



Vliegend succes: een uitgebreide verkenning van het bouwproces van modelvliegtuigen

01.02.2024

S.J. Bachmann & T. Hartog

N&G, N&T | Informatica, Natuurkunde

Metis Montessori Lyceum | 6v2, 6v3

Mauritskade 58, 1092 AD Amsterdam

Hakan Akkas, Martijn Scalé

Inleiding.....	3
Algemeen over UAV.....	4
Veiligheid	5
De regelgeving rond modelvliegtuigen	5
Onze maatregelen om geen wetten en regels te overtreden	5
Elektronica.....	7
Electronic speed controller	7
Motor	7
Servomotor.....	8
Batterij	9
Flight controller	10
Sensoren.....	10
Kostenplaatje	11
Radiotechniek	12
Flight controller.....	14
Ontwerp	15
Doelstellingen.....	15
Ontwerpkeuzes	16
Romp.....	16
Vleugel	20
Stabilizer	21
Materiaalkeuze	22
PLA	22
Carbon Fiber.....	22
Flambard en Depron	23
Ontwerpcyclus.....	24

Eerste testdag	27
Eerste vlucht	27
Tweede vlucht	28
Derde vlucht	28
Tweede testdag.....	30
Eerste vlucht	30
Tweede vlucht	31
Derde vlucht	32
Delen met rest van de wereld	33
Conclusie	34
Nawoord Samuel Bachmann	35
Nawoord Thijs den Hartog.....	35
Dankwoord.....	36
Bronnenlijst.....	37

Inleiding

In hoeverre is het mogelijk om als middelbare scholier zelf een lange afstand modelvliegtuig te ontwerpen en bouwen? Dat is onze hoofdvraag. We kwamen echter niet snel tot dit onderwerp, in eerste instantie hadden we de voorkeur iets met modelraketten te doen. We kwamen er al snel achter dat het te uitgebreid was voor een profielwerkstuk en de wetgeving in Nederland te strikt is. We hadden gelukkig al snel een idee waar we beiden enthousiast van werden, het bouwen van een vliegtuig. Maar ook toen kwam toch al snel het besef, het gaat niet makkelijk worden zelf een vliegtuig te bouwen. Er zijn zoveel dingen die mis kunnen gaan en waarover na moet worden gedacht, maar we waren bereid te kijken hoe ver we konden komen. Wij waren er zelf van overtuigd dat we een modelvliegtuig kunnen maken.

In dit PWS beschrijven we het complete ontwerp en bouwproces van een modelvliegtuig ook wel UAV. We gaan in op het maken van een computer 3D-ontwerp en op de natuurkundige aspecten van een vliegtuig. Hoe weet je bijvoorbeeld of een vleugel genoeg lift produceert? We gaan het hebben over de wetgeving die betrekking heeft op ons project en welke veiligheidsmaatregelen we moeten nemen. Verder gaan we gedetailleerd uiteenzetten welke elektronica nodig is om het vliegtuig goed te laten vliegen en bestuurbaar te maken. Dan kan je denken aan de motor en bijvoorbeeld de flight controller. Als laatste willen we het gaan hebben over hoe de tests zijn verlopen en wat we hiervan hebben geleerd.

Algemeen over UAV

Unmanned Aerial Vehicle ook wel bekend als UAV zijn, zoals de naam zegt, onbemande luchtvoertuigen. UAV's kunnen veel verschillende doelen hebben. Zowel commercieel als militair of als hulpverleners. Al deze doeleinden kunnen ons veel bieden, maar ons tegelijk ook in gevaar brengen. Maar op welke manieren gebeurt dit?

De meest controversiële functie is het gebruik voor militaire doeleinden. Drones kunnen worden uitgerust met wapens. Dit stelt landen in staat om vanaf de andere kant van de wereld in veiligheid aanvallen uit te voeren. Op dit soort oorlogsvoering komt steeds meer kritiek. Er zou een verhoogde kans zijn op burgerslachtoffers en de drempel tot geweld verlagen. (Zwijnenburg, 2022) Toch bezitten steeds meer landen drones en daarmee de mogelijkheid ze in te zetten. In 2014 waren er nog maar acht landen die ze tot hun beschikking hadden, in 2016 waren dat er al 26. (Hofman, 2020) Dat is als zorgwekkend te zien, aangezien er geen internationale verdragen en afspraken zijn die regels voor het gebruik vastleggen.

De militaire doeleinden voor drones overschaduwen in sommige opzichten de positieve dingen die ze ons kunnen bieden. Zo worden drones steeds vaker ingezet voor het bestrijden van bosbranden. (Reese, 2023) De Scan Eagle een voormalig militaire surveillance drone, wordt nu in Oregon ingezet om informatie te verzamelen over bosbranden. Met infrarood sensoren kan snel een brandhaard worden ontdekt. Vervolgens kunnen brandweermannen snel naar de brandhaard komen om het te blussen. (Journal, 2018)

Dit is een van de toepassingen, maar er zijn nog veel meer sectoren waarin drones veel kunnen helpen. Denk bijvoorbeeld aan de landbouw, voor fotografie of voor in de bouw en bij infrastructuurprojecten.

Wij willen aan ons vliegtuig luchtkwaliteit sensoren toevoegen, met behulp van die sensoren kunnen we de CO₂-concentratie in de lucht meten en bijvoorbeeld slechte uitstoot van bedrijven of branden detecteren.

Kortom, er zijn vele mogelijke manieren om drones in te zetten. Vaak wordt er te veel gekeken naar militaire doeleinden, maar ze kunnen ook juist gebruikt worden voor goede dingen om onze veiligheid te waarborgen.

Veiligheid

De regelgeving rond modelvliegtuigen

Het bouwen van een modelvliegtuig is zeer ingewikkeld. En zodra het uiteindelijk lukt moet je kijken waar je een veilige testvlucht kan maken. Binnen de Europese Unie zijn er zeer veel verschillende regels en wetten. Deze wetten zijn gemaakt om de veiligheid van anderen te kunnen waarborgen. De wettelijke betekenis van een modelvliegtuig is een: "luchtvaartuig, niet in staat een mens te dragen, en uitsluitend gebruikt voor luchtvaartvertoning, recreatie of sport;" volgens regeling Modelvliegen (*wetten.nl - Regeling - Regeling Modelvliegen - BWBR0019147, 2021*).

Volgens artikel 1b moet het modelvliegtuig altijd voorrang verlenen aan vliegtuigen, helikopters, zweeftoestellen, vrije ballonnen en andere luchtschepen. Wanneer twee modelvliegtuigen elkaar op dezelfde hoogte kruisen, heeft het luchtvaartuig dat van rechts komt voorrang.

In artikel 2 staan de belangrijkste regels waar we ons aan moeten houden. Het artikel bevat algemene regels zoals dat de bestuurder altijd zicht moet hebben op het luchtvaartuig behalve als er een waarnemer is die zonder hulp visueel contact kan houden met het luchtvaartuig. Het vliegen mag alleen worden gedaan als er daglicht is en het luchtruim goed zichtbaar is. Er mag vanwege veiligheid niet boven: bebouwing, industrie- en havengebieden, boven mensenmenigten, spoorlijnen of verharde openbare wegen worden gevlogen. Volgens het artikel hoeft er geen vliegplan ingediend te worden. Tijdens het vliegen mag het vliegtuig niet boven 120 meter komen, ondanks deze regel is er geen wettelijke hoogtemeter verplicht. Hier gelden uitzonderingen voor.

Er mag niet binnen een plaatselijk luchtverkeersleidingsgebied (CTR) worden gevlogen, dit zijn gebieden rondom luchthavens deze worden beheerd door defensie en LVNL (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2023). Een luchtvaartuig mag volgens het ministerie ook niet meer dan 25 kilogram wegen.

Onze maatregelen om geen wetten en regels te overtreden

De radio-ontvanger die we gebruiken heeft een speciale functie die niet alle ontvangers bezitten. Onze radio-ontvanger kan namelijk de hoogte aangeven waarop het model vliegtuig zich bevindt. Dit zorgt ervoor dat we zo goed mogelijk binnen de regels het modelvliegtuig kunnen besturen.

Het gewicht limiet is geen groot probleem. Het zwaarste onderdeel van ons vliegtuig weegt een halve kilo, dit is de batterij. De rest van de onderdelen zijn relatief licht, de vleugels zijn van schuim gemaakt. De romp bestaat uit: schuim, plastic en carbon. Wij schatten dat het eindgewicht tussen de 1.5 en 2.0 kilogram zal zijn.

Om te zorgen dat wij niet in een CRT vliegen of boven bebouwing of mensen hebben wij gekozen om in een van de vele mooie polders die Nederland bezit te vliegen. Thijs zijn grootouders wonen in De Rijk, een dorpje nabij een polder ten noorden van Amsterdam. Zij zijn goed bevriend met meerdere boeren in de buurt. Wij zijn op 10 december naar De Rijk gegaan om te kijken welk weiland het meest geschikt zou zijn voor onze eerste testvlucht, en dus niet te modderig is. Ook zullen wij bij het vliegen met z'n tweeën aanwezig zijn, zodat wij het vliegtuig goed in de gaten kunnen houden.

Wij hebben voor de tweede testvlucht een andere locatie gezocht zodat de kans dat het vliegtuig in een sloot of ander stuk water belandt kleiner is. Wij hebben hiervoor opnieuw contact opgenomen met verschillende boeren om te vragen of zij een stukje land hadden wat droog was en groot en niet al te dicht bij water. Uiteindelijk hebben wij in de Beemster een weiland kunnen vinden met meer dan genoeg ruimte er om heen en een mogelijkheid de auto te parkeren.



Figuur 1 het landstuk waar wij voor de eerste test vlucht konden vliegen.



Figuur 2 Tweede test locatie

Elektronica

Electronic speed controller

Een Electronic Speed Controller, ook wel bekend als ESC, helpt met de regeling van een borstelloze elektrische motor. Dit wordt gedaan door langzaam de stroomsterkte die door de motor heen gaat te laten stijgen, hierdoor zal de motor sneller beginnen te draaien.

De ESC heeft verschillende specificaties die moeten aansluiten bij de gekozen motor. De voornaamste is de hoeveelheid stroom die de ESC kan doorlaten naar de motor. De motor die we gebruiken heeft maximaal 40A nodig, de ESC kan continu 40A doorlaten en in piek zelf 55A. Dit is voor ons doeleinde meer dan genoeg.



Figuur 3 ESC die in het vliegtuig is gebruikt

Motor

Er bestaan twee verschillende soorten elektrische motoren voor modelvliegtuigen, namelijk: geborstelde motoren en borstelloze motoren. De voor- en nadelen van de borstelloze motor maken de keuze zeer makkelijk. Voordelen van borstelloze: makkelijker te onderhouden, efficiënter en een langere levensduur. De nadelen van een borstelloze motor is voornamelijk de prijs, de borstelloze motor is een stuk nieuwer en vereist in tegenstelling tot zijn voorganger ook een ESC, dit zorgt ervoor dat de kosten verder stijgen.

De motor die we hebben gekozen moest aan verschillende eisen voldoen.

Namelijk dat de motor efficiënt is en weinig energie verbruikt. Wij hebben uiteindelijk gekozen voor een 750KV motor. KV is een aanduiding die voor elektrische motoren wordt gebruikt om aan te duiden hoeveel rotaties per volt de motor kan produceren. De motor werkt alleen goed als er ook een goede propeller op zit, anders kan hij zijn kracht



Figuur 4 Motor die is gebruikt

niet omzetten om het vliegtuig te laten bewegen. De propeller die we hebben gekozen heeft een lengte van 330 mm en een pitch van 16.5 mm. Hoe groter de pitch, hoe meer

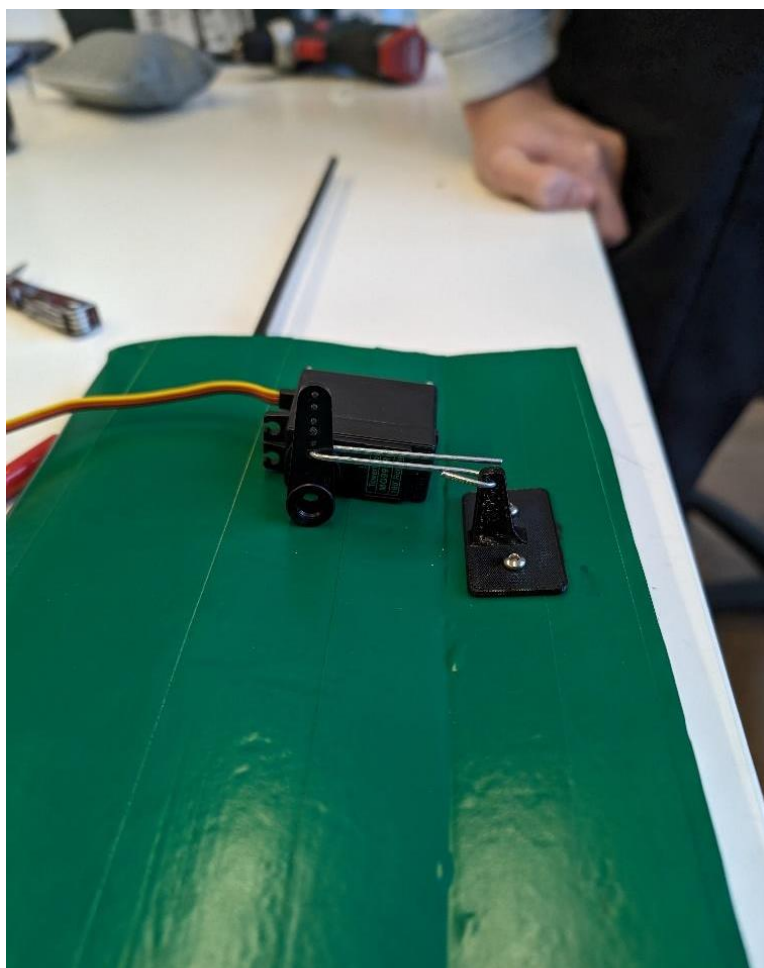
kracht de propeller kan leveren, maar ook hoe meer weerstand hij levert. (Podsędkowski et al., 2020) Wij hebben de pitch kunnen berekenen door middel van een rekentool gemaakt door rcplanes.online.

Servomotor

Een servomotor is een apparaat om automatisch een mechanisch systeem te regelen, zonder directe mechanische verbinding. De servo's in de modelbouw bestaan uit een elektromotortje, daaraan gekoppelde potentiometer en regelelektronica.

In de servo is er een referentie signaal, deze wordt continu vergeleken met het stuursignaal. Als de servo een verschil merkt tussen het referentiesignaal en het stuursignaal zal hij gaan draaien. De meeste servo's kunnen 180 graden draaien, dit zijn ook degene die we gebruiken. Er bestaan ook servo's die 360 graden kunnen draaien, deze gebruiken wij niet.

In ons modelvliegtuig wordt er gebruik gemaakt van vier verschillende servo's, deze servo's sturen elk hun eigen onderdeel aan. Wij hebben twee servo's die op de vleugels zijn gemonteerd en de rolroeren aansturen. Deze servo's draaien in tegengestelde richting en zorgen dat het vliegtuig goed kan draaien. De derde servo zorgt voor stijgen en dalen. Hij zit bevestigd aan de elevator. De vierde servo zit aan de rudder bevestigd, deze helpt het vliegtuig met het sturen en zorgt voor stabiliteit tijdens de vlucht en voornamelijk tijdens de landing.



Figuur 5 Servo's op de vleugel gelijmd

Batterij

Er bestaan veel verschillende accu technieken, bijvoorbeeld: LiPo, NiCd, NiMH. Behalve deze, bestaan er ook nog vele andere accu technieken. De verschillende soorten batterijen hebben verschillende energiedichtheid, dit is hoeveel energie iets kan houden per kilogram, dus Wh/kg. Wij hebben gekozen voor een LiPo batterij, de reden hiervoor is de hogere energiedichtheid. LiPo batterijen bevatten tot wel vier keer zoveel energie per kg als NiCd en NiMH (Blain, 2019).

Wij hebben gekozen voor de zippy compact. Deze batterij heeft 5800 mAh, dit is voldoende capaciteit voor ons doel. Dit hebben wij kunnen bepalen met de volgende formule $hrs = (mAh/A)/1000$. Als bekend is hoeveel Ampère het vliegtuig gemiddeld gebruikt kan worden uitgerekend hoe lang wij veilig kunnen vliegen. Gebaseerd op vergelijkbare vliegtuigen hebben wij een zeer ruime schatting. Wij denken dat het vliegtuig

inclusief opstijgen en landen gemiddeld 9 A zal worden verbruik per uur. Dan kan de formule worden ingevuld, $(5800/9)/1000 = 0.64$ volgens deze berekening zullen wij op een accu 38 minuten kunnen vliegen voordat hij helemaal leeg is. Vanwege de veiligheid van de LiPo cellen en de overweging dat er genoeg tijd nodig is om te landen is dit onverstandig. Wij willen nooit langer dan 30 minuten in de lucht zijn en willen de vluchten tussen de 20 – 25 minuten houden.

Na de eerste succesvolle vlucht hebben wij uit de data kunnen halen dat het vliegtuig gemiddeld 13.39 A gebruikt. Met deze informatie kunnen wij de daadwerkelijke vliegtijd berekenen met dezelfde formule als hierboven, dit is omgerekend 25.9 minuten, dus een vlucht van langer dan 20 minuten is met deze data niet verstandig. De hogere gemiddelde Ampère komt waarschijnlijk door de onervarenheid bij het vliegen, maar ook omdat het vliegtuig nog niet is gefinetuned.

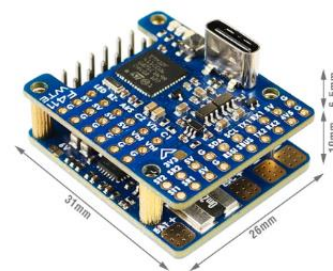
Bij het kiezen is het ook belangrijk hoeveel cellen de batterij bevat, elke LiPo cel bevat namelijk 3.7 V. Door cellen in serie op elkaar aan te sluiten zal de spanning stijgen, door de cellen parallel aan te sluiten zal de capaciteit toenemen. Dit wordt met de notatie aSbP aangeduid, **a** staat voor hoeveel cellen er in serie staan en **b** voor hoeveel cellen parallel zijn aangesloten. Wij hebben gekozen voor een 4S1P samenstelling, deze accu heeft wanneer volledig opgeladen 16.8 V.



Figuur 6 Product foto van de accu

Flight controller

Wij zijn na onze eerste testvlucht tot de conclusie gekomen dat ons vliegtuig besturen zeer ingewikkeld is. Om het vliegen makkelijker te maken hebben wij besloten dat er een flight controller nodig is zodat het vliegtuig zichzelf stabiliseert. De flight controller die wij hebben gekozen is de Mateksys F411-WTE, deze heeft verschillende ingebouwde sensoren waarmee het vliegtuig automatisch gestabiliseerd kan worden.



Figuur 7 Mateksys F411-WTE

Sensoren

Wij moeten ook een informatica deel doen, zodat we met dit project ook onze meesterproef kunnen afronden. Dat doen we door middel van twee sensoren, een gps-sensor en luchtkwaliteit sensor. Met deze sensoren willen wij bepaalde metingen kunnen maken en opslaan op een microSD kaart. Dit proces wordt gedaan op een microcontroller. Wij gebruiken de teensy 4.1. De opgeslagen data kunnen na de vlucht worden verwerkt met behulp van een python script. Dit python script kan de data filteren en verwerken tot een GPX-bestand, dit bestand kan worden geüpload naar Google Maps of andere software waar je de vliegroute kunt bekijken en luchtkwaliteit kan zien in het gebied waar hij gevlogen heeft.

De lucht sensor die wij gebruiken is de MQ135. De MQ135 is in staat om verschillende stoffen in de lucht te meten. Wij gaan ons voornamelijk focussen op de hoeveelheid: ammoniak (NH_3), methaan (CH_4), en koolstof, mono en dioxide (CO , CO_2) die zich in lucht bevinden. Als je de waarden uitleest kan er worden bepaald of er ergens rook vandaan komt.

De gps-sensor die wij gebruiken is de GY-NEO6MV2. Dit is een relatief goedkope gps-module die geschikt is voor de microcontroller die wij gebruiken. De gps-sensor kan zijn locatie bepalen door met verschillende gps-satellieten die om de aarde heen draaien te communiceren. Naast de coördinaten ontvangt de module ook de datum en tijd.

Kostenplaatje

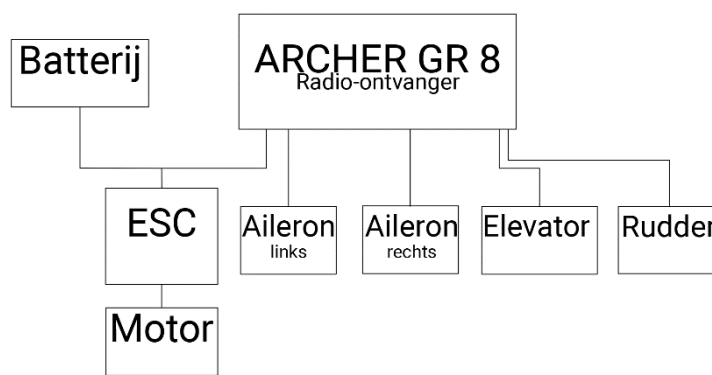
Onderdeel	Aanwezig op school	Naam	Prijs per stuk	Prijs totaal
Depron foam			€8,95	€17,90
Foam board			€7,00	€14,00
Motor		Irotor 5010-750KV	€16,02	€16,02
Propeller		Gemfan 13x6.5	€8,11	€8,11
ESC		Hobbywing Skywalker	€11,74	€11,74
Flight controller		Mateksky f411-WTE	€55,00	€55,00
Accu		Pack ZIPPY Compact	€42,48	€42,48
Receiver		FrSky ARCHER GR8	€65,00	€65,00
Servo vleugel		Tower pro MG995	€7,78	€15,56
Servo stabalizer		Tower pro SG90	€2,20	€4,40
Controller		FrSky Taranis X9-Lite	€109,00	€109,00
Totaal:				€359,01

Nadat dat het ontwerp af was en de elektronica gekozen hebben wij de nodige onderdelen laten bestellen door de Coderclass TOA Martijn Scalé. De foam platen en Depron platen waren te groot om per post te verzenden dus deze hebben wij zelf met de fiets moeten op halen bij een modelbouw winkel in Amsterdam-West. De prijzen van de verschillende onderdelen en de aanwezigheid ervan op school staan in de tabel hierboven vermeld.

Radiotechniek

Wij hebben gekozen voor de Frsky ARCHER GR8 gekozen als radio-ontvanger. Deze hebben we gekozen omdat de school al in bezit was van een Frsky Taranis X9 Lite controller. Zowel de controller als de ontvanger maken gebruik van het ACCESS protocol. ACCESS staat voor Advanced Communication Control, Elevated Spread Spectrum. Dit protocol heeft betere beveiliging dan oudere modellen, het protocol maakt verbinding maken ook gemakkelijker.

We hadden ook andere radio-ontvangers die in bezit zijn van het ACCESS protocol kunnen gebruiken. De reden dat wij voor de ARCHER GR8 hebben gekozen is dat wij voor alle servo's, motor en sensoren 6 kanalen nodig hadden. De ARCHER GR8 is in bezit van een totaal van 8 kanalen. Wij gebruiken een kanaal voor de ESC



Figuur 8 Originele bedrading van elektronica

die is verbonden met de motor en dan een kanaal per servo, wij gebruiken het laatste kanaal om stroom te kunnen voeden aan de sensoren. Ondanks dat wij niet alle kanalen kunnen gebruiken hebben we voor de 8 kanalen gekozen voor het geval dat zou blijken dat er meer kanalen nodig waren. Het zou ook in de toekomst opnieuw kunnen worden gebruikt voor een project wat er mogelijk meer nodig heeft.

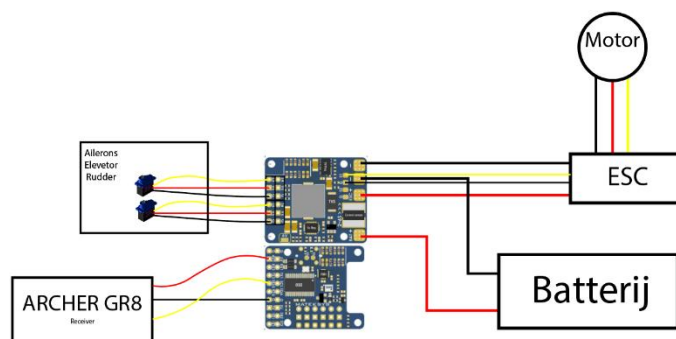
De radio-ontvanger ontvangt signalen die een frequentie hebben van 2.4GHz. De andere mogelijkheid was 27MHz. Wij hebben voor een 2.4GHz gekozen omdat het een nieuwere en stabielere frequentie is. Met een frequentie van 2.4GHz kan het vliegtuig ook van verder weg worden bestuurd. Dit is omdat hoe korter de golflengte, hoe makkelijker het door objecten heen kan penetreren. De golflengte kan met de formule $\lambda = c/f$ worden berekend hierin is C de lichtsnelheid en f de frequentie. Hieruit blijkt dat de golflengte van 2.4GHz 0.125 meter is en de golflengte van 27MHz 11.1 meter.

Binnen de EU zijn er zeer strenge regels welke frequenties voor amateurgebruik beschikbaar zijn. Een van de redenen is de veiligheid, als alle frequenties open zouden zijn zou dit een mogelijk risico zijn voor de luchtvaart en andere industrieën.

Een functie die de ARCHER GR8 bezit is de mogelijkheid de hoogte van het vliegtuig te bepalen en deze terug naar de controller te sturen. Met deze informatie kan de piloot van het vliegtuig zich zo goed mogelijk aan de hoogte limieten die er zijn voor modelvliegtuigen houden.

Hieronder staat het diagram van hoe de bedrading binnen het vliegtuig loopt.

Zoals je kan zien is niet langer de ontvanger het middelpunt van het vliegtuig maar de flight controller. De flight controller helpt de piloot met het stabiliseren van het vliegtuig. Als je de flight controller correct programmeert kan hij bepaalde voorbestemde routes vliegen en wanneer hij de verbinding verliest automatisch terugvliegen naar zijn startpunt.



Figuur 9 Definitie bekabeling van het vliegtuig

Flight controller

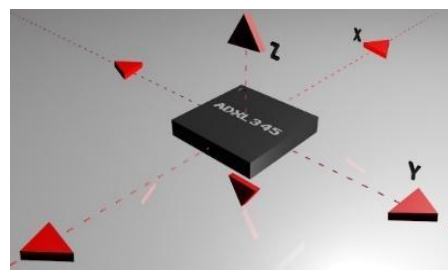
Na onze eerste vlucht hebben wij de conclusie getrokken dat er een flight controller nodig is. Dit is een kleine computer met allerlei sensoren aan boord. Aan de hand van deze sensoren kan de flight controller het vliegtuig proberen te stabiliseren. De flight controller kan dit doen door met alle bewegende delen in direct contact te zijn zoals zichtbaar in figuur 9, tijdens de eerste testvlucht was het middelpunt van de elektronica de radio-ontvanger zoals te zien in figuur 8.

De flight controller heeft drie verschillende sensoren aan boord, namelijk: een gyroscoop, een acceleroscoop en een barometer. Deze drie sensoren hebben allemaal hun eigen unieke functie, maar werken allemaal samen om een doel te bereiken. Dit doel is om het vliegtuig op zijn Z, X en Y assen stabiel te houden. Dit wordt gedaan door als de gyroscoop verandering meet kleine aanpassingen te maken op de verschillende

oppervlaktes die je kan bewegen. Het risico als je flight controller niet goed is ingesteld is dat het vliegtuig kan beginnen te oscilleren waardoor in extreme gevallen hij kan crashen. Het oscilleren kan worden verholpen door de correcte waarden te vinden. Deze waarden kunnen op verschillende manieren worden gevonden.

Het programmeren van de flight controller kan op verschillende manieren: je kunt zelf code schrijven of bestaande programma's zoals: INAV, Ardupilot, Betaflight, etc. wij hebben uiteindelijk gekozen voor INAV. INAV is een open source software, dit betekent dat iedereen fouten kan verbeteren en functies kan toevoegen. INAV heeft ons de mogelijkheid gegeven om allerlei data van het vliegtuig terug te sturen naar de piloot. Met behulp van deze data kunnen wij de vlucht in meer detail analyseren.

De groep achter INAV beheert ook een forum die mensen helpen met het instellen van hun flight controller. Via hun forum hebben wij contact kunnen maken met verschillende hobbyisten die ons hebben geholpen met het instellen van de flight controller. De software die is ontwikkeld geeft de gebruiker veel opties. Je kunt namelijk verschillende vlucht modussen gebruiken die juist meer of minder stabiliseren.



Figuur 10

Ontwerp

Een belangrijke stap in het bouwen van een RC-vliegtuig is het ontwerp. Met het ontwerp krijg je een beeld hoe je eindproduct eruit gaat zien en wat voor bouw materiaal je nodig hebt. Het helpt bij het versnellen van het bouwproces, dit omdat alles al vaststaat en je duidelijk hebt wat er gedaan moet worden. Elk ontwerpproces verloopt via een cyclus. Het vaststellen van doelen en criteria en daarna het maken van het ontwerp zelf. Later gaan we nog wat dieper in op het ontwerpproces.

Doelstellingen

Allereerst is het belangrijk de doelstellingen te bepalen. Waar moet het vliegtuig aan voldoen? In ons geval was dat vrij snel duidelijk, hij moet lang en stabiel kunnen vliegen. Met deze doelstellingen komen een paar problemen om rekening mee te houden, zoals het gewicht van de batterij en de aerodynamica. Alles om te zorgen dat je zo lang en stabiel mogelijk kan vliegen.

Daarna zijn we gaan uitzoeken hoe we ons vliegtuig in grote lijnen willen hebben. Er zijn bijvoorbeeld veel keuzes te maken. Willen we voor een flying wing ontwerp gaan, zeg maar alleen met vleugels en zonder romp. Of gaan we toch meer voor de gebruikelijke manier, waarbij je een romp hebt met daaraan de vleugels.

Daarnaast is het belangrijk om de positie van de motor te bepalen. Ga je voor een zogenaamde “pusher configuratie” (figuur 12) wat inhoudt dat de motor zich aan de achterkant bevindt of toch voor de traditionele manier (figuur 11). Wij hebben uiteindelijk besloten de motor aan de voorkant te monteren. Deze montage heeft een paar belangrijke voordelen, zo is het efficiënter doordat je minder turbulentie hebt door de romp. Wat kan bijdragen aan een langere vliegtijd. Ook zorgt deze configuratie ervoor dat de motor beter gekoeld kan worden door een directe luchtstroom.



Figuur 12 pusher configuratie



Figuur 11 puller configuratie

Ontwerpkeuzes

Nu hebben we een grof idee hoe we dit vliegtuig vorm gaan geven, we konden nu een CAD-model gaan maken in Fusion 360. We hebben ervoor gekozen om het vliegtuig op te bouwen uit een centrale buis. Dit om alle componenten aan een stevig punt te kunnen bevestigen. Hieraan komen dus de motor, vleugel, batterij en andere belangrijke elektronica.

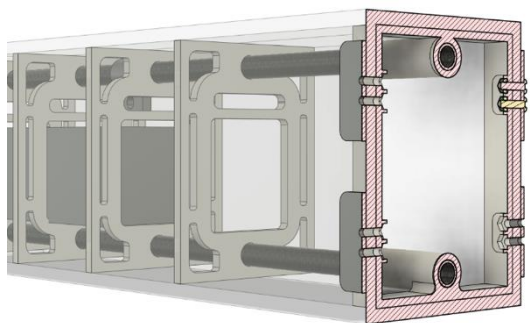
Grofweg bestaat het vliegtuig uit drie stukken. De vleugel, de romp en de stabilizer. De romp is veruit het meest complexe component.

Romp

Voor de romp hadden we een paar belangrijke eisen. Ten eerste was het belangrijk dat het goed de batterij kon huisvesten, omdat dit veruit het zwaarste en gevaarlijkste component is. Voor de batterij mogen er geen scherpe hoeken en punten aanwezig zijn in de romp. Zodra de batterij beschadigd is, kan dit voor een uiterst gevaarlijke brand zorgen, met giftige rook en een lastig uit te maken vuur. Iets om heel goed rekening mee te houden. Verder moet de batterij niet kunnen schuiven want een schuivende massa kan het evenwicht in het vliegtuig verstoren en bijna zeker tot een crash leiden.

Ten tweede vonden we het belangrijk dat we makkelijk bij de elektronica konden in de neus van het vliegtuig. Daarom hebben we gekozen voor een frame dat we deels 3D-printen, daaromheen schuiven we een uit foam board gemaakte behuizing. We klemmen die vast aan de voorkant bij de neus. Zie figuur 13. Op deze manier is het tijdens het bouwen mogelijk volledig toegang te krijgen tot het vliegtuig. Pas net voor we gaan vliegen zullen we de foam board romp installeren.

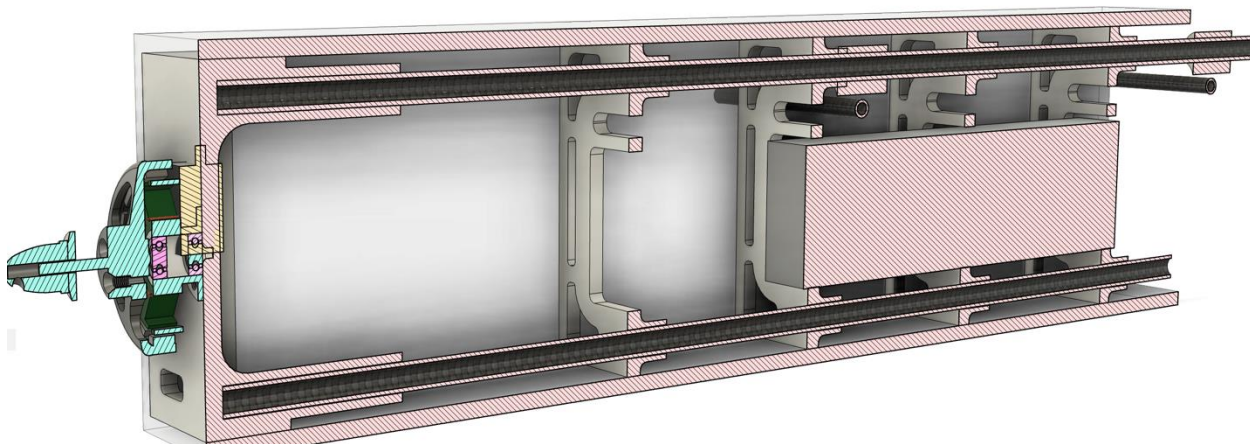
Ten derde moesten we rekening houden met de voorwaartse kracht die de motor genereert en de trillingen die hierbij komen kijken. Daarom wordt de neus van het vliegtuig ge-3D-print. Op die manier kunnen we de voorkant met de motor goed aan de buizen monteren en zo de trillingen en krachten opvangen.



Figuur 13 Klem mechanisme van de foam omhulsel van de romp te bevestigen.

We

hebben dus besloten te kiezen voor een ontwerp met verticale supports voor zowel het herbergen van de batterij als het makkelijk bereikbaar maken van de componenten. Deze supports 3D-printen we. In de supports ligt de batterij. Met klittenband willen we zorgen dat de batterij niet in horizontale richting gaat schuiven. Uiteindelijk hebben we ervoor gekozen daarvoor toch Duck tape te gebruiken. Deze supports hebben we aan de centrale buizen gemonteerd. Om het stevig te maken hebben we voor de montage gebruik gemaakt



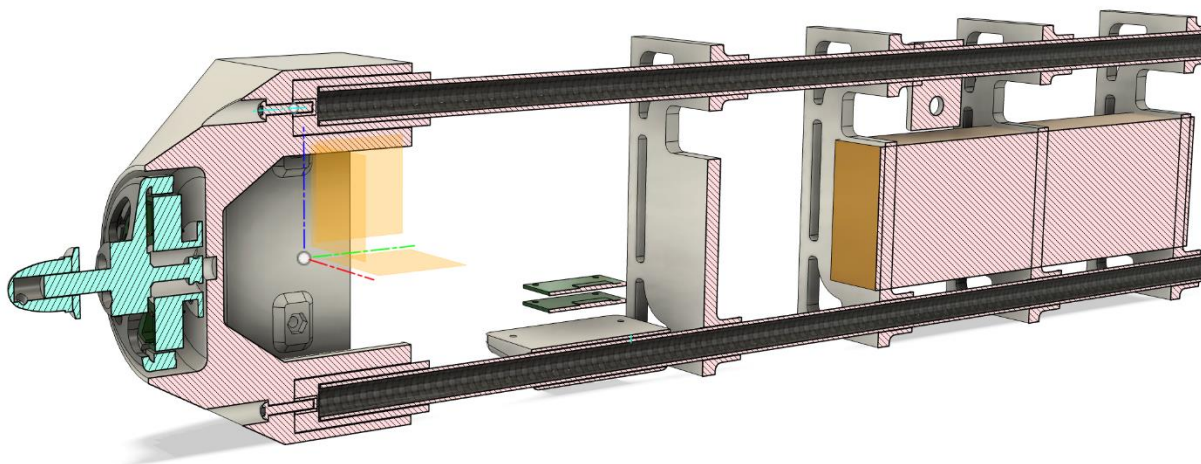
Figuur 14 Dwarsdoorsnede romp eerste versie

van een combinatie van twee componenten lijm en een lijmpistool.

Op dit punt hadden we even een evaluatie. Zijn er krachten die werken op het frame waar we geen rekening mee hebben gehouden. We besloten de vader van Thijs, Edwin den Hartog te raadplegen, hij is engineer bij ASMI en heeft een goed inzicht in CAD-modellen en krachten waar rekening mee gehouden moet worden. We besloten naast de centrale buis ook nog een buis onderaan toe te voegen. Dit om een eventuele draaiende kracht die de motor kan veroorzaken te voorkomen, en een verschuiving van supports te verhelpen. Zie figuur 14.

Na de eerste testdag kwamen we erachter dat één van de eerste onderdelen van het vliegtuig dat het begaf de neus was waaraan de motor bevestigd is. Al na de eerste vlucht

was er een scheurtje te ontdekken in de neus. Daarom hebben we besloten de neus een compleet herontwerp te geven. Dit kwam wel met toename in gewicht maar dit zou niet ernstig moeten zijn. De voordelen van een stevige voorkant wegen niet op tegen het nadeel van het gewicht.



Figuur 15 Dwarsdoorsnede romp tweede versie

Door de meer puntige vorm wordt de energie van eventuele klappen beter over het frame verdeeld in plaats van een concentratie van krachten op een plat vlak. De motor zit omgeven in het frame en is daardoor beter bestand tegen omstandigheden van buitenaf zoals modder. Het bevestigen aan de foamboard romp wordt via hetzelfde mechanisme gedaan zoals in figuur 13. Het heeft meerdere versies gekost voordat we tot het huidige ontwerp zijn gekomen. We hebben telkens wijzigingen toegevoegd om hem sterker te maken en de motor goed te kunnen monteren. Zie figuur 16.



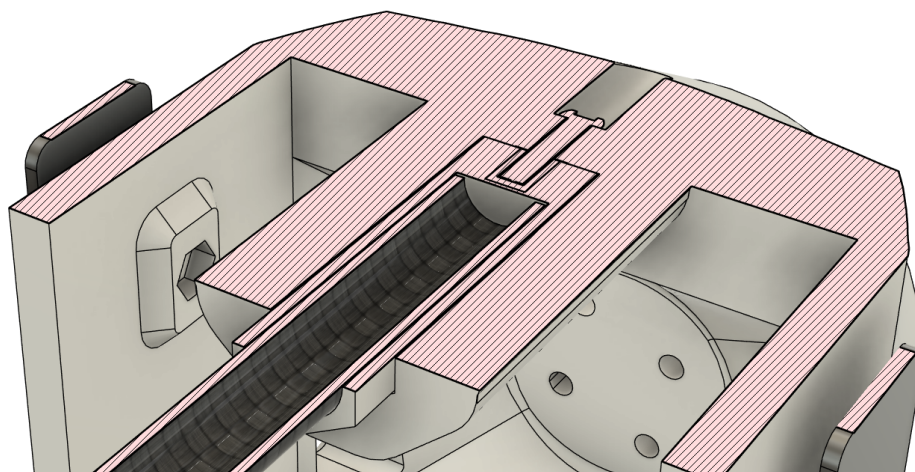
Figuur 16 Verschillende versies van neus

Een andere belangrijke aanpassing die we hadden bedacht na de eerste vlucht is dat we het makkelijker willen maken om de neus te vervangen. We maken gebruik van een zeshoek die op de carbon buis wordt gelijmd. Daaroverheen schuiven we de neus. Door middel van een heat insert in de zeshoek kunnen we de neus weer goed vastzetten. Heat

inserts worden door middel van een soldeerbout in het plastic gesmolten, na het afkoelen zit dit metalen onderdeel stevig verankerd in het PLA. In de metalen cilinder bevindt zich



Figuur 17 Heat insert wordt in het plastic gesmolten.



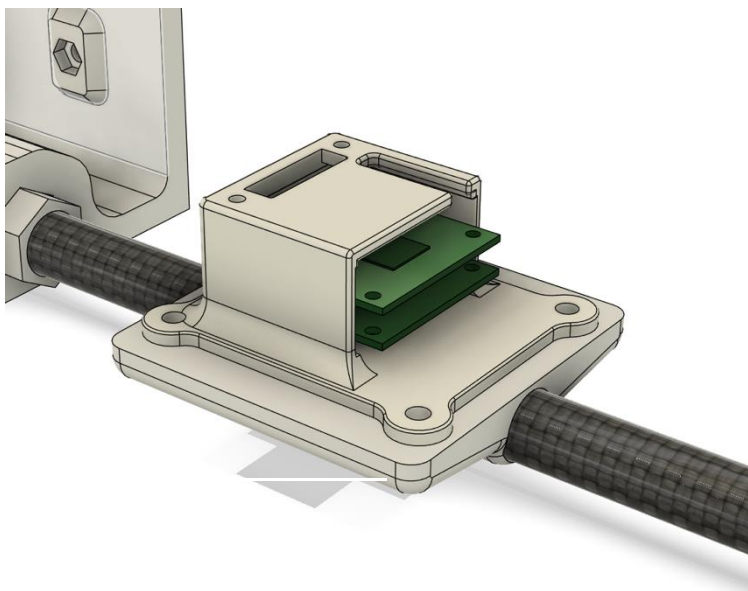
Figuur 18 Top dwarsdoorsnede van montage mechanisme van de neus.

schroefdraad. Door middel van heat inserts is het mogelijk om de ge-3D-printte neus stevig te bevestigen. (Figuur 17 & figuur 18)

Een ander nieuw onderdeel dat ontworpen moest worden voor in de romp was een montagepunt voor de flight controller. Deze flight controller moet heel stabiel vastzitten, omdat vanuit daar metingen van de gyroscoop worden gedaan die uiteindelijk tot correcties leiden. Zodra de flight controller losraakt, denkt het vliegtuig dat hij op een rare afwijkende stand terecht is gekomen. Het zou dan kunnen gebeuren dat er onnodige aanpassende bewegingen gemaakt worden.

Dat bleek echter een grotere uitdaging dan verwacht omdat de flight controller zelf geen mogelijkheid had om deze vast te schroeven. Er moest dus iets bedacht worden waar hij in geschoven kon worden en heel goed in bleef vastzitten. Dit ontwerp heeft heel veel verschillende versies gekost, omdat het een klein onderdeel is en we rekening moeten

houden met de kleine onnauwkeurigheid van een 3D-printer. Na zes versies zijn we uiteindelijk uitgekomen bij een ontwerp dat naar behoren werkt. Dit onderdeel kunnen we vervolgens via een ander ge-3D-print stukje bevestigen aan de centrale buis. In figuur 19 is zichtbaar hoe de flight controller aan de buis bevestigd wordt.



Figuur 19 Flight controller montage

Vleugel

Vervolgens zijn we over de vleugel gaan nadenken. We willen voor een langere tijd kunnen vliegen met dit vliegtuig. Daarom hebben we voor een lange dunne vleugel gekozen. Dat is standaard voor zweefvliegtuigen. Door de hoge lift tegenover weinig luchtweerstand. We kozen voor een spanwijdte van 1.6 meter en een cord van 12 centimeter. Met die eigenschappen kunnen we een vleugel produceren die in theorie voldoende liftkracht levert. Via de volgende formule kunnen we de liftkracht schatten. We gebruiken bewust het woord schatten omdat we een aantal aannames moeten doen zoals snelheid en de lift coëfficiënt.

$$L = Cl * A * .5 * \rho * V^2$$

We gaan uit van een cruise snelheid van 11.1 m/s. Volgens het KNMI is de luchtdichtheid in Nederland gemiddeld 1.3 kg/m³. (KNMI - *Lichte lucht, zware lucht*, z.d.) Via airfoiltools.com hebben we een vergelijkbare vleugelvorm gekozen die lijkt op ons foam ontwerp. We vonden daar op de geplande Angle of Attack (AA) van 4° een lift coëfficiënt Cl van 0,8. (Dormoy (*dormoy-il*), z.d.) We hebben vleugels met een cord van 12 cm met daarbij nog de aileron en gaan dus uit van 14 cm. Met een spanwijdte van 160 cm. komen we uit op een

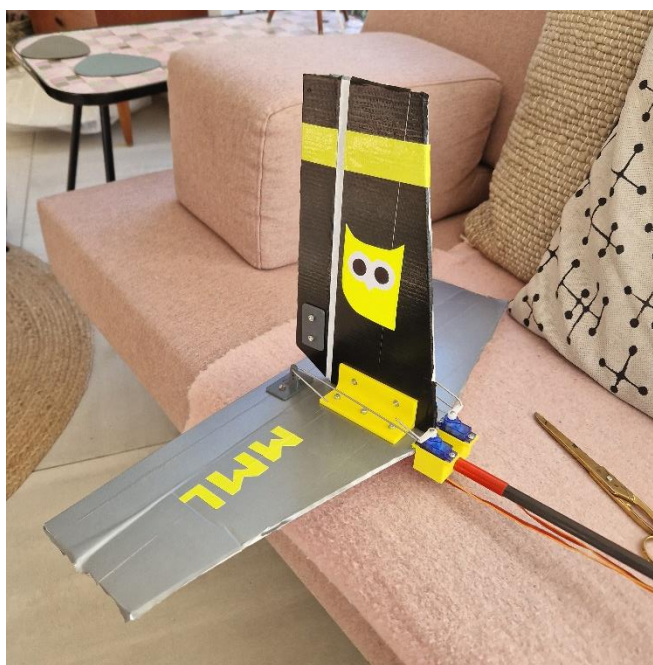
vleugeloppervlakte van 0.224m^2 . Na het invullen van de formule komen we uit op een liftkracht van ongeveer 28N. Groter dan de zwaartekracht die op het vliegtuig werkt. Die is vast te stellen via de volgende formule:

$$F_z = m * 9.8$$

We komen met een massa van 1.7 kilo, het vlieggewicht van het vliegtuig wat we hebben voorspeld uit op een kracht van 11.5 newton. De vleugel produceert een grotere kracht omhoog dan de zwaartekracht naar beneden. Het vliegtuig zal dus in de lucht blijven met deze specificaties.

Stabilizer

Als laatste hebben we ons bezig gehouden met de stabilizer, de achtervleugel van het vliegtuig. Aan de stabilisator zitten de elevator, om omhoog en omlaag te pitchen en de rudder voor links en rechts bewegingen. Deze wordt tijdens de vlucht weinig gebruikt. We hebben ervoor gekozen om de oppervlaktes van de stabilisator van foamboard te maken, en de met ge-3d-printte onderdelen het vast te klemmen aan de buis. Zie figuur 20. De elevator en rudder oppervlaktes worden door twee servo's bewogen. Die zitten voor de stabilizer aan de buis bevestigd en bewegen met een ijzerdraadje de oppervlaktes van de elevator.



Figuur 20 De stabilizers.

Materiaalkeuze

Voor dit vliegtuig hebben we van verschillende materialen gebruikgemaakt. PLA, een 3D printbaar plastic, vormt een belangrijk onderdeel van ons vliegtuig. Maar ook de foam board platen en carbon fiber spelen een rol. Maar waarom hebben we deze materialen eigenlijk gekozen?

PLA

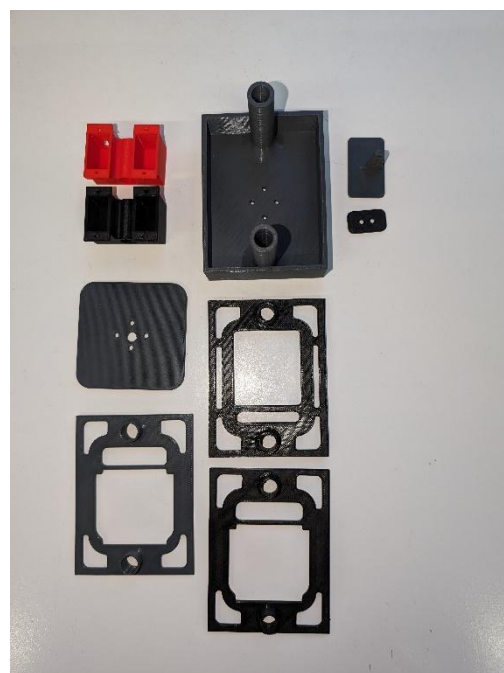
PLA is het meest gebruikte filament waarmee met behulp van een 3D-printer allerlei vormen gemaakt kunnen worden. Door de mogelijkheid snel en precies onderdelen te kunnen maken hebben we gekozen voor de 3D-printer. Uit ons computermodel kunnen we heel snel 3D prints maken. Dit stelt ons in staat heel snel prototypes te maken. Neem bijvoorbeeld de onderdelen waarin de batterij ligt en die de buizen uit elkaar houdt. Daar hebben we in de tijdspanne van twee dagen 4 versies van gemaakt. Elke keer weer wat verbeteringen doorgevoerd totdat we tot de gewenste vorm kwamen. Zonder te scherpe hoeken en stevig genoeg om een centraal structureel component te vormen. Voor meerdere onderdelen hebben we dat kunnen doen.

Maar dat het makkelijk is snel onderdelen te maken was niet de enige factor die ons het besluit liet maken met


PLA te werken. PLA heeft namelijk een paar hele bruikbare eigenschappen. Ten eerste kan het veel kracht weerstaan want het heeft een redelijke mechanische sterkte. En het vervormt weinig onder temperatuurveranderingen en kan dus met een 3D-printer gebruikt worden om precieze mechanische onderdelen te maken. Een andere kwaliteit van PLA is dat het biologisch afbreekbaar is. Mochten we het vliegtuig kwijtraken dan is het in theorie bijna helemaal biologisch afbreekbaar. (Bialystok University of Technology, 2020)

Carbon Fiber

Voor de centrale buis hebben we gekozen voor carbon fiber. Carbon fiber of koolstofvezel is een relatief nieuw materiaal met hele gunstige mechanische eigenschappen. Carbon



Figuur 21 Voorbeelden van door ons geprinte onderdelen in PLA.



fiber bestaat uit een groot aantal vezels, die in de lengterichting parallel aan elkaar lopen. Deze vezels zijn zeer klein, tussen de 6 μm en de 10 μm . Het kan een grote trekkracht weerstaan voordat het rekt en uiteindelijk breekt. Het is dus voor zijn gewicht heel erg sterk, ideaal dus voor toepassingen in de luchtvaartindustrie.

Foamboard en Depron

Een ander belangrijk materiaal is foamboard, het is licht en niet heel sterk. Het is relatief goedkoop en vervult vaak toepassingen in modelvliegtuigen. Het is met de hand breekbaar, maar heeft in ons vliegtuig een paar belangrijke toepassingen. Het dient bij ons vliegtuig vooral om bijvoorbeeld de romp te beschermen tegen invloeden van buitenaf. Carbon Fiber en PLA vormen samen het frame, en vervullen dus de rollen die nodig zijn voor mechanische sterkte. Maar tijdens landingen beschermt het foam wel goed tegen bijvoorbeeld modder en gras.

Echter is bescherming niet de enige functie, we passen foamboard ook toe in de stablizer. Dit zijn de achter vinnen die als functie hebben het vliegtuig te stabiliseren en voor besturing, bijvoorbeeld de elevators en de rudder bevinden zich aan de stabilizer. We besloten dit uit foamboard te maken, omdat het stevig genoeg is en makkelijk bewerkbaar. We hadden geen bijzondere rondingen nodig dus was in dit geval foamboard een geschikte keuze.

Voor de vleugel hebben we een andere keuze dan foamboard gemaakt. Daar hebben we gekozen voor Depron. Dit heeft vrijwel dezelfde eigenschappen. Het is echter beter buigbaar. Daardoor is het mogelijk om ronde vormen te maken. Voor een vleugel is het belangrijk een mooie vloeiende vorm te hebben. Depron stelt ons in staat dit makkelijker te realiseren.

Ontwerpcyclus

Op ons ontwerpproces is de ontwerpcyclus van toepassing. We zijn begonnen met het opstellen van de eisenlijst. Al snel kwamen we tot een paar belangrijke punten.

Ten eerste willen we in staat zijn lang te vliegen, dit heeft veel invloed op de keuzes die we later moeten maken. Grote van de batterij, stroomverbruik van de motor, gewicht en vleugelvorm.



Figuur 22 De ontwerpcyclus

Ten tweede willen we dat het gemakkelijk is om aan het vliegtuig te werken. Elektronica moet makkelijk bereikbaar zijn voor aanpassingen tijdens het vliegen. Ook moet het mogelijk zijn om snel reparaties uit te voeren mochten er na een vlucht dingen stuk gaan.

We begonnen met het bedenken van ideeën. Ideeën als het foamboard om het frame schuiven voor het gemakkelijk bereikbaar maken van de onderdelen kwamen al snel, en we besloten het in het ontwerp op te nemen. We zijn vervolgens in CAD een volledig ontwerp gaan maken. Dit heeft ons heel veel werk gescheeld omdat we bepaalde problemen al vroeg konden opsporen en oplossingen er voor konden bedenken.

Daarna zijn we al snel begonnen met het bouwen, vele uren hebben we na en tijdens school gewerkt aan het vliegtuig. We begonnen met de vleugel, dit was een kwestie van veel afmeten, snijden en vouwen. Foutjes worden natuurlijk altijd al snel gemaakt, maar telkens waren er goede oplossingen te verzinnen. Daarna zijn we met de romp verdergegaan, zie figuur 24. Toen dit klaar was, zijn we gaan bedenken hoe we de vleugel willen bevestigen, zie figuur 23. We zijn met een elastieken systeem gekomen, waardoor de vleugel makkelijk demonteerbaar is.

Tijdens het bouwen hebben we ondertussen nog steeds aanpassingen gedaan aan het ontwerp, omdat we tegen nieuwe dingen aanliepen.



Figuur 23 Het vliegtuig bijna klaar



Figuur 24 Werken aan de romp

Daarna konden we aan de laatste stap in de cyclus beginnen, het testen. Op de testlocatie hebben we drie verschillende vluchten uit kunnen voeren. Niet allemaal heel erg succesvol, maar wel heel leerzaam. Na het analyseren van de beelden kwamen we tot een paar conclusies.

Ten eerste zit er een afwijking in het vliegtuig. Na het lanceren vindt er standaard een rol naar links plaats. Hierdoor verliest de vleugel zijn lift en zal hij naar de grond bewegen. Dit hebben we in twee testvluchten waargenomen. Er zijn twee mogelijke oorzaken die we hebben kunnen vinden. We hebben tijdens de testvlucht waargenomen dat de stablizer niet precies recht stond ten opzichte van de romp. Dit kan de afwijking veroorzaakt



Figuur 25 Vliegtuig raakt onbestuurbaar doordat de vleugel verticaal staat ten opzichte horizon

hebben. Eveneens vindt er door de draairichting van de motor, naar rechts een rollende kracht naar links plaats. Voor de eerste oorzaak is een makkelijke oplossing, de stablizer recht zetten. Voor de tweede oorzaak is de enige manier om ermee om te gaan het



corrigeren van de rol als piloot of een flight controller implementeren die dat standaard al doet.

Ten tweede is het heel erg lastig het vliegtuig onder controle te houden. In de tijdspanne van een seconde moeten er tientallen kleine besturingen worden gedaan. Praktisch gezien onmogelijk om te doen als een ongetrainde “piloot”. Daarom hebben we een belangrijke aanpassing bedacht die we toe willen gaan passen. Een flight controller lijkt ons de enige optie om het vliegtuig onder controle te krijgen. Een computer is gemaakt om snel heel veel aanpassingen te doen aan de stand van de control surfaces en het zal dus mogelijk zijn om snel het vliegtuig te kunnen sturen en hem stabiel te houden.

Kortom, we hebben een hoop feedback en kunnen nu aan een V2 gaan werken. De test verliep niet helemaal zoals gehoopt, maar dat is een belangrijk onderdeel van de ontwerpcyclus, nu kunnen we weer verder met alles wat we geleerd hebben.

Eerste testdag

Wij hebben na een aantal maanden ontwerpen, plannen en bouwen op vrijdag 15 december 2023 onze eerste testvlucht kunnen maken. Dit hebben wij gedaan in de Rijk waar wij toestemming hadden van de grondeigenaar. Wij hebben 3 vluchten kunnen uitvoeren. Op locatie waren wij met z'n vieren aanwezig: Thijs, Samuel, Roemer (5h) en Edwin den Hartog, de vader van Thijs. Edwin heeft gezorgd dat wij al ons materiaal konden transporteren naar locatie.



Eerste vlucht

De eerste vlucht ging kort na start al mis. Dit kwam door een miscommunicatie tussen ons. Samuel had het vliegtuig vast en zou hem gooien zodra hij genoeg kracht voelde van het vliegtuig. Thijs bestuurd



het vliegtuig. Samuel had het gevoel dat het vliegtuig genoeg kracht zou hebben en gooide het vliegtuig. Echter was de motor nog niet 100%. Hierdoor had het vliegtuig niet genoeg trekkracht waardoor er niet genoeg lift was om het vliegtuig te laten vliegen. Hierdoor is hij na enkele seconden de grond ingevlogen.

De schade die hierdoor is veroorzaakt was minimaal. De propeller was afgebroken en zowel de romp als het plastic rond de motor hadden lichte beschadigingen. Wij hebben de schade snel kunnen repareren, hierdoor hebben wij kort erna een tweede vlucht kunnen uitvoeren.



Figuur 26 Een gebroken Propeller en vleugel na de eerste vlucht

Tweede vlucht

Om de fout van de eerste vlucht te corrigeren hadden wij afgesproken dat pas wanneer er duidelijk door Thijs werd gezegd dat de motor op 100% staat en Samuel genoeg kracht voelt het vliegtuig wordt losgelaten. Ook hadden wij afgesproken het vliegtuig met een hoek te lanceren, maar ook om de ailerons te positioneren zodat het vliegtuig stijgt. De combinatie van deze tweede factoren heeft ervoor gezorgd dat wij overcompenseren waardoor het vliegtuig in een stall komt



waardoor er niet genoeg lift was om het vliegtuig vliegend te houden. Hierdoor zal het vliegtuig uit de lucht beginnen te vallen. Dit is ook wat er gebeurde waardoor Thijs de controle verloor. Hij is uiteindelijk in het riet beland en alleen de motor is nat geworden. Er waren een aantal spetters op de rest van het vliegtuig.

Wij hebben snel alles uit elkaar gehaald en ervoor gezorgd dat het mooi droog was en er geen kortsluiting kon plaatsvinden. Nadat wij zeker waren dat alles droog was en er geen kortsluiting was, hebben wij besloten om alles een laatste keer samen te bouwen.

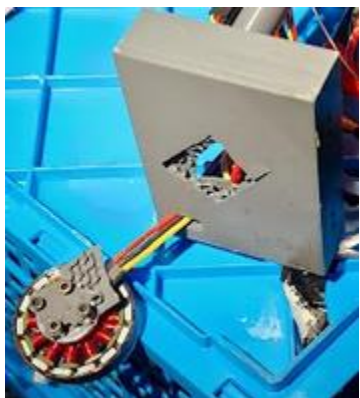
Derde vlucht

Voor de derde vlucht hebben wij het punt vanaf waar wij de vlucht starten iets meer opgeschoven waardoor er een grotere marge is tot het vliegtuig boven water is. Ook hebben wij besloten dat het vliegtuig recht vooruit wordt gegooid en dat door middel van de ailerons en elevator zo te positioneren dat het vliegtuig langzaam stijgt. Toen Thijs het signaal gaf dat de motor op 100% was, heeft Samuel het vliegtuig losgelaten. Door een van de eerder crashes is de stabilisator scheef gaan staan waardoor het vliegtuig uit balans was en door de combinatie met een mogelijke verwarring van de besturing van het vliegtuig is hij nog een keer gecrasht.

Dit was de heftigste crash en tegelijk ook de laatste. Tijdens de crash is de accu losgekomen van zijn bevestiging waardoor hij naar voren schoot. Het plastic waar de motor voor vast was gemonteerd was door de eerste crash al verzwakt en is door de impact die de accu gaf bij het loskomen uit het plastic gebroken zoals te zien is in figuur 27. Ook is de

rudder afgebroken bij de crash zoals in figuur 28 te zien is. Door de impact van de crash zijn ook de servo's die op de vleugels lagen losgekomen.

Al met al waren het succesvolle vluchten, het heeft ons laten zien dat



Figuur 27



Figuur 28

het vliegtuig kan vliegen. Ook hebben deze testvluchten ons de fouten van ons ontwerp laten zien waardoor we hopelijk in een tweede versie de fouten hebben verbeterd en een stap dichterbij lange afstanden vliegen. Na afloop hebben wij ook contact gezocht met meerdere experts en hobbyisten. Wij hebben via Instagram direct contact opgenomen met een YouTuber genaamd Aerostuff FPV. Aerostuff FPV heeft ons tips gegeven hoe we ons vliegtuig kunnen verbeteren en aspecten waar we naar zouden kunnen kijken. Ook hebben we op twee verschillende forums rondgevraagd over hoe we onze tweede vlucht succesvol kunnen maken. Het eerste forum heeft ons tips gegeven over hoe we voor de vlucht het best kunnen testen of het vliegtuig in staat is om te vliegen. Het tweede forum was een forum van de INAV-groep en die hebben tips gegeven op hoe je een flight controller het best configureert.

Tweede testdag

We hadden afgesproken om rond twaalf uur te vertrekken naar de testlocatie. Thijs heeft de avond voor het vliegen nog de zeshoeken aan de buis gelijmd en de moertjes bevestigd. Echter bleek de ochtend voor de test dat er met de twee componenten lijm iets compleet was misgegaan. De zeshoeken waren er zo weer af te schuiven. Op advies van Edwin, de vader van Thijs, hebben we besloten om een gaatje te boren in de buis en daar doorheen een pinnetje te steken. Op die manier zat de zeshoek heel erg vast en was het toch mogelijk nog te vliegen.

Echter kwamen we op de testlocatie zelf er pas achter dat ook de moertjes niet goed vast waren gelijmd. Wij hebben nog geprobeerd om met seconden lijm die wij bij ons hadden de moertjes weer vast te lijmen. De moertjes pasten door lijmresten niet meer in hun houdertjes. We besloten de foam romp te bevestigen door middel van duct tape omdat het geen structureel component is vonden we dit een goede oplossing.

Ondertussen waren zowel Samuel zijn vader als Sonja en Ger, de opa en oma van Thijs, aangekomen.

Eerste vlucht

Voordat we begonnen met de eerste vlucht waren we beiden zenuwachtig. Daar waren meerdere redenen voor, natuurlijk hadden we nog in onze gedachte hoe testdag één was verlopen, alle vluchten resulteerden toen in een crash. Dat wilden we ten allen tijde voorkomen, zeker omdat we al zoveel werk hadden gestoken in dit project.



Figuur 29 Het opstijgen van de eerste succesvolle vlucht

De blijdschap en opluchting was daarom ook groot nadat het vliegtuig de lucht in kwam en goed bestuurbaar bleek. Samuel bleef heel erg goed geconcentreerd op het vliegen, terwijl Thijs met de drone achter het vliegtuig aanvloog om opnames te maken van de vlucht. Na een vlucht van ongeveer 12 minuten besloten we te landen. Er was nog batterijspanning over, maar het leek ons verstandig de vlucht te beëindigen. Na een redelijk zachte landing bleek het vliegtuig nog

helemaal intact. Het systeem waarbij we gebruik maken van elastieken om de vleugel vast te binden aan de romp hebben er al bij meerdere landingen voor gezorgd dat de vleugel niet gebroken is. Dit was dus een goede keuze.

Het moment dat we zagen dat het gehele vliegtuig nog heel was waren we heel erg opgelucht, blij en toch ook wel een beetje verrast, natuurlijk was er een hoop gejuich van de aanwezigen die waren komen kijken. We besloten gelijk onze begeleider Hakan op de hoogte te brengen van het succes en gingen ons klaarmaken voor een tweede vlucht.

Tweede vlucht

Nadat wij waren bijgekomen van de zenuwen van de eerste succesvolle vlucht hebben wij besloten een nieuwe accu in het vliegtuig te zetten en opnieuw op te stijgen. We hebben hem succesvol kunnen starten en vervolgens 8 minuten kunnen vliegen. Hierna is hij helaas gecrasht. We probeerden het vliegtuig laag over te laten vliegen, zodat wij foto's en video's konden maken. Door afleiding is per ongeluk de gashendel op nul gezet, hierdoor waren alle correcties tevergeefs en werd Edwin, de vader van Thijs net niet geraakt. Het vliegtuig leek wederom helemaal intact en nadat we van de schrik waren bekomen konden we nog eens proberen.



Figuur 30 De crash waarbij Edwin net niet werd geraakt.

Derde vlucht

De derde vlucht was ook gelijk de laatste. De vlucht duurde korter dan de eerdere, namelijk maar 90 seconden. Het vliegtuig werd lastig bestuurbaar door motorproblemen. We vermoeden dat de schroeven waarmee de motor aan de ge-3D-printte neus bevestigd was los zijn gekomen door trillingen. Voor de volgende keer moeten we dus lock tight gebruiken om dit te voorkomen. Ondanks het feit dat de motor was losgekomen heeft Samuel een zachte landing kunnen maken, waarbij verder geen schade is ontstaan aan het vliegtuig.



Figuur 31 Motor is losgetrild na de laatste vlucht



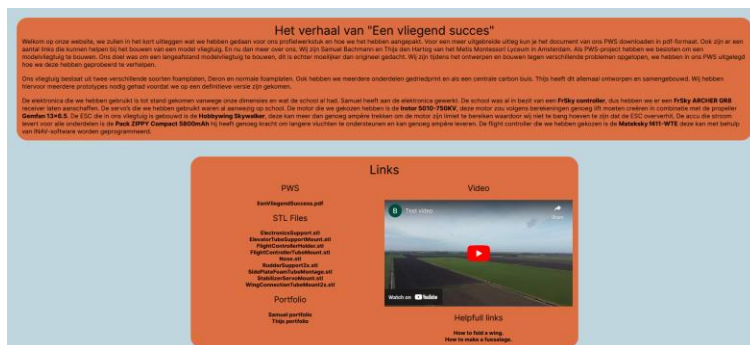
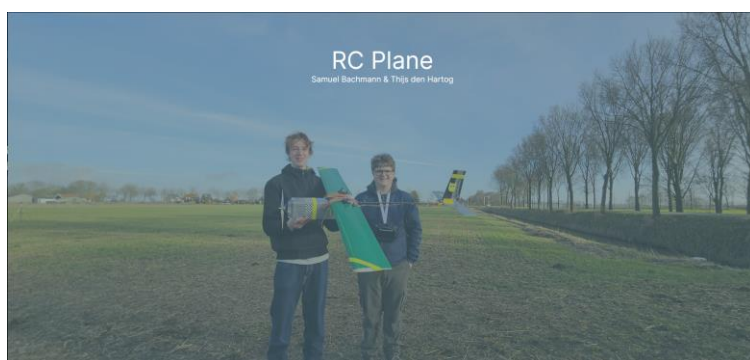
Figuur 32 Na de derde vlucht was de motor losgekomen maar we konden terugkijken op een geslaagde dag

Delen met rest van de wereld

Om ons PWS succesvol te maken hebben wij allebei veel moeten leren op allerlei verschillende aspecten. Thijs heeft in meer detail geleerd hoe je in Fusion 360 3d modellen maakt en hoe je met foam moet werken. Samuel heeft geleerd hoe de verschillende elektronische componenten van een vliegtuig samenwerken en hoe je deze programmeert. Veel van deze dingen hebben wij geleerd van het internet. Wij willen de volgende groep geïnteresseerden graag helpen, dit willen wij doen doormiddel van een website waar wij ons PWS openbaar maken en tips geven en linken naar behulpzame bronnen.

Wij hebben een simpele website gemaakt waar wij in het kort uitleggen wat wij hebben gedaan en geleerd. Wij delen alle STL-bestanden, dit zijn bestanden die mensen zelf kunnen 3d-printen als ze dat willen.

Link naar de website: <https://samuelbachmann.github.io/>



Conclusie

Kortom, we hebben heel veel kunnen leren. En de hoofdvraag kunnen beantwoorden. Want ja, het is mogelijk als middelbare scholier een modelvliegtuig te ontwerpen. Echter kwamen we er al snel achter dat het niet gemakkelijk is.

Al snel zijn we op zoek gegaan naar een antwoord op de eerste deelvraag: welk materiaal is het meest geschikt voor het bouwen van een modelvliegtuig? Na een kort onderzoek naar wat voor materialen veel gebruikt worden voor dit soort vliegtuigen konden we een lijstje opstellen. Foam board platen, carbon buizen en ge-3D-printte onderdelen vormden de basis voor ons ontwerp.

Het antwoord voor onze tweede deelvraag lag wat complexer. We moesten qua radiotechniek rekening houden met een radio-transmitter die al op school aanwezig was. Daardoor werd onze keuze al wat meer beperkt, maar uiteindelijk zijn we in staat geweest om een receiver te vinden die kon samenwerken met de afstandsbediening. We hebben geen problemen ondervonden met het bereik van de transmitter die werkte zelfs op een afstand van 600 meter nog helemaal naar behoren.

Onze laatste deelvraag hebben we ook kunnen beantwoorden, we zijn stapsgewijs bezig geweest met het berekenen van de componenten die we nodig hadden, maar we hebben ook gekeken hoe andere vergelijkbare projecten hun elektronica hebben gekozen.

Van dit PWS hebben we een hoop geleerd. Er komt heel veel bij kijken bij het bouwen van een vliegtuig: elektronica, mechanica, natuurkundige principes en wetten, maar ook veiligheid. Op elk van deze gebieden hebben we veel geleerd. Zo hebben we geleerd hoe we Fusion 360 moeten gebruiken voor het ontwikkelen van onderdelen en weten we hoe we met elektronica moeten werken, ook met hogere stroomsterktes en gevaarlijke componenten zoals de batterij. Verder hebben we veel geleerd of het gebruik van 3D printers en andere technieken om bijvoorbeeld met foam platen te werken. Ik spreek voor ons beide als ik zeg dat we tevreden zijn over hoe we dit project tot een succes hebben kunnen brengen. We willen graag verder gaan met het bouwen van modelvliegtuigen en zien dit PWS als onze eerste stap om hierover te leren.

Nawoord Samuel Bachmann

Thijs en ik hebben de afgelopen zes jaar velen projecten op school samen uitgevoerd. Sommige verliepen wat stroef, andere wat makkelijker. Het PWS tel ik als een van de betere, ondanks dat er soms miscommunicatie is over wie wat wanneer doet. Als wij het ergens oneens over zijn, kunnen wij het meestal snel oplossen en een tussenweg vinden. Dit lukt omdat het duidelijk is wie wat moet doen. Ik ben ook zeer blij met het product wat wij hebben kunnen leveren, ons doel was om te vliegen en hij heeft het gedaan. Wij waren allebei heel erg verbaasd hoe goed het vliegtuig vloog we hadden niet verwacht dat hij zo goed zou vliegen.

Nawoord Thijs den Hartog

Al sinds het eerste jaar ben ik bevriend met Samuel. We hebben in de afgelopen jaren heel veel projecten samen gedaan. Deze ging zo nu en dan goed, maar soms bleef een product achter dat nog niet helemaal af was. Het grootste en mooiste project wat we samen hebben kunnen doen is het PWS.

We hebben beide veel gedeelde interesses, zoals vliegtuigen. Daarom zijn we blij dat we als afsluiting hebben kunnen kiezen wat we beide heel erg interessant vinden. We hebben vaak grotere ambities dan mogelijk, aan het begin was ik bang dat ons onderwerp misschien iets te hoog gegrepen was. Dat viel niet mee, het was hoog gegrepen. Want het bouwen van een modelvliegtuig is niet niks. Maar doordat we beide bereid waren veel tijd en energie in dit project te steken hebben we het tot een succes weten te brengen.

De samenwerking verliep vanuit mijn oogpunt goed, zo nu en dan was er een meningsverschil, maar altijd kwam er een middenweg. We hadden goede communicatie, en belden vaak als we nieuwe ideeën hadden die we in het vliegtuig wilden verwerken.

Ik denk dat wij elkaar goed aanvullen in een samenwerking omdat we qua persoonlijkheid verschillen. Samuel is vaak wat meer van aanpakken en regelt daardoor dingen sneller. Zoals bijvoorbeeld hulp van O&O bij het zagen van sommige onderdelen.

En wat waren we blij toen het we vliegtuig eindelijk zagen vliegen, de afgelopen tijd op school bestond voor een groot deel aan alles wat met het vliegtuig te maken had. Het feit dat dit een succes is geworden is denk ik ook verdient want wij hebben er alles aan gedaan om het vliegtuig te laten vliegen.

Kortom, ik ben zeer tevreden over de samenwerking en ben blij dat ik samen met Samuel dit PWS heb mogen doen.

Dankwoord

We willen graag de volgende mensen nog bedanken voor hun bijdrage aan het mogelijk maken van ons PWS:

Roemer Peters – Heeft altijd voor ons klaargestaan wanneer er hulp nodig was bij het bouwen van het vliegtuig of er problemen waren met het ontwerp. We hebben samen met Roemer vele uren na school nog dingen gedaan voor het vliegtuig. Ook zijn aanwezigheid bij de testvluchten was heel erg behulpzaam, we konden de extra paar handen heel erg goed gebruiken. Vooral de "troost wafels", ook wel stroopwafels na de eerste crash, werden erg gewaardeerd. Voor zijn bijdrage zijn we hem heel erg dankbaar.



Martijn Scalé – Martijn is de TOA bij informatica, hij heeft ons bijgestaan met advies en het regelen van de benodigde componenten.

Adam Klerkx – Heeft geholpen met feedback op het ontwerp en ons geholpen vroegtijdig problemen te herkennen en op te lossen.

Edwin den Hartog – Heeft ons geholpen met meedenken met het ontwerp en is op de testdagen mee geweest om ons erheen te rijden en te filmen.

Ger en Sonja Besselink – Mijn opa en oma zijn we heel erg dankbaar voor het meedenken en helpen bij het zoeken van een goede testlocatie, voor hun gastvrijheid en gehele betrokkenheid bij het project. We waren heel erg blij met de heerlijke warme kippensoep op de testdag, die heeft ons geholpen weer even op te warmen. Helaas kon mijn opa door zijn hartaanval niet bij de eerste test aanwezig zijn, maar gelukkig kon hij er bij de tweede vlucht bij zijn.



Arie Reim – Zijn we heel erg dankbaar voor het prettige contact en het meedenken. Hij is de grondeigenaar van de testlocatie, en een goede vriend van mijn opa en oma.

Bronnenlijst

- Blain, L. (2019, November 27). Solid state battery breakthrough could double the density of lithium-ion cells. *New Atlas*. <https://newatlas.com/science/deakin-solid-state-battery-polymer-electrolyte/>
- Bialystok University of Technology. (2020). *Mechanical and Thermal Properties of Polylactide (PLA) Composites Modified with Mg, Fe, and Polyethylene (PE) Additives*.
- Dormoy (dormoy-il). (z.d.). <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=dormoy-il>
- Estimate DC motor and prop combo. (z.d.). https://rcplanes.online/calc_motor.htm
- Hofman, L. (2020, March 23). *Alles wat je moet weten over militaire drones*. De Correspondent. <https://decorrespondent.nl/11040/alles-wat-je-moet-weten-over-militaire-drones/952a371b-04f2-081b-3880-7feb15d632c3>
- Journal, J. D. a. S. S. S. (2018, August 12). Southern Oregon wildfires: After dark, drone is “best friend a firefighter could have.” *Statesman Journal*. <https://eu.statesmanjournal.com/story/news/2018/08/11/southern-oregon-wildfires-after-dark-drone-best-friend-firefighter-could-have/969268002/>
- KNMI - Lichte lucht, zware lucht. (z.d.). <https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/lichte-lucht-zware-lucht>
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2023, January 2). *Modelvliegers. General Aviation / Inspectie Leefomgeving En Transport (ILT)*. <https://www.ilent.nl/onderwerpen/luchtsporters-general-aviation/modelvliegers>
- Podsędkowski, M., Konopiński, R., Obidowski, D., & Koter, K. (2020). Variable pitch propeller for UAV-Experimental tests. *Energies*, 13(20), 5264. <https://doi.org/10.3390/en13205264>

Reese, A. (2023, 14 juni). The Portuguese drone that douses wildfires from above. *BBC Future*.

<https://www.bbc.com/future/article/20230609-can-we-use-firefighting-drones-put-out-wildfires>

The lift equation. (z.d.). [https://www.grc.nasa.gov/www/k-](https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/lifteq.html)

[12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/lifteq.html](https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/lifteq.html)

wetten.nl - Regeling - Regeling modelvliegen - BWBR0019147. (2021, April 22).

<https://wetten.overheid.nl/BWBR0019147/2021-04-22>

Zwijnenburg, W. (2022, 21 april). *Opinie: Voor het bewapenen van drones moeten eerst*

afspraken komen – anders riskeren we burgerdoden. Volkskrant.

<https://www.volkskrant.nl/columns-opinie/opinie-voor-het-bewapenen-van-drones-moeten-eerst-afspraken-komen-anders-riskeren-we-burgerdoden~ba7bc812/>