/11/pitot-buis-lucht-en-scheepvaart.html>).
- 30) LAKSHMAN, R. en BASAK, R., Analysis of transformed fifth order polynomial curve for the contraction of wind tunnel by using OpenFOAM, niet-gepubliceerd eindwerk, National Institute of Technology Sikkim Ravangla Mechanical Engineering, South Sikkim, 2018, 6blz.
- 31) Lindgren, B; Johansson, A.V., Evaluation of de flow quality in the MTL Wind-Tunnel, 2002, Technical reports from royal institute of technology department of mechanics, Stockholm, Sweden.
- 32) Lindner, B., *De wetten van de vliegekunst*, internet, (onbekend), (<https://www.natuurkunde.nl/artikelen/1762/de-wetten-van-de-vliegekunst>).
- 33) NIKUS, *DIY 3D Printed Dremel CNC*, internet, (onbekend), (<https://www.instructables.com/id/DIY-3D-Printed-Dremel-CNC/>).
- 34) NTR, (reg.), Wie was Daniel Bernoulli, video, Schooltv, Nederland, 2014.
- 35) Santos, R., M., an Mesquita, A., L. Development of an open-circuit low-speed wind tunnel, 2015 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering, December 6-11, Rio de Janeiro
- 36) SCHEIMAN, J., *Considerations for the Installation of Honeycomb and Screens To Reduce Wind-Tunnel turbulence*, niet-gepubliceerd eindwerk, Langley Research Center NASA Scientific and Technical Information Branch, Hampton, 1981, 49blz.
- 37) THE EDITORS OF ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, *Osborne Reynolds*, (19 augustus 2019), (<https://www.britannica.com/biography/Osborne-Reynolds>).
- 38) UBBENS, H, (Ingenieur Bike Valley), informeren, Bike Valley, Beringen, 2 oktober 2019.
- 39) VAN DER VEEN, R. en STEL, B., *Hoe vliegt een vliegtuig?*, internet, (onbekend), (<https://www.sciencespace.nl/technologie/artikelen/3900/hoe-vliegt-een-vliegtuig>).

6 Lijst met figuren

Figuur 1: Replica van de eerste windtunnel	9
Figuur 2 : krachten op een vliegtuig	11
Figuur 3: turbulente stroming bij een blok	12
Figuur 4: stromingen langs een druppelvorm	13
Figuur 5: Drukverschillen op een vleugel	13
Figuur 6: Neerwaartse en opwaartse krachten op een vleugel door de stroming van de lucht	14
Figuur 7: Het coanda-effect op een vleugel	14
Figuur 8: De invalshoek	15
Figuur 9: De liftcoëfficiënt in functie van de invalshoek	15
Figuur 10: Stroming op een vleugel bij kleine invalshoek (links) en bij een grote invalshoek (rechts)	15
Figuur 11: De pitotbuis	16
Figuur 12: Schets van een windtunnel	17
Figuur 13: Open windtunnel	18
Figuur 14: een gesloten windtunnel	19
Figuur 15: opbouw van de honinggraat	20
Figuur 16: de afgewerkte honinggraat	20
Figuur 17: De trechter met de schermen gemonteerd	20
Figuur 18: De honinggraatstructuur van het muggengaas	21
Figuur 19: De buiging van de trechter die wij gebruiken, het nuttige domein voor ons is: $l \in [0,58]$	22
Figuur 20: de skeletstructuur	23
Figuur 21: De binnenwanden die geplooid worden door gewichtjes	23
Figuur 22: de afgewerkte trechter	23
Figuur 23: De afgewerkte testsectie	24
Figuur 24: De diffuser	24
Figuur 25: Schematisch overzicht van de elektronische aansturing van de motoren	25
Figuur 26: Alle onderdelen van de ventilatoren met een lat van 30 cm ervoor	26
Figuur 27: Het patroon waarin de gaten zijn uitgesneden	26
Figuur 28: De poten onder de windtunnel	27
Figuur 29: De algemene opstelling van de windtunnel	29
Figuur 30: stroming bij een bus	29
Figuur 31: Stroming bij een oldtimer	30
Figuur 32: stroming bij een racewagen	30
Figuur 33: Afbeelding van de opstelling van de pitotbuis in de testsectie	31
Figuur 34: relatie luchtsnelheid ten opzichte van de ventilatorstand	32
Figuur 35: De opstelling van de vleugel in de testsectie	33
Figuur 36: Meting van de invalshoek van de vleugel	34
Figuur 37: Vleugellift in functie van de invalshoek	35
Figuur 38: Berekende en experimentele liftcoëfficiënt in functie van de invalshoek	35
Figuur 39: Vleugellift in functie van de windsnelheid	36

7 **Lijst met tabellen**

Tabel 1: Specificaties motoren	26
Tabel 2: Onderdelen van de ventilatoren	26
Tabel 3: vereisten van de onderdelen van een windtunnel	26
Tabel 4: Plaats van de pitotbuis in de testsectie	31
Tabel 5: Bepaling van homogeniteit bij maximale ventilatorstand	32
Tabel 6: Bepaling luchtsnelheid bij verschillende ventilatorstanden	32
Tabel 7: Bepaling van lift bij verschillende invalshoeken	34
Tabel 8. Bepaling van lift met verschillende luchtsnelheden.	36