



## Vliegend succes: een uitgebreide verkenning van het bouwproces van modelvliegtuigen

26.11.2023

---

**S. Bachmann & T. den Hartog**

N&G, N&T | Informatica

Metis Montessori Lyceum | 6v2, 6v3

Mauritskade 58, 1092 AD Amsterdam

Hakan Akkas, Martijn Scalé



Inleiding.....	2
Algemeen over UAV.....	3
Veiligheid.....	4
Elektronica.....	6
Radiotechniek .....	11
Ontwerp .....	13
Materiaalkeuze .....	17
Testvluchten.....	21
Conclusie .....	24
Bronnenlijst.....	27

## 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. Echt kwamen we er al snel achter dat het te uitgebreid was voor een pws en de wetgeving in Nederland te strikt is. We hadden gelukkig al snel een idee waar we beide enthousiast van werden, het bouwen van een vliegtuig. Maar ook kwam toch al snel het besef, het gaat niet makkelijk worden zelf een vliegtuig te bouwen. Er zijn zo veel dingen die mis kunnen gaan en waarover na moet worden gedacht, maar we waren bereid te kijken hoe ver we kunnen komen. Wij zijn er zelf van overtuigd dat we een modelvliegtuig kunnen maken.

In dit PWS beschrijven we het complete ontwerp en bouwproces van een 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 veiligheid maatregelen wij moesten 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 laatst willen we het gaan hebben over hoe de test 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 doeleinde 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 doeleinde. Drones kunnen worden uitgerust met wapens. Dit stelt landen in staat om vanaf de andere kant 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. (Volkskrant, 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. (De Correspondent, 2020) Dat is als zorgwekkend te zien, aangezien er geen internationaal verdagen en afspraken zijn die regels voor het gebruik vastleggen.

Het militaire doeleinde 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. (BBC, 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. (Statesman Journal, 2022)

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 CO<sub>2</sub> concentratie in de lucht behouden 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 doeleinde 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 test vlucht 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:

“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, zweefstoellen, vrije ballonnen en luchtschepen. Wanneer twee modelvliegtuigen elkaar op dezelfde hoogte kruisen heeft het luchtvaartuig dat van rechts komt voorrang.

In artikel 2 staan de meest 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 waarnemers 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. 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) 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 modelvliegtuig zich bevindt. Dit zorgt 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 het einde gewicht tussen de 1.5 en 2.0 kilogram

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 Rijp, een dorpje nabij een polder ten noorden van Amsterdam. Zij zijn goed bevriend met meerder boeren in de buurt. Wij zijn op 10 december naar De Rijp 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.



*Figuur 1 Het landstuk waar wij mochten vliegen*



*Figuur 3 Voorverkenning, met het roeibootje opzoek naar een schikte testlocatie*



*Figuur 2 Laatste besprekingen over veiligheid voor het vliegen.*

## Elektronica

### Electronic speed controller

Een Electronic Speed Controller, ook wel bekend als ESC helpt met de regeling van een borstel loze 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 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 onze doeleinde meer dan genoeg.



### Motor

Er bestaan twee verschillende soorten elektrische motoren voor modelvliegtuigen, namelijk: geborstelde motoren en borstel loze motoren. De voor- en nadelen van de borstel loze motor maken de keuze zeer makkelijk. Voordelen van borstel loze: makkelijker te onderhouden, efficiënter en een langere levensduur. De nadelen van een borstel loze motor is voornamelijk de prijs, de borstel loze motor is een stuk nieuwer en vereist in tegenstelling tot zijn voorganger ook een ESC, dit zorgt ervoor dat de kosten 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 voor een 750KV motor gekozen. 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 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 het de propeller kan lever maar ook hoe meer



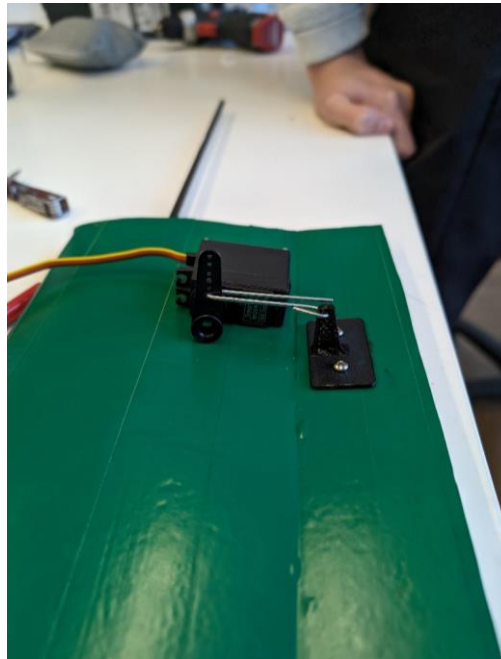
weerstand hij levert. (Podsędkowski et al., 2020) Wij hebben de pitch kunnen berekenen door middel van een reken tool gemaakt door rcplanes.online.

## 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 opmerkt tussen het referentiesignaal en stuursignaal zal hij gaan draaien. De meest servo's kunnen 180 graden draaien, dit zijn ook degene die we gebruiken. Er bestaan ook servo's die 360 graden kunnen draaien die 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. Deze twee servo's zorgen er ook voor dat het vliegtuig op en neer kan bewegen. De derde servo werkt in samenwerking met de ailerons om te stijgen en te 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.





## Batterij

Er bestaan veel verschillende accutechnieken, bijvoorbeeld: LiFe, LiPo, NiZn, 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. Je kunt de verschillende energiedichtheden zien in de tabel 1.

Wij hebben voor de zippy compact gekozen. 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

Ampere het vliegtuig gemiddeld gebruikt kan worden uitgerekend hoelang 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 verbruikt 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 voor dat hij helemaal leeg is. Vanwege 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.

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 voltage 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

Batterij techniek	Wh/Kg
LiFe	100-120 Wh/Kg
LiPo	140-200 Wh/Kg
NiZn	55-85 Wh/Kg
NiMH	30-80 Wh/Kg

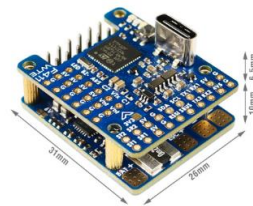
*Tabel 1 Verschillende energiedichtheden voor verschillend batterij technieken*



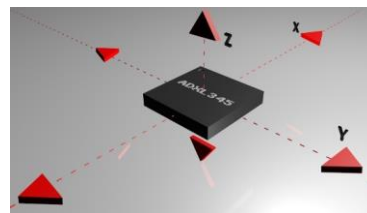
**Met opmerkingen [SB1]:** Ik zal proberen bronnen behalve wikipedia te vinden voor de energie dichtheid

## Flight controller

Wij zijn na onze eerste test vlucht 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.



Een van de belangrijkste is de IMU dit staat voor Inertial Measurement Unit. Dit is een sensor met drie ingebouwde sensoren die de veranderingen van positie van het vliegtuig in drie dimensies kan waarnemen. Een van de belangrijkste is de versnellingsmeter deze kan namelijk de versnelling meten op de X, Z en Y as. De versnellingsmeter werkt in combinatie met de gyroscoop. De gyroscoop meet de rotatiesnelheid op elk van de drie assen: X, Z en Y. Met deze data en de correcte software kunnen de servo's de correcte informatie krijgen om minimale aanpassingen te maken zodat het vliegtuig gestabiliseerd wordt.




Naast een IMU bevat de flight controller ook een barometrische druksensor. Met behulp van de barometrische sensor kan de flight controller bepalen hoe hoog het vliegtuig is. Afhankelijk van welke software de gebruiker er op zet kan met behulp van deze informatie de koers van het vliegtuig zo worden aangepast dat hij binnen de wettelijk limieten vliegt.

De software die wij zullen gebruiken voor onze flight controller heet INAV. Dit is een programma gemaakt door de INAV Fixed Wing Group een open source project. Deze software maakt het instellen en configureren van de flight controller zeer makkelijk. Ook is het mogelijk met deze software verschillende automatiseringen in te bouwen. Een belangrijkste is RTH ook wel bekend als return to home. Dit zorgt ervoor dat wanneer er weinig stroom is of de verbinding met de piloot verbroken wordt hij automatisch teruggaat naar zijn begin coördinaten.

## 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 kan 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 lucht kwaliteit kan uitlezen.

De lucht sensor die wij gebruiken is de MQ135. De MQ135 is in staat om verschillende stoffen in de lucht te meten. Wij gaan voor onze data voornamelijk focussen op de hoeveelheid: ammoniak (NH<sub>3</sub>), methaan (CH<sub>4</sub>), en koolstof mono en dioxide (CO, CO<sub>2</sub>) die zich in lucht bevindt. Als je de waardes uitleest kan er worden bepaald of er ergens rook vandaan komt.

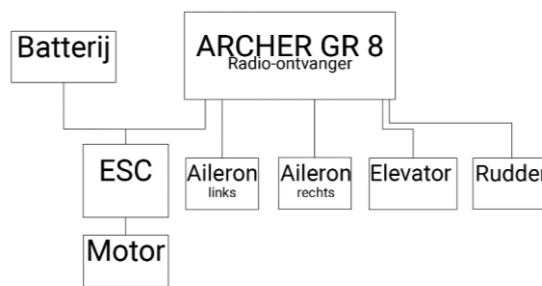
De GPS-sensor die wij gebruiken is de GY-NEO6MV2. Dit is een relatief goedkope gps-module die geschikt is voor de microcontroller die wij gebruiken. De gps-sensor kan zijn locatie bepalen door met verschillende gps-satellieten die om de aarde heen draaien te communiceren. Naast de coördinaten ontvangt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

## Radiotechniek

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

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 die is verbonden met de



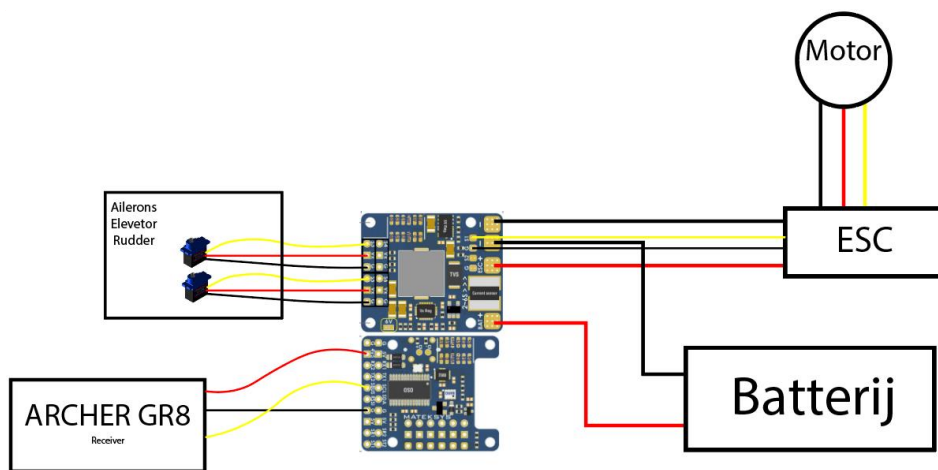
*Figuur 4 (hoe zijn radio-ontvanger is verbonden aan alle onderdelen in het vliegtuig.)*

motor en dan een kanaal per servo de 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 in het geval dat het zou blijken dat er meer kanalen nodig hadden. 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 een 27MHz geweest. 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 amateur gebruik 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 ander industrieën.

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



**Met opmerkingen [SB2]:** Weet jij waar en hoe ik dit mogelijk kan verwerken

## Ontwerp

### 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 vast staat 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 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 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 voor meer voor de gebruikelijke manier, waarbij je een romp met daaraan de vleugels hebt.

Daarnaast is het belangrijk om de positie van de motor te bepalen. Ga je voor een zogenaamde "pusher configuratie" (figuur 3) wat inhoudt dat de motor zich aan de achterkant bevindt of toch voor de traditionele manier (figuur 2). 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 3 Pusher configuration



Figuur 2 Puller configuration

## Ontwerp keuzes

Nu hebben we een grof idee hoe we dit vliegtuig vorm gaan geven kunnen we 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 komt dus de motor, vleugel, batterij en andere belangrijke elektronica.

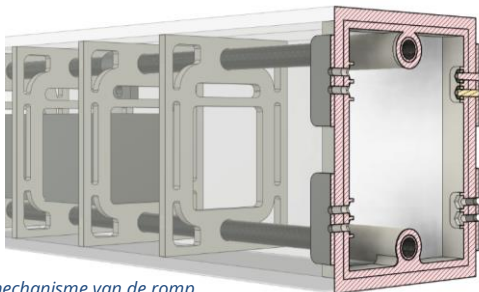
Grofweg bestaat het vliegtuig uit drie stukken. De vleugel, de romp en de stabilizer. De romp is veruit het meest complexe component.

## 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 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 lijden.

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 foam board behuizing. We klemmen die vast aan de voorkant bij de neus. Zie figuur 4. 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.

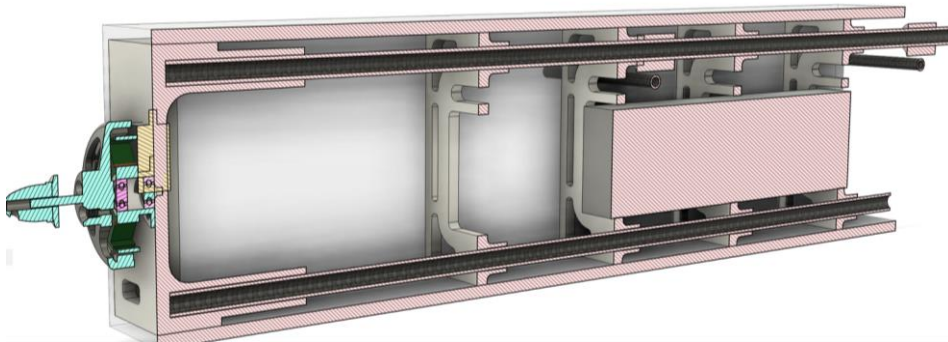
Ten derde moesten we rekening houden met de voorwaartse kracht die de motor genereert en de trillingen die hierbij komen kijken. Daarom wordt de neus van het vliegtuig ge-3D-print. Dit omdat we daarmee goed de carbon buizen kunnen bevestigen en we trillingen kunnen opvangen.



Figuur 4 Klem mechanisme van de romp



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 ze batterij niet in horizontale richting gaat schuiven. Deze supports hebben we aan de centrale buizen gemonteerd. Om stevig te maken hebben we voor de montage gebruik gemaakt van een combinatie van twee componenten lijm en hot glue.



Figuur 5 Dwarsdoorsnede romp

Op dit punt hadden we even een korte evaluatie. Zijn er krachten die werken of het frame waar we geen rekening mee hebben gehouden. We besloten mijn vader 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 onderin 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 5.

### 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 12cm. Met die eigenschappen kunnen we een vleugel produceren die in theorie voldoende liftkracht leveren kan. 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.

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

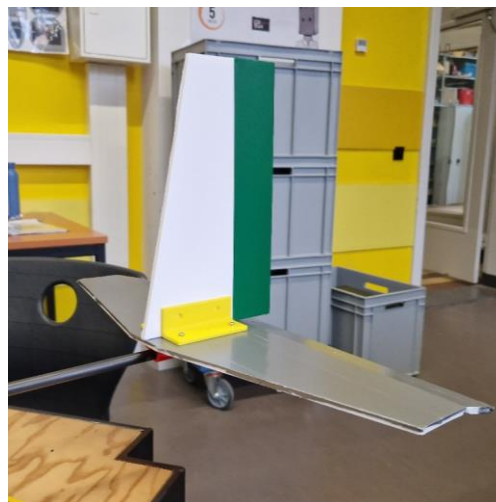
We gaan uit van een cruise snelheid van 11.1 m/s. Volgens het KNMI is de luchtdichtheid in Nederland gemiddeld  $1.3\text{kg/m}^3$ . Via [airfoiltools.com](http://airfoiltools.com) hebben we een vergelijkbare vleugel vorm gekozen die lijkt op ons foam ontwerp. We vonden dan op de geplande angle of attack van  $4^\circ$  een lift coëfficiënt  $C_l$  van 0.8. We hebben vleugel met een cord van 12cm met daarbij nog de aileron en gaan dus uit van 14cm. Met een spanwijdte van 160cm komen we uit op een vleugel oppervlakte van  $0.224\text{m}^2$ . Na het invullen van de formule komen we uit op een lift kracht 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 laatst hebben we ons bezig gehouden met de stabilisator, de achternvleugel 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 3d prints vast te klemmen aan de buis. Zie figuur

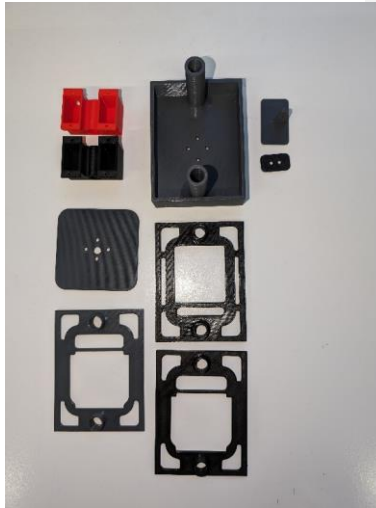


## Materiaalkeuze

Voor dit vliegtuig hebben we van verschillende materialen gebruik gemaakt. PLA een 3d print baar plastic vormt een belangrijk onderdeel van ons vliegtuig. Maar ook de foamboard platen en carbon fiber spelen een rol. Maar waarom hebben we deze materialen eigenlijk gekozen?

### PLA

PLA is het meest gebruikt 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 voor de 3d printer gekozen. 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 tijdspan 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 redelijk 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 op 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.

### Carbon Fiber

Voor de centrale buis hebben we voor carbon fiber gekozen. Carbon fiber of koolstofvezel is een relatief nieuw materiaal met hele gunstige mechanische eigenschappen. Carbon fiber bestaat uit een groot aantal vezels zie in de lengte richting parallel aan elkaar lopen.

Deze vezels zijn zeer klein, tussen de 6  $\mu\text{m}$  en de 10  $\mu\text{m}$ . 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 modder en bijvoorbeeld 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 stablizer. 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 schikte 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 echt beter buigbaar. Daardoor is het mogelijk om betere vormen te maken. Voor een vleugel is het belangrijk een mooie vloeiend vorm te hebben. Depron stelt ons in staat dit makkelijker te realiseren.

### Ontwerpcyclus

Op ons ontwerpproces is natuurlijk 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 keuzes die we later moeten maken. Grote van batterij, stroomverbruik motor, gewicht en vleugelvorm.

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 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 7. Toen dit klaar was zijn we gaan bedenken hoe we de vleugel willen bevestigen zie figuur 6. 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 6 Het vliegtuig bijna klaar*



*Figuur 7 Werken aan de romp*

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

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 5 Vliegtuig raakt onbestuurbaar doordat de vleugel verticaal staat ten opzichte van horizon*

hebben. Eveneens vindt er door de draai richting van de motor, naar rechts een rollende kracht naar links plaats. Voor het 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 corrigerend van de rol als piloot zijnde 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 tijdspan van een seconden moeten er tientallen kleine besturingen worden gedaan. Praktische 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.

## Testvluchten

Wij hebben naar 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 naar 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 bestuurdde het vliegtuig. Samuel had het gevoel dat het vliegtuig genoeg kracht zou hebben en gooide het vliegtuig. Echter was de motor nog niet op 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 licht beschadigingen. Wij hebben de schade snel kunnen repareren hierdoor hebben wij kort erna een tweede vlucht kunnen uitvoeren.





## 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 overcompenseerde waardoor het vliegtuig in een stall 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 controller verloor. Hij is uiteindelijk in het riet beland en alleen de motor is nat geworden. Er waren een aantal spetter op de rest van het vliegtuig.



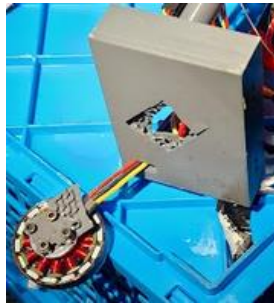
Wij hebben snel alles uit elkaar gehaald en gezorgd dat het mooi droog was en er geen kortsluiting kan plaats vinden. Na dat wij zeker waren dat alles droog was en er geen kortsluiting was hebben wij besloten om alles een laatste keer samen te bouwen.

## 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 mogelijk verwarring van de besturing van het vliegtuig is hij nog een keer gecrashte.

Dit is was de heftigste crash en tegelijk ook de laatste. Tijdens de crash is de accu losgekomen van zijn bevestiging waardoor hij naar voor 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 figuur 6. Ook is de

rudder afgebroken bij de crash zoals in figuur 7 te zien is. Door de impact van de crash zijn ook de servo's die op de vluegels lagen los gekomen.



Figuur 6



Figuur 7

Al met al waren het succesvolle vluchten het heeft ons laten zien dat het vliegtuig vliegen kan. Ook hebben deze testvluchten ons de fouten van ons ontwerp laten zien waardoor wij hopelijk in een tweede versie de fouten hebben verbeterd en een stap dichterbij dat hij lange afstanden kan vliegen.

## Conclusie

Kortom, we hebben heel veel kunnen leren. En de hoofdvragen kunnen beantwoorden. Want ja, het is mogelijk als middelbare scholier een modelvliegtuig te ontwerpen. Er komt heel veel bij kijken. Electronica, mechanica, natuurkundige principes, wetten en veiligheid. Op elk van deze gebieden hebben we veel geleerd. We weten hoe we met elektronica moeten werken, ook met hogere stroomsterktes en gevaarlijke componenten zoals de batterij. We weten hoe we in Fusion 360 een ontwerp kunnen maken en het vervolgens met 3d printers en normaal gereedschap in realiteit te brengen. Maar ook hebben we veel kunnen leren over de wetgeving en veiligheid. Al met al hebben we dus veel geleerd en spreek ik voor ons beide als ik zeg dat we het leuk vonden met dit PWS bezig te zijn.

## Nawoord Samuel Bachmann

Thijs en ik hebben de afgelopen zes jaar velen projecten op school uitgevoerd. Sommige 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 doet. Ik ben ook zeer blij met het product wat wij hebben kunnen leveren, ondanks dat het nog niet aanzijn einddoel voldoet. Onze eerste testvlucht is een beetje als de bekende meme “task failed succesfully”.

## Nawoord Thijs den Hartog

Al sinds de 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 ook 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. Het bouwen van een modelvliegtuig is niet niks. Maar doordat we ons beide veel hebben ingezet zijn we heel ver gekomen. Dit heeft mij positief verrast.

De samenwerking verliep vanuit mijn oogpunt goed, zo nu en dan was er een meningsverschil maar altijd kwam er een middenweg. We hadden een goede communicatie, en belde vaak als we nieuwe ideeën hadden.

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.

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 klaar gestaan 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 “troostwafels” 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 testdag 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 test aanwezig zijn, maar voor de v2 zien we hem heel graag als toeschouwer!



**Arie Reihm** – 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

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

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

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>

Podszkadowski, 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>

<https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/publicaties/2023/05/25/wijzigingsproces-luchtruim-en-vliegprocedures/lenW+Criteria+Catalogus+Luchtruim.pdf>

[https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/665750/azu\\_etd\\_hr\\_2022\\_0030\\_sip1\\_m.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/665750/azu_etd_hr_2022_0030_sip1_m.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[https://rcplanes.online/calc\\_motor.htm](https://rcplanes.online/calc_motor.htm)

[Lithium polymer battery - Wikipedia](#)

[Lithium iron phosphate battery - Wikipedia](#)

[Comparison of commercial battery types - Wikipedia](#)

<https://www.datasheethub.com/wp-content/uploads/2022/08/NEO6MV2-GPS-Module-Datasheet.pdf>

<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/lifteq.html>

<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=dormoy-il>

<https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/lichte-lucht-zware-lucht>

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7763237/>

<https://decorrespondent.nl/11040/alles-wat-je-moet-weten-over-militaire-drones/952a371b-04f2-081b-3880-7feb15d632c3>



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

<https://eu.statesmanjournal.com/story/news/2018/08/11/southern-oregon-wildfires-after-dark-drone-best-friend-firefighter-could-have/969268002/>