

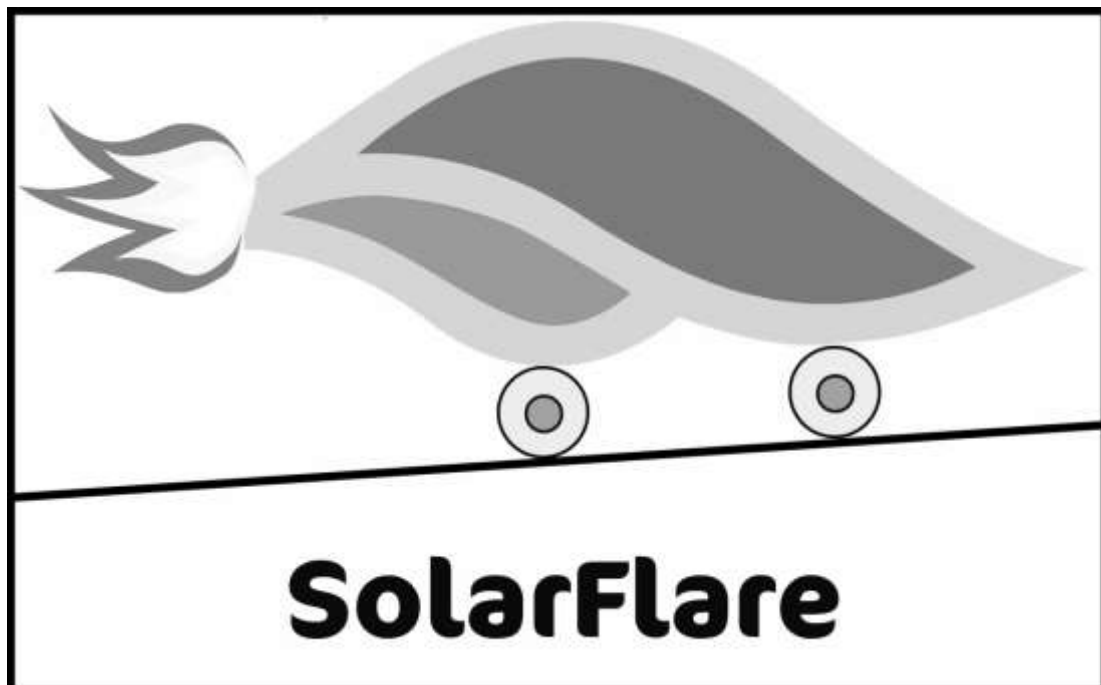
# 2011- 2012

Sus Benoit, Zeger Boels, Sam Laermans, Joris Vandebosch, Sander Vanvuchelen, Jason Verheulpen, Raphaël Weuts, Lennert Wouters

Internationale Hogeschool  
Leuven Engineering College  
Groep T

**GROEP T**

  
UMICORE  
SOLAR TEAM



**[EE4: CASE SSV]**

2de Bachelor Industriële Wetenschappen PM4



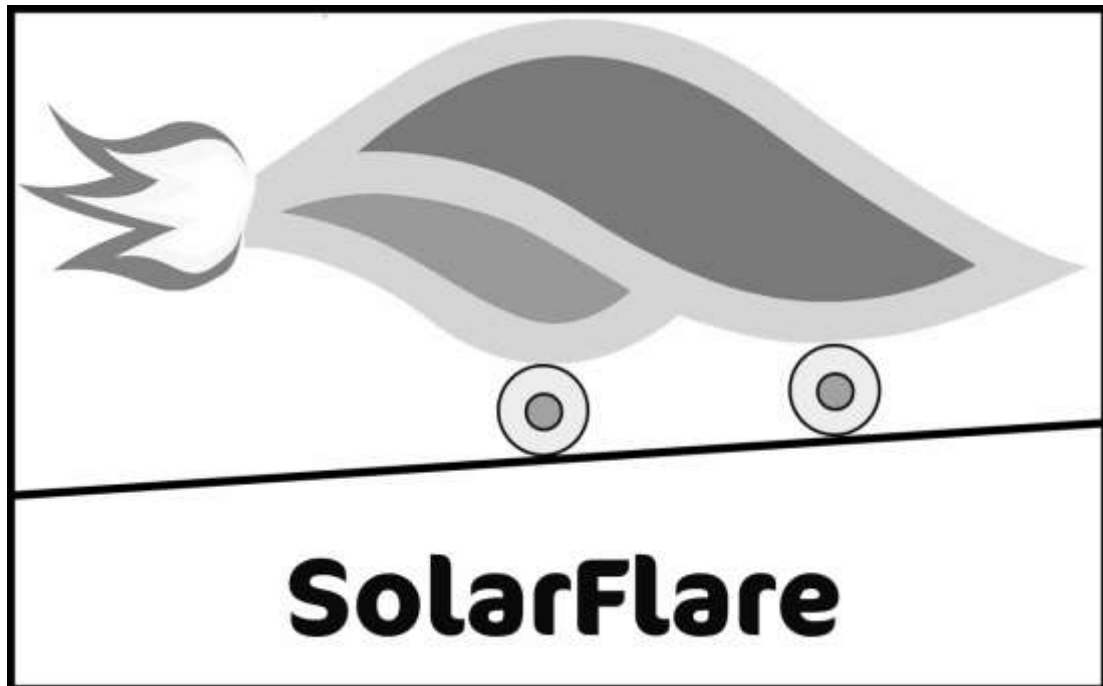
2011-  
2012

Sus Benoit, Zeger Boels, Sam Laermans, Joris Vandebosch, Sander Vanvuchelen, Jason Verheulpen, Raphaël Weuts, Lennert Wouters

Internationale Hogeschool  
Leuven Engineering College  
Groep T

**GROEP T**

  
UMICORE  
SOLAR TEAM



**[EE4: CASE SSV]**

2de Bachelor Industriële Wetenschappen PM4

# Inhoud

Inhoud .....	IV
Figurenlijst .....	VI
Voorwoord .....	VII
Inleiding .....	1
1 Analyse zonnepaneel.....	2
1.1 U-I-karakteristiek zonnepaneel .....	2
2 Gear-ratio .....	4
2.1 Ideale gear ratio .....	4
3 <i>Simulink</i> .....	9
3.1 Opbouw .....	9
3.2 Simulatie.....	11
3.3 Simulatie in vrijloop.....	12
4 Sankey diagrammen voor de testrit .....	14
4.1 Sankey diagram bij topsnelheid .....	14
4.2 Sankey diagram na 4 meter.....	18
5 Sankey diagrammen na de testrit .....	20
5.1 Sankey diagram bij topsnelheid .....	20
5.2 Sankey diagram na 4 meter.....	23
6 Sankey diagrammen Umicar 2009 .....	26
6.1 Sankey diagram bij topsnelheid .....	26
6.2 Sankey diagram bij halve topsnelheid.....	30
7 Design .....	32
7.1 Frame.....	32
7.2 Wielen .....	33
7.2.1 Achterwielen .....	33
7.2.2 Voorwielen .....	33
7.3 Geleiding.....	34
8 Spanningen op het zonnepaneel.....	35
8.1 Krachten .....	35
8.1.1 Krachtenberekening .....	35
8.2 Vereenvoudiging .....	37
8.3 Dwarskrachten- en momentendiagram .....	38
8.4 Maximale buigspanning .....	40

8.5	Maximale afschuifspanning.....	40
8.6	Maximale rek.....	41
8.6.1	Maximale rek voor de onderkant van het zonnepaneel .....	41
8.6.2	Maximale rek voor de bovenkant van het zonnepaneel.....	42
Bijlagen .....		43
Bijlage 1: Simulink totaal schema.....		43
Bijlage 2: Energy function – parameters .....		44
Bijlage 3: Energy fuction.....		45
Bijlage 4: Energy solver.....		46
Bijlage 5: Function .....		46
Bijlage 6: Excel uitzetten afstands- en snelheidsgrafieken .....		47
Bijlage 7: Berekening van de weerstandskrachten .....		48
Bijlage 8: Technische tekening van de Umicar .....		50
Bijlage 9: Lagrange vergelijking .....		51
Bijlage 10: Budgettering .....		52
Bijlage 11: Technische tekening .....		53

## Figurenlijst

Figuur 1 - Zonnepaneel U-I-grafiek.....	2
Figuur 2 - Werkelijk vermogen .....	3
Figuur 3 - Matlab simulatie gear ratio 6 .....	6
Figuur 4 - Parcours en gear ratio's.....	6
Figuur 5 - <i>Matlab</i> Simulatie gear ratio 13 .....	7
Figuur 6 - Gear ratio Simulink simulatie .....	8
Figuur 7 - Elektrisch gedeelte Simulink .....	9
Figuur 8 - Mechanische deel (vereenvoudigd).....	10
Figuur 9 - Lucht- en rolweerstand, variabele gear-ratio , snelheidsberekening + hellingen.....	11
Figuur 10 - Afgelegde weg.....	12
Figuur 11 - Snelheid.....	12
Figuur 12 - Afgelegde weg in vrijloop.....	13
Figuur 13 - Snelheid in vrijloop.....	13
Figuur 14 - Het werkingpunt van de motor bij maximale snelheid .....	15
Figuur 15 - Sankey diagram bij topsnelheid .....	17
Figuur 16 - Sankey diagram na 4m .....	19
Figuur 17 - Sankey diagram bij topsnelheid na testrit .....	22
Figuur 18 - Sankey diagram na 4 meter na testrit.....	25
Figuur 19 - Sankey diagram van de umicar bij topsnelheid .....	29
Figuur 20 - Sankey diagram van de Umicar bij halve topsnelheid .....	31
Figuur 21 - Onderkant frame.....	32
Figuur 22 - Achterwiel .....	33
Figuur 23 - Voorwiel .....	33
Figuur 24 - De krachten op het zonnepaneel.....	35
Figuur 25 - Vereenvoudigd krachtendiagram.....	37
Figuur 26 - Berekeningen van het dwarskrachtendiagram .....	38
Figuur 27 - Het dwarskrachtendiagram.....	38
Figuur 28 - De berekeningen van het momentendiagram .....	39
Figuur 29 - Het momentendiagram.....	39
Figuur 30 - Schets voor berekening maximaal statisch moment .....	40
Figuur 31 - Schets van het zonnepaneel .....	42
Tabel 1: In te vullen waarden voor simulatie in Matlab.....	5

## Voorwoord

Elk jaar krijgen de studenten aan Groep T in hun tweede bachelorjaar de kans om hun kennis van mechanische transmissies, elektrische schema's en zonnepanelen bij te schaven. Dit gebeurt in het kader van het vierde engineering experience project (EE4). Dit EE4 project houdt het bouwen van een kleine zonnewagen in, waarbij de accenten gelegd kunnen worden op snelheid, innovativiteit en originaliteit. Wij hebben als team besloten om ons te focussen op innovatie en snelheid bij het bouwen van een Small Solar Vehicle (SSV). Dit doen we met materialen die we via *Fablab* hebben aangekocht.

De teamnaam SolarFlare vloeide voort uit een brainstormsessie en is gebaseerd op de aandrijving van de SSV door de zon. Een zonnepaneel drijft de DC motor van de SSV aan, die op zijn beurt doormiddel van mechanische transmissie en een versnellingsapparaat de wielen doet draaien. Dit proces simuleren we in Matlab met behulp van *Simulink*.

De verliezen in de SSV en in de Umicar van het Solar Team 2009 analyseren we met behulp van Sankey diagrammen. Hierbij moeten we rekening houden met de luchtweerstand, weerstand van de ondergrond en andere energieverliezen. In dit verslag zal het denkwerk en de probleemanalyse terug te vinden zijn van de bouw van het SSV alsook de analyses voor en na de testfasen.

Om het project tot een goed eind te brengen, hebben we assistentie gekregen van onze coach Peter Slaets, waarvoor we hem ook willen bedanken. Hij leidde het project in goede banen en zorgde dat we steeds op de hoogte waren van de komende deadlines.

- Team SolarFlare .

## **Inleiding**

In opdracht van het Umicore Solar Team wordt een SSV ontwikkeld die een gekend traject moet afleggen. Het traject bestaat uit een dalend, een horizontaal en een stijgend stuk en is in totaal veertien meter lang. De SSV, die volledig door zonne-energie aangedreven wordt, dingt mee naar de prijs van innovativiteit en snelheid. Het zonnepaneel en de motor worden geleverd door Groep T, de rest van de benodigde materialen moeten worden aangekocht.

Dit verslag gaat over het volledige projectverloop van het team SolarFlare. Het bevat de verschillende deelstappen van het project samen met enkele problemen en hun oplossing.

Het eerste hoofdstuk behandelt de analyse van het gegeven zonnepaneel, samen met de U-I-grafiek en de berekende diodefactor. Deze factor is typisch voor een dergelijk zonnepaneel. Deze gegevens laten toe de gear ratio te bepalen en dit alles te simuleren in *Simulink*. Deze zijn respectievelijk terug te vinden in het tweede en het derde hoofdstuk.

Vervolgens wordt de SSV ook geanalyseerd op basis van de verliezen, wat resulteert in vier Sankey diagrammen. Twee Sankey diagrammen worden voor de testrit opgesteld, twee meer correcte versies worden na de testrit bijgevoegd. Ook wordt tijdens case twee het Sankey diagram van de Umicar 2009 opgesteld. Deze worden respectievelijk besproken in het vierde, vijfde en het zesde hoofdstuk. Het voorlaatste hoofdstuk handelt over de materiaalkeuze en de effectieve bouw van het wagentje. Het laatste hoofdstuk is geweid aan de spanningen en krachten die inwerken op het zonnepaneel.

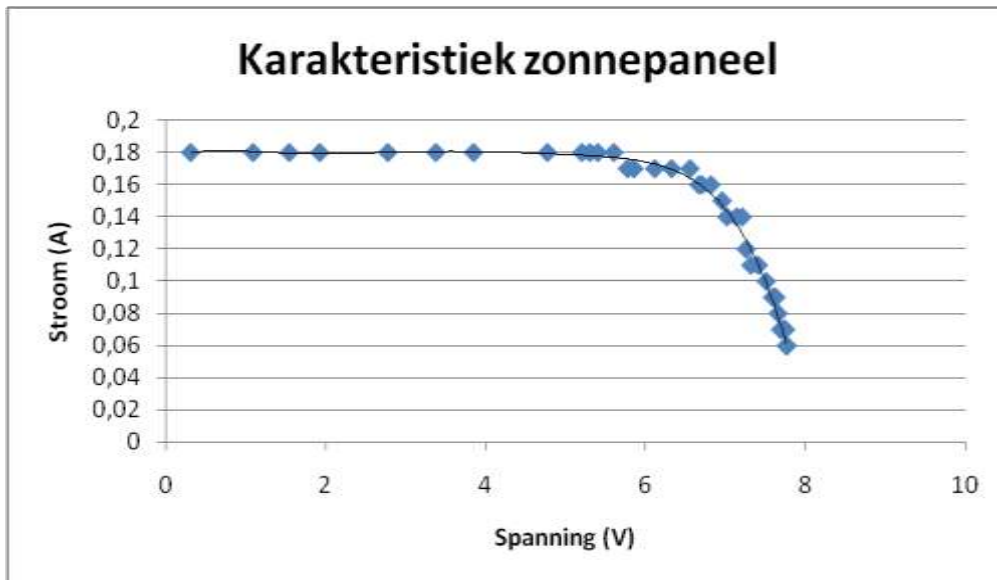
Het verslag gaat gepaard met veel onderzoek en denkwerk. Niet alles kan in het rapport omvat worden en daarom zijn er bij dit rapport enkele bijlagen toegevoegd. Deze zijn helemaal achteraan terug te vinden.



# 1 Analyse zonnepaneel

In dit hoofdstuk wordt de zonnepaneelkarakteristiek aan de hand van een halogeenlamp opgesteld. De bekomen waarden verschillen dus van de effectieve waarden bij zonne-energie. Dit zorgde in het begin voor problemen aangezien de gear ratio's berekend werden met de gemeten waarden in plaats van de waarden die gehaald worden bij zonlicht van  $800\text{W/m}^2$ .

## 1.1 U-I-karakteristiek zonnepaneel



Figuur 1 - Zonnepaneel U-I-grafiek

In bovenstaande grafiek (figuur 2) staat de stroom in functie van de spanning. Zo krijgt men een overzicht van op welk punt de stroom begint te dalen naarmate de spanning stijgt. Aan de hand van deze gegevens wordt de diodefactor "m" berekend. Dit gebeurt door de gemeten stroomwaarden te vergelijken met de theoretische stromen en door gebruik te maken van volgende formule :

$$I = I_{sc} - I_s * \left( e^{\frac{U}{m * N * U_r}} - 1 \right)$$

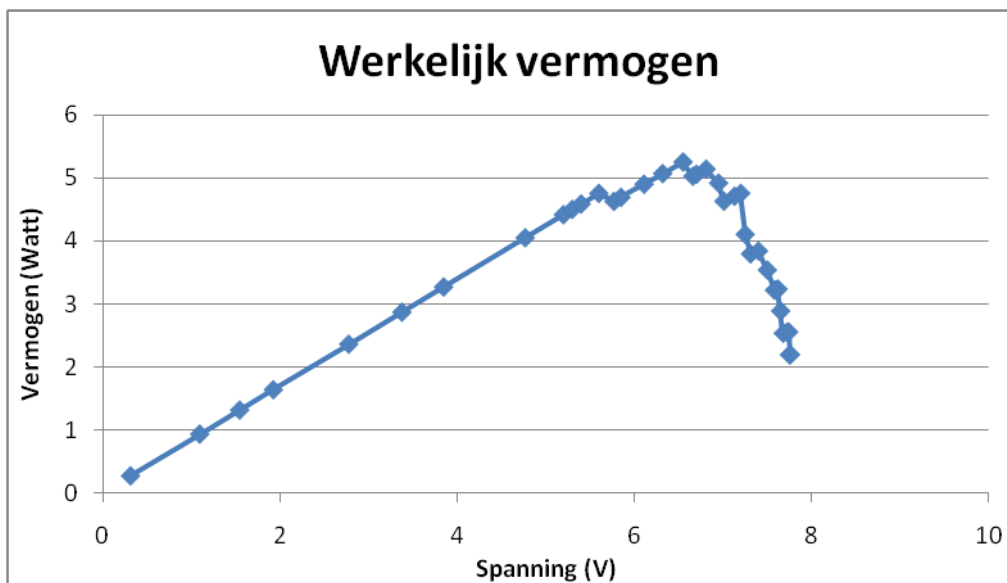
Volgende waarden worden gegeven tijdens de seminars:

- $I_s$  (saturatiestroom) =  $1 * 10^{-8} \frac{A}{m^2}$
- $U_r$  (thermisch voltage) = 25,7mV bij 25°C
- $N$  (aantal zonnecellen in serie) = 15

Volgende waarden worden berekend:

- $I_{sc}(\text{kortsluitstroom}) = 0,18A$
- $m(\text{diodefactor}) = 1,23$

De 'm' waarde wordt aangepast gaande van 1,10 tot 1,25. Aan de hand van deze 'm' waarde worden de bijhorende stromen berekend en deze worden vergeleken met de gemeten (werkelijke) stroom. De diodefactor waarbij deze twee stromen het dichtste bij elkaar liggen is de meest correcte diodefactor. Deze blijkt uiteindelijk 1,23 te bedragen.



**Figuur 3 - Werkelijk vermogen**

Het werkelijk vermogen wordt bepaald door de stroomwaarden aan te passen. Dit gebeurt door de gemeten stroomwaarden te schalen zodat de kortsluitstroom rond 0,85A ligt, wat bij volle zon het geval zou moeten zijn. Om dit te bekomen moet er vermenigvuldigd worden met 4,72 (=  $0,85A/0,18A$ ). Het ideaal vermogenspunt blijkt dan te liggen bij 6,55V en 0,80A (zie figuur 2) en bij 5,25 Watt.

## 2 Gear-ratio

De Gear Ratio is de verhouding tussen de tandwielen die zorgen voor de overbrengen tussen de motor en de aandrijf as. Deze wordt berekend met volgende formule:

$$\text{Gear Ratio} = (\# \text{ tanden op gedreven wiel}) / (\# \text{ aantal tanden op drijvend wiel})$$

Het drijvend wiel is het tandwiel dat de energie van de motor rechtstreeks ontvangt en overbrengt naar het gedreven tandwiel. Het gedreven tandwiel zal de energie overbrengen op de achterste as (en dus op de achterwielen).

Om de ideale gear ratio te bepalen worden verschillende ratio's ingevuld in een *Matlab* simulatie en dit voor de verschillende onderdelen van het parcours. Hieruit wordt vervolgens de beste gear ratio gehaald door de grafieken te vergelijken. Voor deze simulatie worden veel waarden ingevuld die pas nauwkeurig gekend zijn na testen met de SSV. Er volgen bijgevolg enkele aannames die nader verklaard zullen worden.

### 2.1 Ideale gear ratio

Het parcours is opgedeeld in vijf verschillende onderdelen en de *Matlab* simulatie is aangepast zodat voor de verschillende onderdelen een aparte gear ratio ingevuld kan worden. Dit heeft als gevolg dat één simulatie het gehele parcours doorloopt met verschillende ratio's. Dit geeft een duidelijk beeld van het schakelen tijdens de race. Beide hellingen (van vier meter) zijn opgedeeld in twee stukken van twee meter. Het vlakke stuk wordt als één onderdeel beschouwd.

In tabel 1 zijn alle in te vullen grootheden terug te vinden. Enkel de niet constanten zullen nader besproken worden. De reeds besproken grootheden zullen niet meer besproken worden.

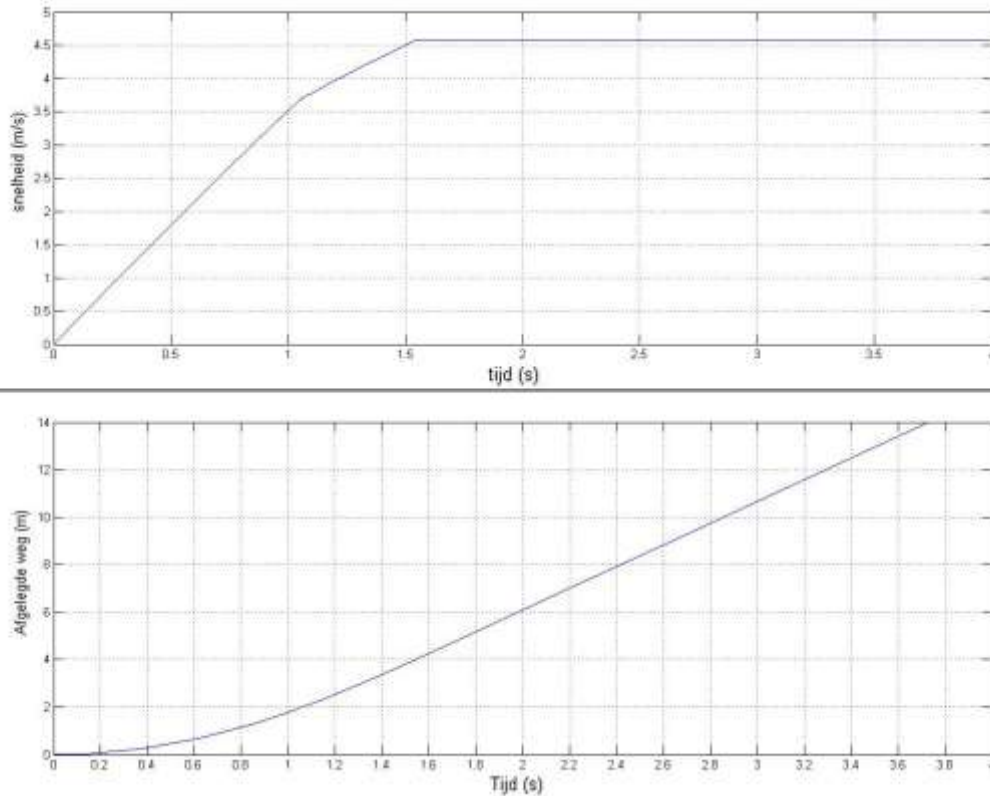
Het streefdoel is een zo licht mogelijke SSV, dus wordt het minimumgewicht van 750g als gewicht genomen. De diameter van het wiel is aangepast van 0,12 m naar 0,10 m na de eerste simulaties omdat dit betere resultaten gaf.

De kortsluitstroom moet naar boven geschaald worden aangezien de halogeenlamp in het labo niet evenveel energie kan leveren als de zon. De kortsluitstroom van 0,18A wordt vermenigvuldigd met 4,72 om een kortsluitstroom van 0,85A te bekomen.

**Tabel 2: In te vullen waarden voor simulatie in Matlab**

Grootheid	Waarde	Eenheid	
Hoek tov horizontaal	7,18	°	voor eerste onderdeel
Massa	0,75	kg	aanname
Valversnelling	9,81	m/s <sup>2</sup>	constante
Inverse speed constant	8,93E-04	V/rad	datasheet motor
Driving wheel diameter	0,10	m	zelf in te vullen
Rolweerstand coëfficiënt	0,012		aanname
Gear ratio 1	13		zelf in te vullen
Gear ratio 2	6		zelf in te vullen
Gear ratio 3	6		zelf in te vullen
Gear ratio 4	6		zelf in te vullen
Gear ratio 5	6		zelf in te vullen
Gear ratio 6	13		zelf in te vullen
Luchtweerstand coëfficiënt	0,5		aanname
Frontale oppervlakte	0,02	m <sup>2</sup>	aanname
Luchtdichtheid	1,293	kg/m <sup>3</sup>	constante
Short circuit current	0,85	A	aanname
Saturatie stroom	1,00E-08	A	datasheet diode
Terminal voltage	0,0257	V	meting
Diode factor	1,23		experimenteel bepaald
Aantal zonnecellen in serie	15		
Terminal resistance	3,32	Ω	Datasheet motor

De *Matlab* simulatie geeft als resultaat twee grafieken (zie figuur 4). Aan de hand van deze grafieken worden de ideale gear ratio's bepaald. De gear ratio's worden voor een groot deel bepaald door het doel (besparen op energie, explosiviteit, ...). In figuur 5 zijn de grafieken te zien voor het gehele parcours. In de bovenste grafiek wordt een topsnelheid van iets meer dan 4,5 m/s gehaald na 1,5 seconden. De onderste grafiek laat zien dat de afstand van twee meter (de lengte van het eerste deel van het parcours) afgelegd wordt in iets meer dan een seconde. De topsnelheid wordt dus nog niet bereikt op het moment dat er naar de volgende versnelling wordt geschakeld. Aan de hand van deze grafieken zal de SSV het volledige parcours afleggen in iets meer dan 3,7 seconden.



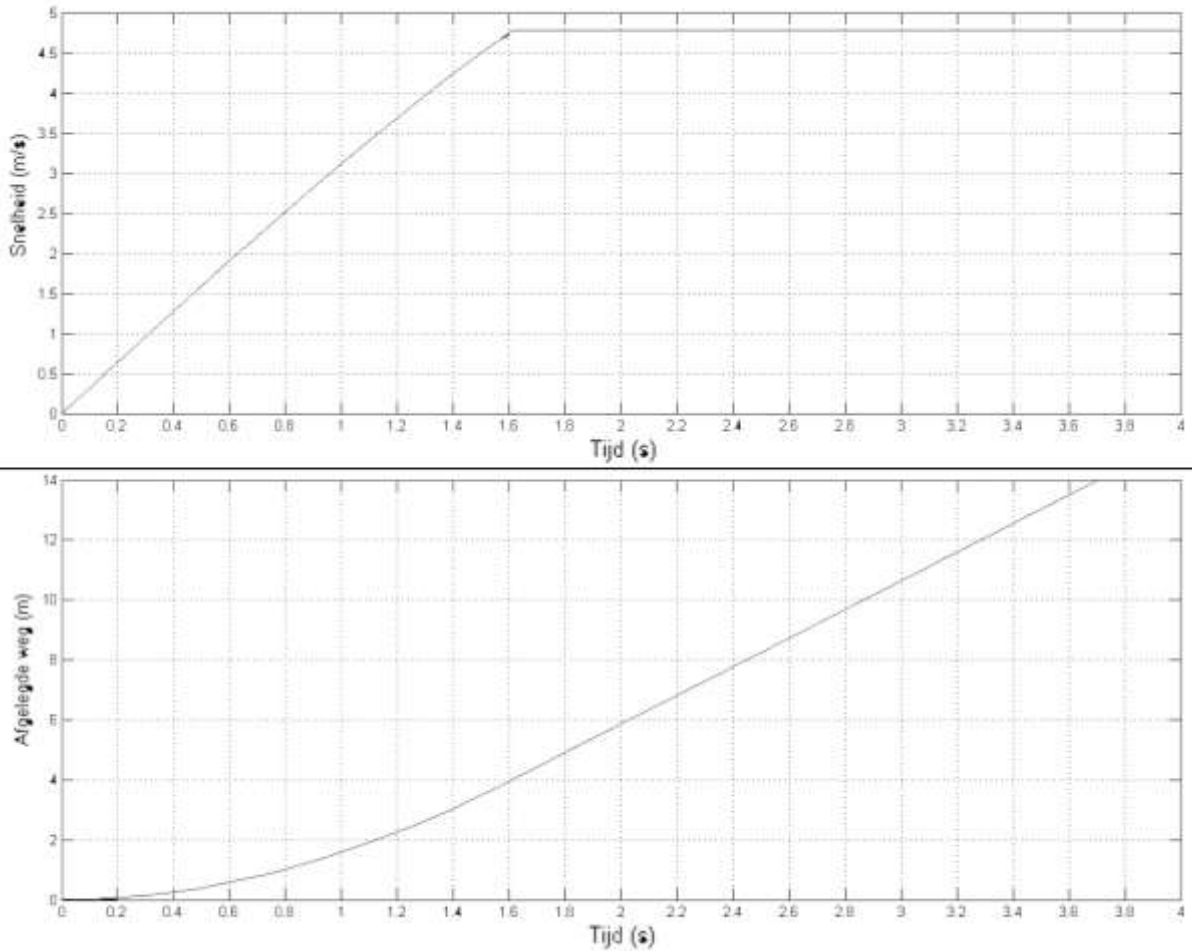
**Figuur 6 - Matlab simulatie gear ratio 6**

In figuur 7 staan alle gear ratio's per onderdeel. De opdeling van de helling in twee stukken van twee meter is een aanname. Het ideale schakelmoment zal later nog experimenteel bepaald worden. Om de wagen te versnellen bij het begin van de race is er meer kracht nodig om de wielen te laten draaien, aangezien deze nog stilstaan (of al traag een roterende beweging maken). Er is dus meer koppel nodig om te versnellen. Eenmaal de gewenste snelheid bereikt is, wordt er geschakeld naar een lagere ratio zodat er nog versneld kan worden. Op het einde zal er weer meer koppel nodig zijn om bergop te rijden, dus er zal geschakeld worden naar een hogere ratio op een nog experimenteel te bepalen afstand.



**Figuur 8 - Parcours en gear ratio's**

Ter vergelijking wordt hieronder het resultaat getoond indien over het gehele parcours een gear ratio van 13 aangehouden wordt. In figuur 9 zijn de grafieken te zien die de simulatie hebben opgeleverd. Het valt op dat er geen groot verschil te zien is in vergelijking met de ideale gear ratio's.



**Figuur 10 - Matlab Simulatie gear ratio 13**

De maximale snelheid (te zien in de bovenste grafiek) van meer dan 4,5 m/s is niet haalbaar aangezien het maximale toerental van de motor overschreden wordt. Dit is makkelijk aan te tonen via volgende berekeningen.

$$v_{max} = \frac{T * 2\pi r}{G_r * 60}$$

$$T = Max_{toerental} = 9000 \text{ rpm}$$

$$G_r = Gear \text{ ratio} = 13$$

$$r = \text{straal} = 0,05$$

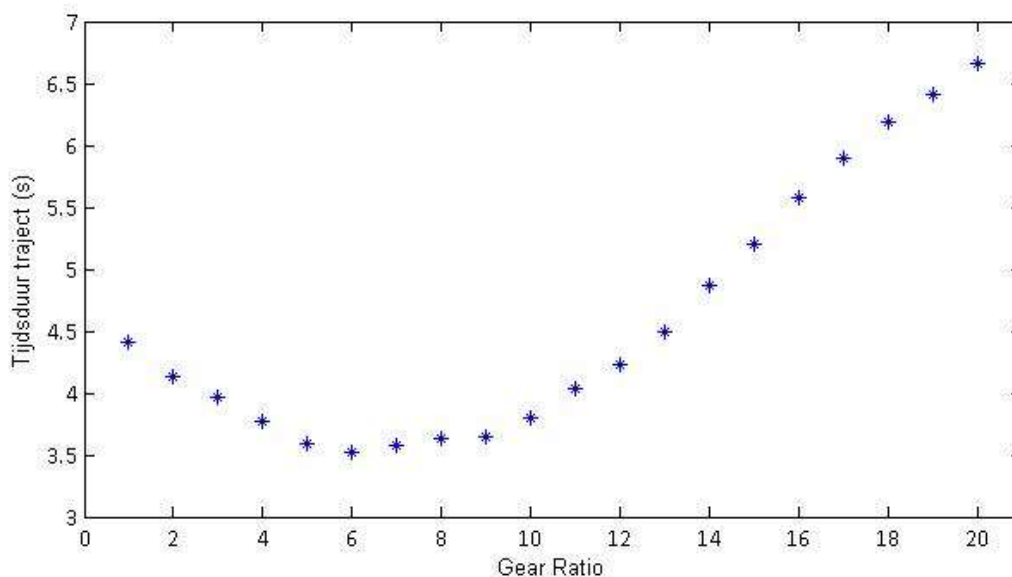
Na berekening bekomt men een  $v_{max}$  van  $3,6 \text{ m/s}$  bij een gear ratio van 13. Dit is in tegenspraak met bovenstaande grafieken en hieruit kan men afleiden dat andere gear ratio's nodig zijn. Op deze manier (trial-and-error) bekomt men de ideale gear ratio's van 6 en 13 die reeds besproken zijn.

Bij een gear ratio van 6 is de maximale snelheid berekend:

$$v_{max} = \frac{9000 * 2\pi * 0,05}{6 * 60} = 7,6 \frac{m}{s}$$

De maximale snelheid van  $4,5 \text{ m/s}$  is dus een realistische waarde.

Met *Simulink* is de ideale gear ratio ook te bepalen. Op figuur 11 zijn de verschillende trajecttijden te zien in functie van de gear ratio. Bij een gear ratio van 6 is er een duidelijk minimum te zien in de grafiek. Hier zou de trajecttijd, net zoals bij de *Matlab* simulatie, liggen rond  $3,7$  seconden.



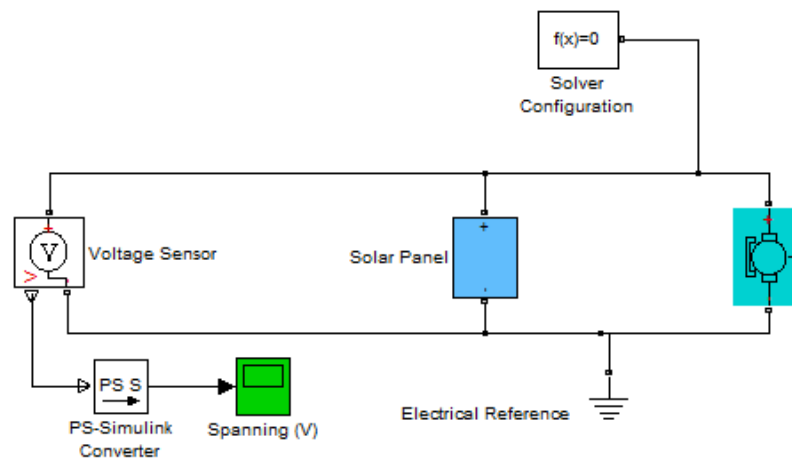
**Figuur 12 - Gear ratio Simulink simulatie**

### 3 Simulink

Om het gedrag van de zonnwagen te simuleren wordt *Simulink* gebruikt. Dit is een programma binnen *Matlab* dat toelaat op een visuele manier alle componenten van de zonnwagen en factoren die er invloed op hebben toe te voegen aan een simulatie. De simulatie wordt opgesplitst in enkele delen, het geheel is zichtbaar in bijlage 1.

#### 3.1 Opbouw

Als eerste wordt het elektrische gedeelte geïmplementeerd (figuur 13). Dit bestaat uit de elektrische motor, het zonnepaneel en de elektrische referentie. Om de spanning te meten over het zonnepaneel, wordt een 'voltage sensor' toegevoegd die wordt afgelezen door bijbehorende scope. Omdat in dit schema een differentiaalvergelijking bekomen wordt, moet een 'function solver' worden toegevoegd. Het zonnepaneel bestaat uit 15 zonnecellen die met elkaar in serie geplaatst zijn. Deze zitten geïmplementeerd in het subsystem 'Solar Panel', dit om alles overzichtelijk te houden. De laatste component is de DC motor. Deze bestaat uit twee delen, het elektrische en het mechanische (zie verder). In deze component zal de overgang van elektrische naar mechanische energie plaatsvinden. Het is dus noodzakelijk dat er met verschillende factoren rekening moet worden gehouden, zoals onder andere de koppelconstante van de motor, die uiteraard allemaal kunnen worden aangepast.

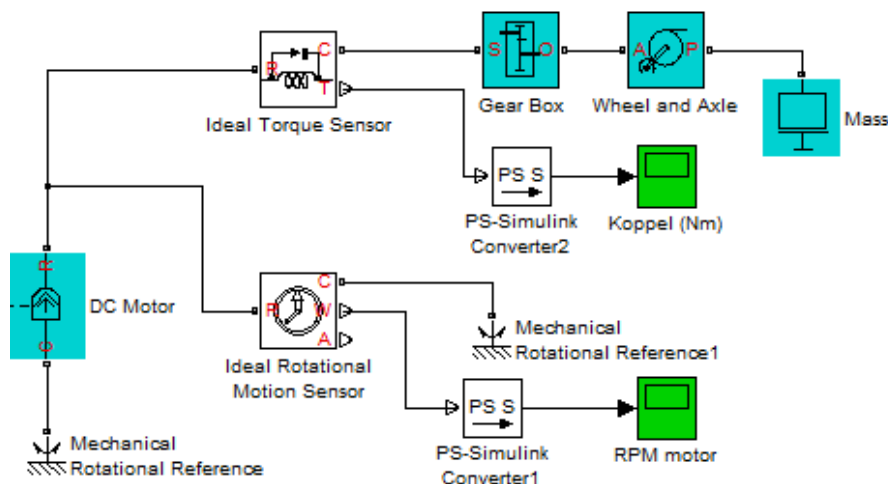


Figuur 14 - Elektrisch gedeelte Simulink

Het mechanische deel (figuur 15) is een stuk uitgebreider, hier wordt namelijk de mechanische energie overgezet naar de wielen en de massa. Uit het schema kunnen vier basiscomponenten herkend worden. De motor, de versnellingsbak, de assen met wielen en de volledige massa (in figuur 16 aangeduid in licht blauw). Dit zijn de mechanische eenheden en dus de basis van de simulatie. Alle andere componenten dienen ofwel om dingen te meten, ofwel om andere factoren in rekening te brengen zoals de luchtweerstand, rolweerstand, ... . Als eerste valt op dat de motor aan een



mechanische referentie hangt, in de praktijk is dit bijvoorbeeld het omhulsel van de motor. De rotatie zal dus ten opzichte van dit punt plaatsvinden. De volgende component is de versnellingsbak. Hier kan de eerder berekende 'gear ratio' in rekening gebracht worden. Deze hangt rechtstreeks aan de assen en de wielen. In deze component worden de wielen met een bepaalde straal gesimuleerd, deze laatste kan bijgevolg ook worden aangepast. De laatste mechanische component is de massa, hier wordt het gewicht en de beginsnelheid van de massa gedefinieerd.



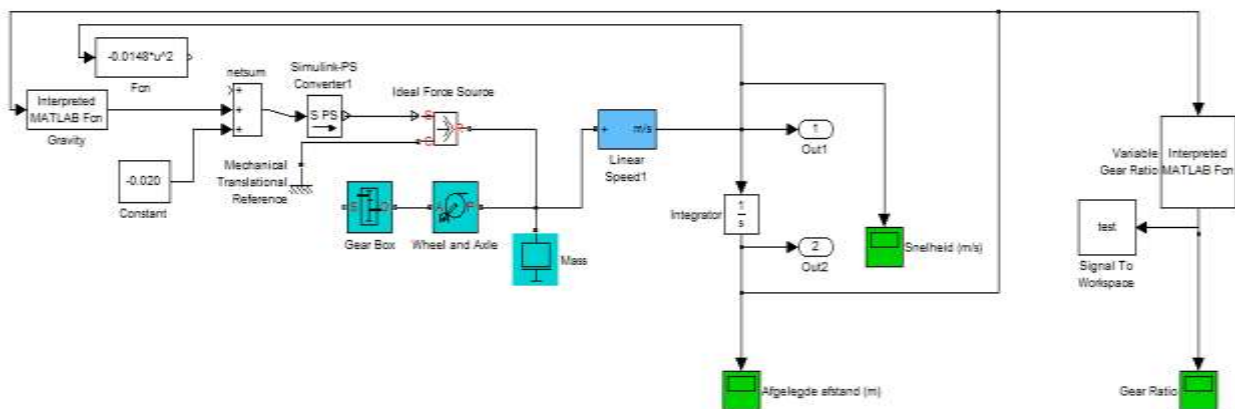
**Figuur 17 - Mechanische deel (vereenvoudigd)**

Om het koppel (in Nm) en de hoeksnelheid (in rpm) van de motor te bepalen zijn twee componenten ingevoerd: een 'Torque Sensor' en een 'Rotational Motion Sensor'. Beide worden als ideaal beschouwd omdat deze niet worden aangesloten in de praktijk en dus geen wrijvingskracht uitoefenen op de opstelling. De 'torque sensor' wordt tussen de motor en de versnellingsbak geplaatst omdat hiertussen het motorkoppel plaatsvindt. Deze wordt via een *PS-Simulink* convertor naar een scope vertaald. De 'rotational motion sensor' meet de hoeksnelheid van de motor (in rpm) en wordt op dezelfde manier naar een scope geschreven.

Verder kan men de componenten die lucht- en rolweerstand in rekening brengen onderscheiden (figuur 18). Deze hangen rechtstreeks aan de massa. De rolweerstand is een constante maar de luchtweerstand is afhankelijk van de snelheid, die berekend wordt door het 'Linear Speed' subsystem. Deze twee zijn bijgevolg verbonden, waardoor het resultaat van de snelheid in de formule voor luchtweerstand wordt ingevoerd. Dit moet op deze manier gebeuren omdat de luchtweerstand constant verandert afhankelijk van de snelheid en dus constant herberekend moet worden. Om praktische redenen zal deze in de eerste simulaties waarloost worden, om de simulatie vlotter te laten verlopen. Deze twee laatste waarden worden vervolgens opgeteld en vertaald naar een kracht. Omdat de krachten in de praktijk rechtsreeks plaatsvinden aan de massa worden ze ook in de simulatie aan de massa gehangen.

Een ander deel berekent de snelheid van de wagen zelf. Deze houdt rekening met alle factoren die eerder werden gedefinieerd en zal de snelheid in m/s kunnen bepalen aan de hand van alle gegevens door eerst de translationele verplaatsing te bepalen en die vervolgens om te zetten in snelheid. Hierna wordt geïntegreerd om de afgelegde weg te bekomen. Aan de hand van deze afgelegde weg kunnen de hellingen in rekening gebracht worden. Deze worden in een .m file gedefinieerd en teruggekoppeld naar de massa.

Het laatste deel is verantwoordelijk voor de variabele gear-ratio, die zal veranderen in functie van de afgelegde weg. In bijbehorende .m-file werd geprogrammeerd dat de gear-ratio de eerste en laatste twee meter van de baan gelijk is aan 13. Op het stuk ertussen bedraagt deze 6. Dit wordt constant uitgeschreven in een matrix waarvan het laatste getal het meest recente is. Dit laatste getal zal worden ingelezen in het Gearbox blok. De initiële gear-ratio, en dus het eerste element van de matrix, moet wel gedefinieerd worden in de *Matlab* file.

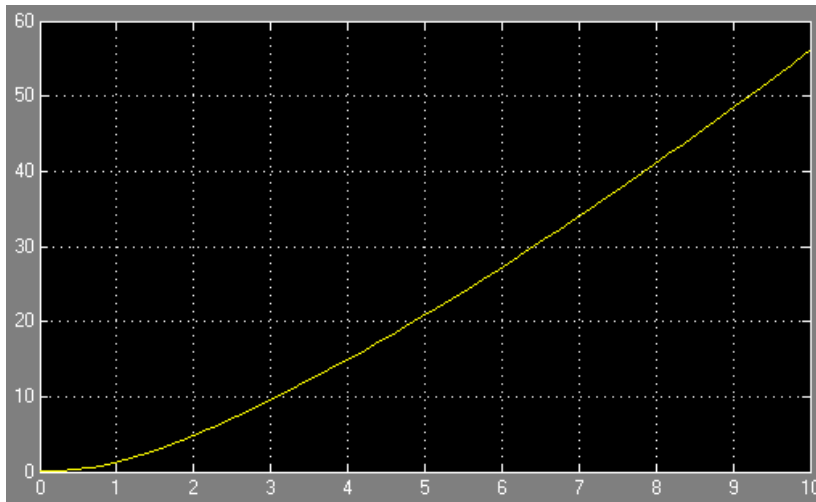


**Figuur 19 - Lucht- en rolweerstand, variabele gear-ratio , snelheidsberekening + hellingen**

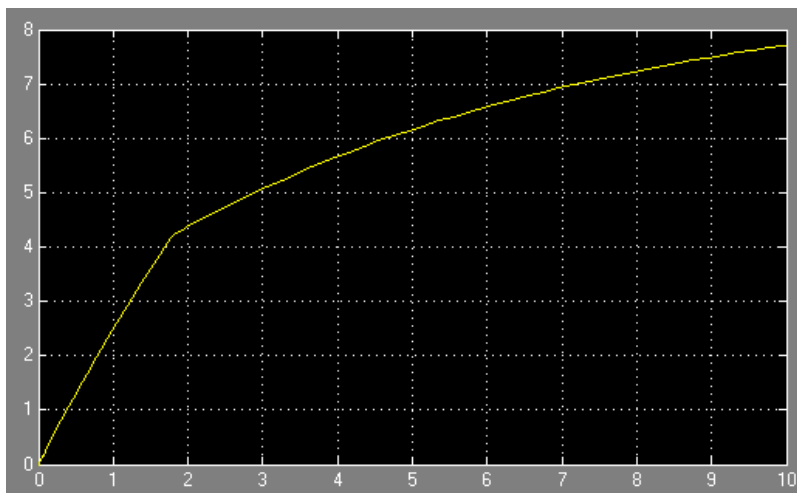
### 3.2 Simulatie

Als alle parameters in de hierboven beschreven simulatie worden ingevuld, kan de werkelijke simulatie worden uitgevoerd. De resultaten van de snelheid en afgelegde weg zijn hier het meest relevant en zijn terug te vinden in figuur 20 en Figuur 22. In de snelheidsgrafiek valt op dat er drie delen te onderscheiden zijn. De eerste steile rechte omhoog op de grafiek is in het dalend deel, hier zal de zwaartekracht namelijk helpen om een grotere versnelling te bekomen. Op het rechte stuk is de versnelling bijgevolg veel kleiner en zal de snelheid dus minder snel toenemen. Het laatste dalende stuk in de grafiek is de helling die wordt opgereden. Hier werkt de zwaartekracht in tegen de beweging van het wagentje. Omdat de lengte van de baan maar 14m bedraagt, is ook enkel dit interval relevant voor de simulatie. Volgens de simulatie zou de wagen dus na ongeveer 4 seconden de finish moeten bereiken. Op de snelheidsgrafiek is te zien dat de snelheid steeds blijft toenemen

maar wel naar een bepaalde waarde gaat. In werkelijkheid zal de snelheid niet zo snel toenemen door bijkomende verliezen (vb. tandwielen, ...).



Figuur 21 - Afgelegde weg

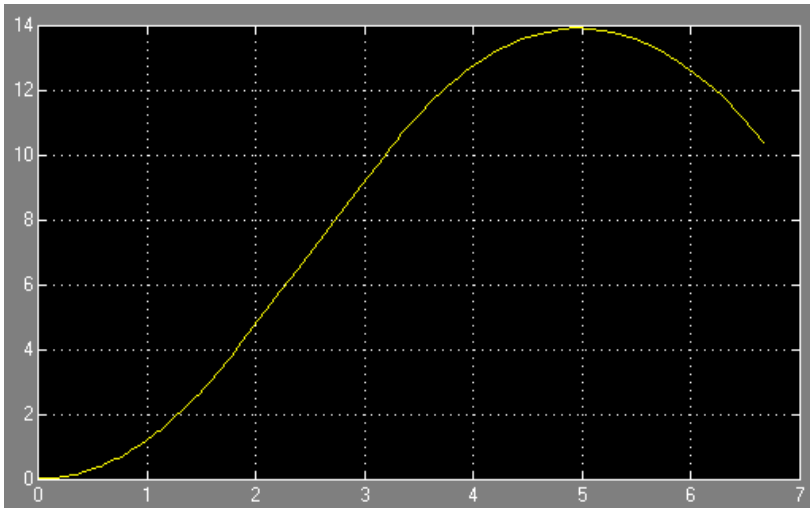


Figuur 22 - Snelheid

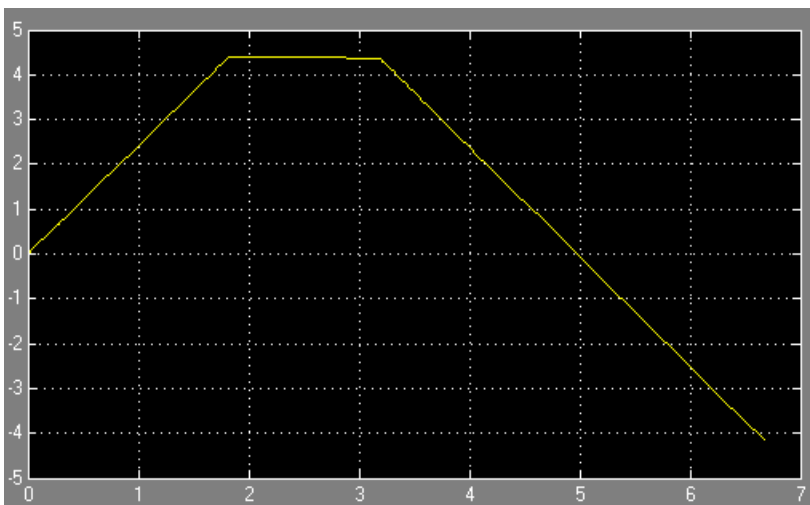
### 3.3 Simulatie in vrijloop

Een laatste simulatie die wordt uitgevoerd, is die waarbij de wagen zonder invloed van zonlicht de helling afdrolt. Dit kan gemakkelijk gesimuleerd worden door de straling van het zonlicht op het paneel  $I_r$  gelijk te stellen aan nul. De enige factoren die dus invloed hebben op het traject zijn de zwaartekracht op de wagen en de rolweerstand. De rolweerstand wordt als constante ingevoerd in *Simulink* en wordt 0,012N geschat. Deze is negatief in *Simulink* omdat deze de wagen ten alle tijde tegenwerkt. De zwaartekracht daarentegen is niet altijd negatief. Omdat de hoek van de helling gekend is, kan deze berekend worden en blijft deze bijgevolg over het hele traject constant. De weerstand is positief bij het afgaan van de helling, negatief bij het oprijden en gelijk aan nul tijdens het rechte stuk, omdat hier de zwaartekracht loodrecht staat op de baan van de wagen. De

luchtweerstand is geprogrammeerd in bijbehorende .m-file. Het resultaat van deze simulatie is weergegeven in figuur 23 en 24. Als men kijkt naar de snelheidsgrafiek de snelheid nul wordt (na 5s), valt op dat dit overeenkomt met een afgelegde weg van 14m. Dit lijkt onrealistisch en ligt hoogstwaarschijnlijk aan het feit dat sommige weerstanden te optimaal geschat zijn en in werkelijkheid groter zijn.



**Figuur 25 - Afgelegde weg in vrijloop**



**Figuur 26 - Snelheid in vrijloop**

## 4 Sankey diagrammen voor de testrit

Een Sankey diagram geeft een duidelijke visuele voorstelling van de verdeling van de energie-uitwisseling die gepaard gaat met de zonnwagenrace. In volgend hoofdstuk wordt dit uitgebreid beschreven.

### 4.1 Sankey diagram bij topsnelheid

De energie van de zon (in België) wordt geschat op zo'n  $800 \frac{W}{m^2}$ . Vanuit deze veronderstelling kan het Sankey diagram worden opgesteld.

$$E_{zon} = 800 \frac{W}{m^2}$$

$$A_{zonnepaneel} = 22,5 * 27 \text{ cm}^2 = 0,06075 \text{ m}^2$$

$$E_{zonnepaneel} = 0,06075 * 800 = 48,6 \text{ W}$$

Er wordt verondersteld dat het zonnepaneel bij volle zon een kortsluitstroom van  $0,85A$  heeft. Aan de hand daarvan (de stroom wordt vermenigvuldigd met een constante zodat de kortsluitstroom gelijk is aan  $0,85A$ ) wordt de optimale verhouding van spanning en stroom berekend. Dit komt neer op een spanning van  $6,55V$  en een stroom van  $0,80A$ .

$$P_{zonnepaneel \text{ bij zon}} = 0,80 * 6,55 = 5,24 \text{ W}$$

$$P_{Verlies_{in \text{ zonnepaneel}}} = 48,6 - 5,24 = 43,36 \text{ W} \rightarrow \text{Verlies}_{in \text{ zonnepaneel}} = \frac{43,36}{48,6} * 100\% = 89,2\%$$

Mede door de koperverliezen  $P_{Cu}$  in de motor is het werkelijke vermogen van de motor kleiner dan wat je zou verwachten (ideaal). De maximale efficiëntie van de gebruikte motor bedraagt 84%. De stroom bij topsnelheid bedraagt (na simulatie en berekening)  $0,7 \text{ A}$ .

Om de stroom bij topsnelheid te bepalen zijn enkele berekeningen nodig. Eerst en vooral wordt gekeken naar de *Simulink* simulatie. Daar ziet men dat de maximale snelheid ongeveer  $4,7 \text{ m/s}$  bedraagt. Als men daarenboven weet dat de diameter van het achterwiel  $10 \text{ cm}$  bedraagt, kan men stellen dat:

$$\text{Omtrek}_{Wiel} = 10 * \pi = 31,4 \text{ cm} = 0,314 \text{ m}$$

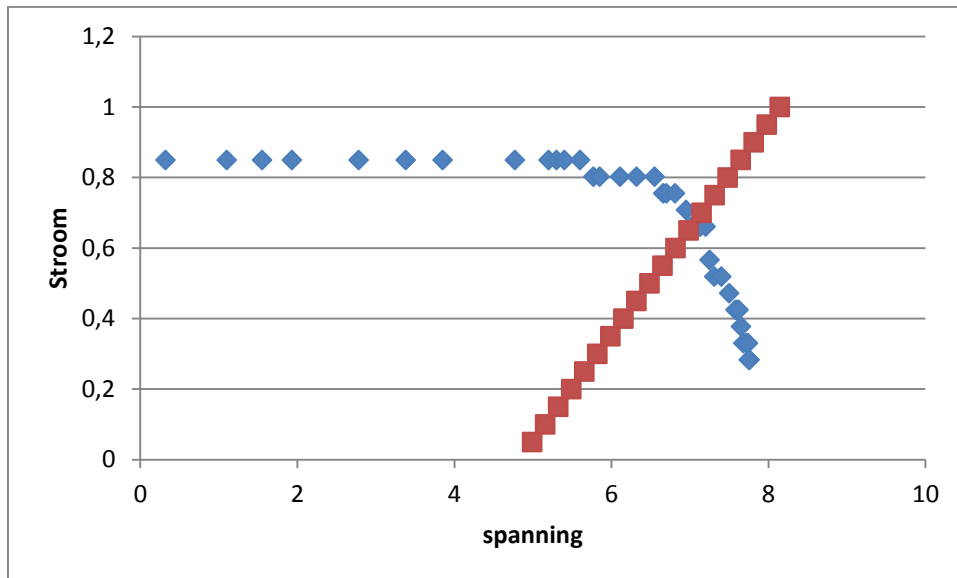
Dus het toerental bedraagt bij topsnelheid:

$$\frac{4,7 \text{ m/s}}{0,314 \text{ m/omwenteling}} = 14,97 \text{ omwentelingen/s} = 898,09 \text{ rpm}$$

Bij topsnelheid heeft de SSV een gear ratio van 6. De snelheid van de motor bedraagt dan:

$$898,09 * 6 = 5388,5 \text{ rpm}$$

Het werkpunt bij deze motorsnelheid bevindt zich dan bij een stroom van ongeveer 0,7 A en een spanning van 7 V zoals te zien is op onderstaande grafiek (figuur 27).



Figuur 28 - Het werkpunt van de motor bij maximale snelheid

Via berekeningen wordt daarna het volgende bekomen:

$$U_{zonnepaneel} * I = U_{mut} * I + R_{rotor} * I^2 = P_{EM} + P_{Cu}$$

$$P_{Cu} = R_{rotor} * I^2 = 3,32 * 0,7^2 = 1,627 \text{ W} \rightarrow \text{Verlies}_{Cu} = \frac{1,627}{5,24} * 100\% = 31,05\%$$

$$P_{EM} = 5,24 - 1,627 = 3,613 \text{ W}$$

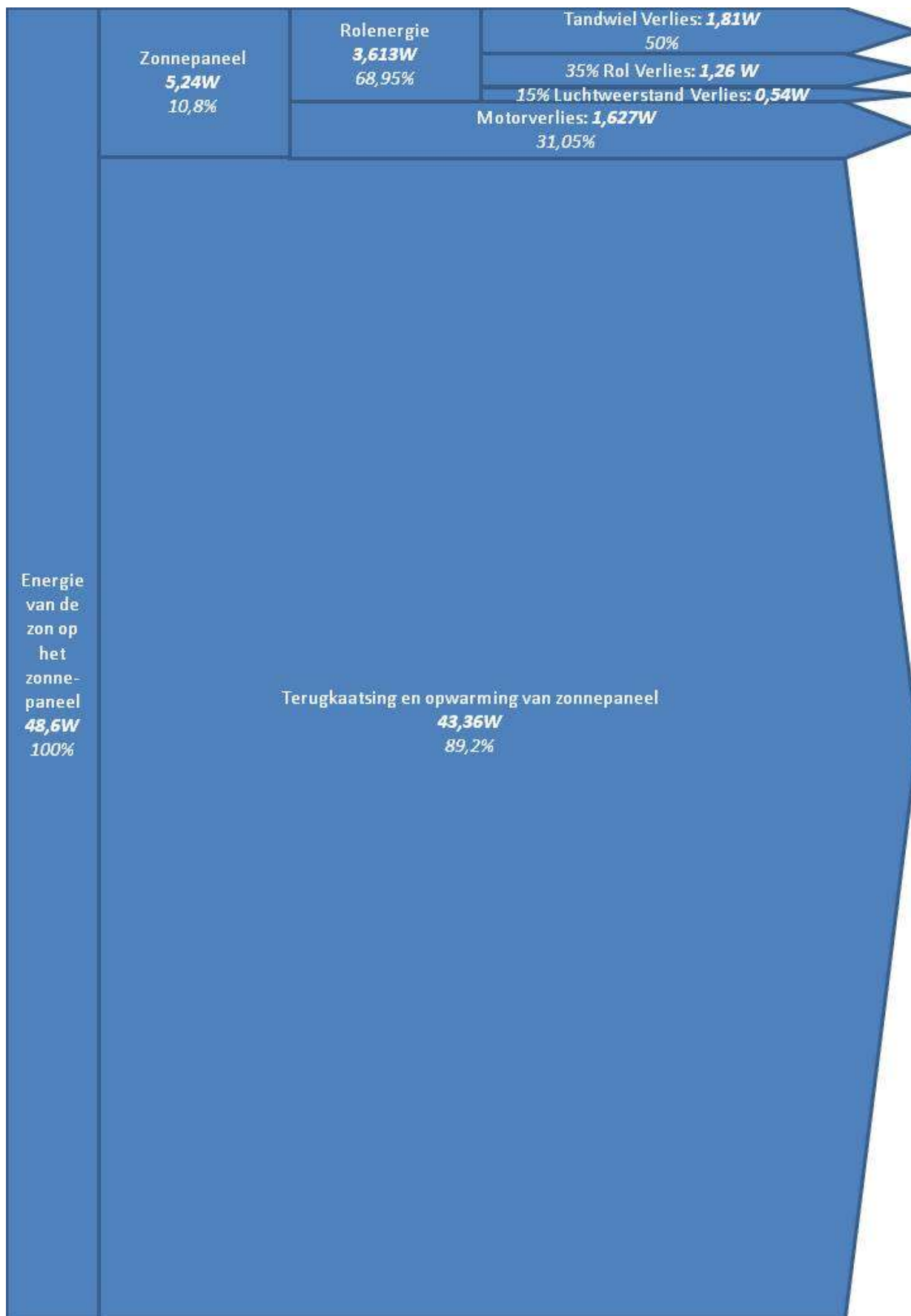
Verder zijn er nog enkele verliezen die niet nauwkeurig te bepalen zijn. Deze zijn de weerstand van de lucht, de tandwielen en de rolweerstand. De grootste weerstand is die van de tandwielen. Daarvoor wordt rekening gehouden met een verlies van 50%. De rolweerstand zal waarschijnlijk iets kleiner zijn en daarom wordt het verlies geschat op zo'n 35%. Als laatste is er de luchtweerstand. Omdat de SSV slechts een lage snelheid zal halen (zelfs bij topsnelheid is de snelheid nog zeer laag), zal er maar weinig luchtweerstand optreden en wordt het verlies geschat op 15%.

$$\text{Totaal verlies} = 50\% + 35\% + 15\% = 100\%$$

$$P_{Uiteindelijk} = 0 \text{ W}$$

Alle energie heeft nu een bestemming. Na de tests wordt het Sankey diagram aangepast, zodat het meer strookt met de realiteit.

Het Sankey diagram kan men hieronder terugvinden in figuur 29.



Figuur 30 - Sankey diagram bij topsnelheid



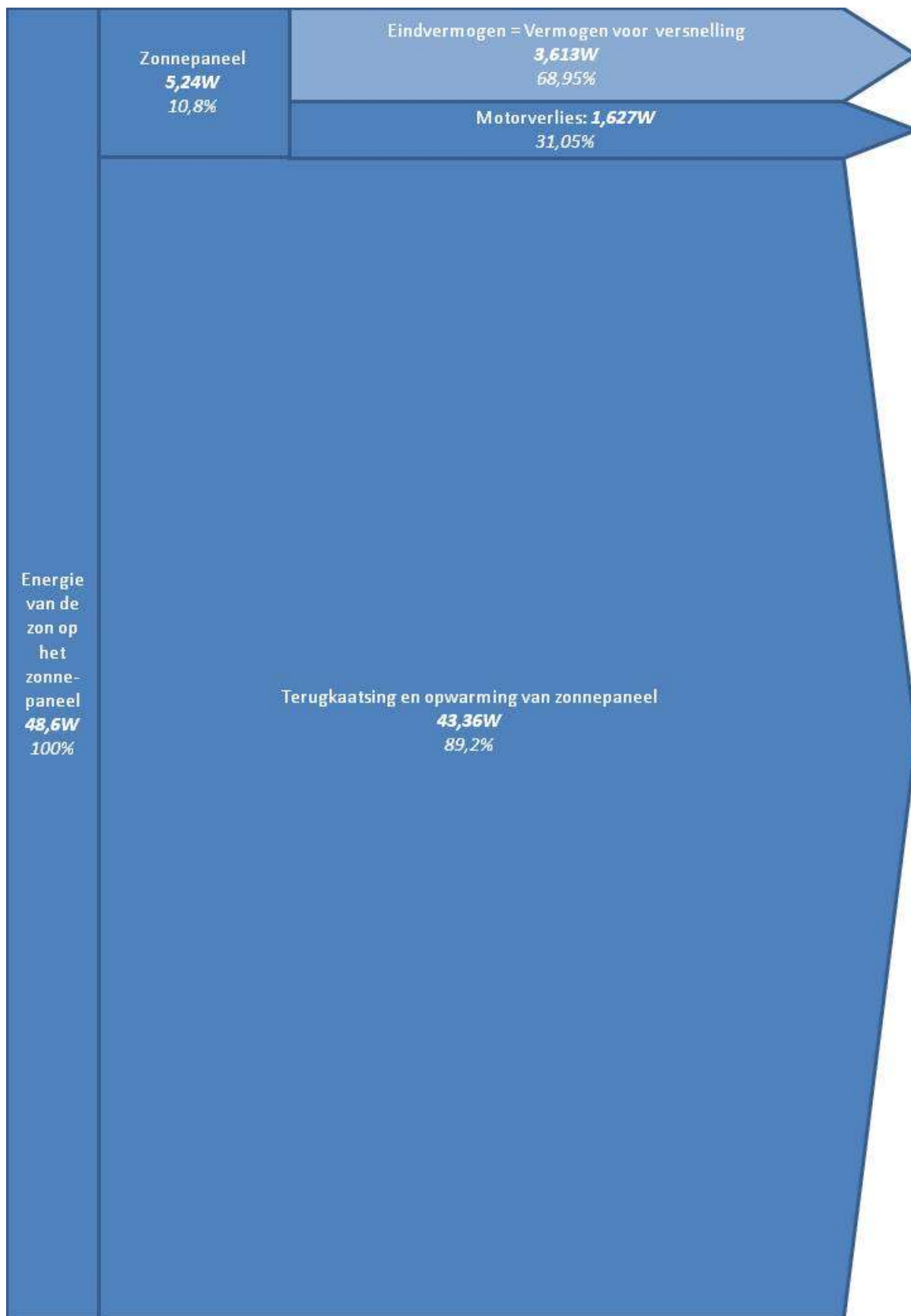
## 4.2 Sankey diagram na 4 meter

Hier wordt verondersteld dat tijdens de daling de weerstand van de tandwielen, de lucht en de rolweerstand wegvallen ten opzichte van de winst van de neerwaartse beweging. Dit wil zeggen dat het nieuwe Sankey diagram er uitziet zoals het Sankey diagram bij topsnelheid, maar dan zonder de verliezen door tandwielen, de lucht- en rolweerstand.

Hier eindigt het Sankey diagram dus bij een totaal vermogen van  $3,613W$  die volledig kan gebruikt worden om de SSV te laten versnellen. De totale efficiëntie (van de zon tot het uiteindelijke vermogen) geeft in deze situatie het volgende:

$$\mu_{Totaal} = \frac{3,613}{48,6} * 100\% = 7,4\%$$

Het Sankey diagram kan men hieronder terugvinden in figuur 31.



Figuur 32 - Sankey diagram na 4m

## 5 Sankey diagrammen na de testrit

Na de testrit is het mogelijk om een meer correct Sankey diagram op te stellen. Uit de testrit blijkt dat de SSV in vrijloop zo'n negen meter kan afleggen. Aan de hand van dit gegeven worden de nieuwe Sankey diagrammen opgesteld.

### 5.1 Sankey diagram bij topsnelheid

De energie van de zon, de verliezen in het zonnepaneel en de verliezen in de motor blijven onveranderd voor deze aangepaste Sankey diagrammen. Door de testrit en de SSV die nu helemaal gebouwd is, is het echter mogelijk om enkele andere verliezen nauwkeuriger te bepalen. Deze zijn de weerstand van de lucht en de helling en de rolweerstand.

Doordat nu alle verliezen, behalve de tandwielverliezen bepaald zijn, is het mogelijk om ook deze tandwielverliezen te bepalen. De berekening van de verliezen vindt men in bijlage 7.

Na alle verliezen (tot en met de motorverliezen) te hebben verrekend met het invallend zonlicht als eerste energiebron, bekomt men een overblijvend vermogen van  $3,613 \text{ W}$ . Nu komt het erop aan dit overig vermogen weg te werken aan de hand van de verlieskrachten. Let wel, de kracht van de neergaande beweging heeft hier (bij topsnelheid) geen enkel aandeel meer.

Aan de hand van de simulatie wordt de tijd bepaald die het wagentje nodig heeft om tot zijn topsnelheid te komen. Deze tijd bedraagt  $2,3\text{s}$  en de afgelegde weg is op dat moment  $10\text{m}$ .

De rolweerstand levert een totaal vermogen van:

$$P_{rol} = \frac{(10,8 * 0,0156)N * 10m}{2,3s} = 0,733W$$

De luchtweerstand levert een totaal vermogen van:

$$P_{lucht} = \frac{0,1315N * 10m}{2,3s} = 0,572W$$

Als men dan het vermogen van de tandwielverliezen berekent, wordt dit:

$$3,613 \text{ W} = 0,733 + 0,572 + P_{Tandwiel}$$

$$P_{Tandwiel} = 3,613 - 0,733 - 0,572 = 2,308W$$

Als men de procentuele verliezen berekent, bekomt men:

$$Verlies_{rol} = \frac{0,733}{3,613} * 100\% = 20,3\%$$

$$Verlies_{lucht} = \frac{0,572}{3,613} * 100\% = 15,8\%$$

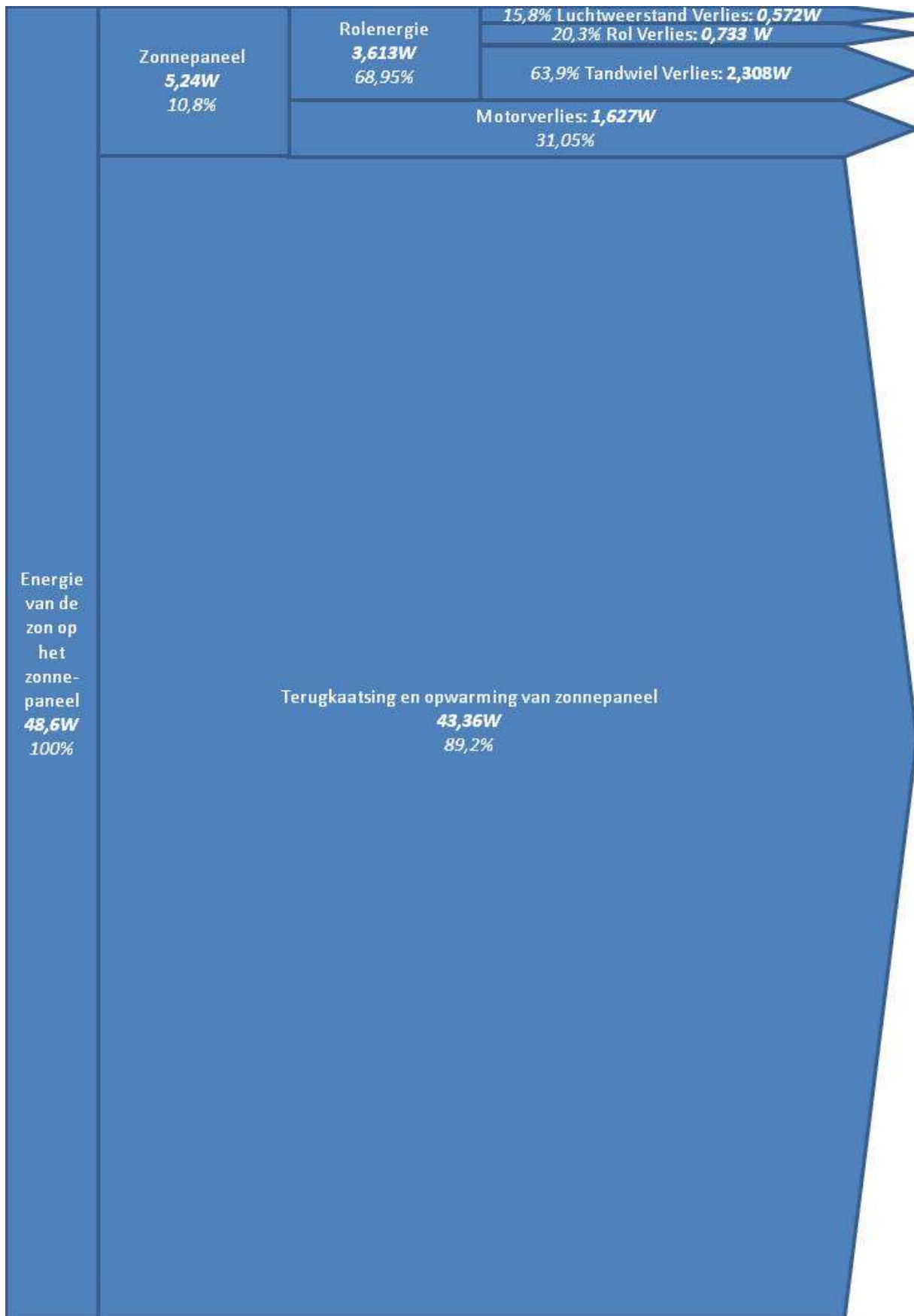
$$Verlies_{Tandwiel} = \frac{2,308}{3,613} * 100\% = 63,9\%$$

Op deze manier bekomt men een uitgangsvermogen van 0W, wat wil zeggen dat de wagen dus niet meer aan het versnellen is. Dit komt neer op een situatie zoals rijden aan topsnelheid.

$$P_{Uiteindelijk} = 0 \text{ W}$$

Alle energie heeft nu een bestemming. Dit Sankey diagram strookt meer met de realiteit dan zijn voorganger.

Het Sankey diagram kan men hieronder terugvinden in figuur 33.



Figuur 34 - Sankey diagram bij topsnelheid na testrit

## 5.2 Sankey diagram na 4 meter

Net zoals het Sankey diagram bij topsnelheid wordt verondersteld dat de verliezen vanaf invallende zonnestrallen tot 'voorbij' de motor hetzelfde blijven. Dit wil zeggen dat er opnieuw gestart wordt met een vermogen van  $3,613W$ . Het einde van de helling bevindt zich bij 4m en dit is bij een reistijd van 1,5s. Door de helling helpt de zwaartekracht mee bij het versnellen.

Het extra vermogen geleverd door de zwaartekracht (hellingsenergie) is:

$$P_{extra} = \frac{1,35N * 4m}{1,5s} = 3,6W$$

Dit betekent dat het totale vermogen  $(3,6 + 3,613) = 7,213W$  bedraagt.

Er zijn echter opnieuw verliezen. Eerst en vooral is er de rolweerstand:

$$P_{rol} = \frac{(10,8 * 0,0156)N * 4m}{1,5s} = 0,449W$$

De luchtweerstand levert een totaal vermogen van:

$$P_{lucht} = \frac{0,1315N * 4m}{1,5s} = 0,351W$$

Als men dan het vermogen van de tandwielverliezen berekent, wordt dit:

$$P_{Tandwiel \text{ bij topsnelheid}} = 2,308W \rightarrow F_{Tandwiel} = \frac{2,308W * 2,3s}{10m} = 0,531N$$

$$P_{Tandwiel \text{ nu}} = \frac{0,531N * 4m}{1,5s} = 1,416W$$

Aan de hand daarvan wordt het overige vermogen berekend:

$$P_{uiteindelijk} = 7,213 - 0,449 - 0,351 - 1,416 = 4,997W$$

Procentueel komt dit alles overeen met:

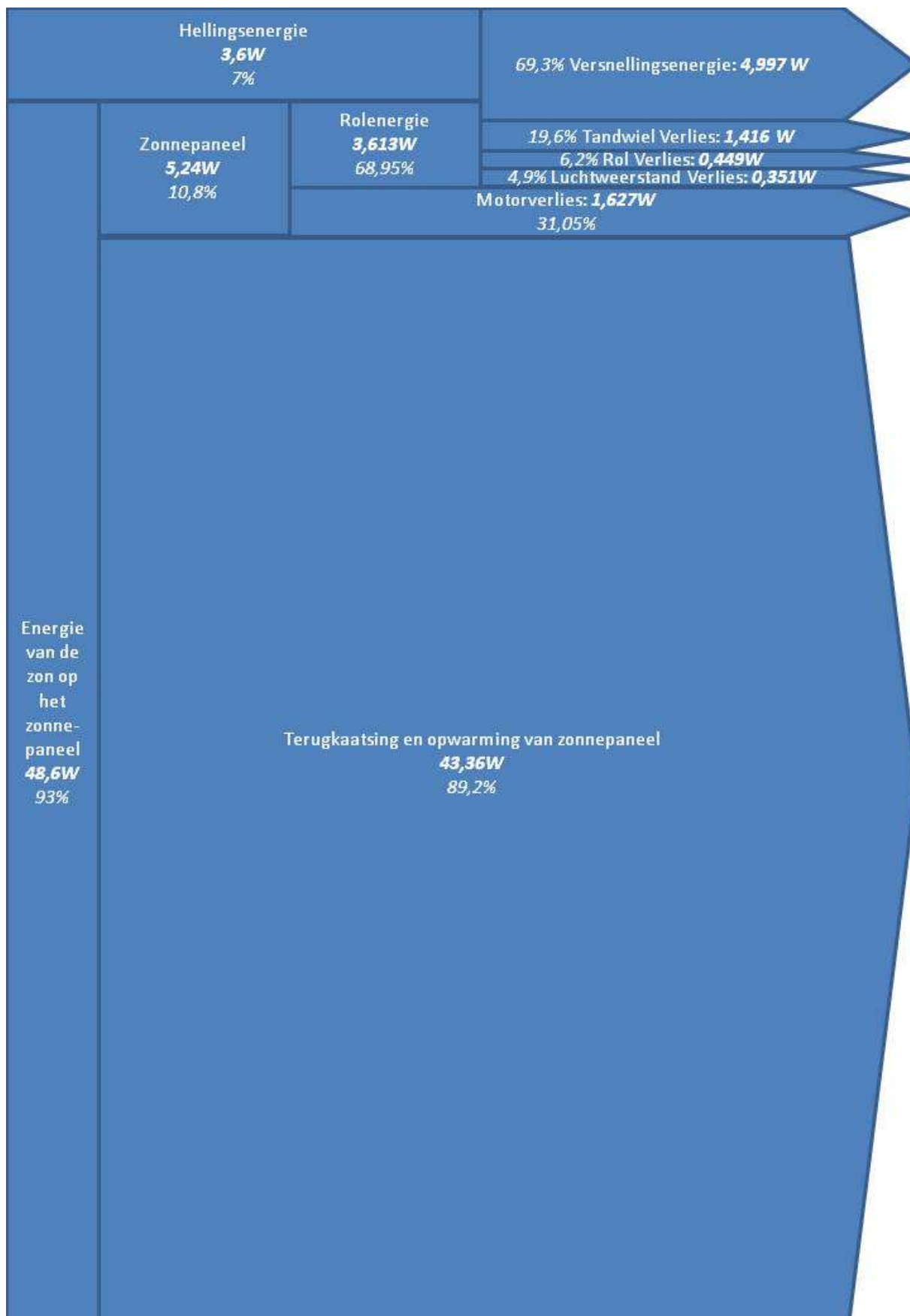
$$Verlies_{rol} = \frac{0,449}{7,213} * 100\% = 6,2\%$$

$$Verlies_{lucht} = \frac{0,351}{7,213} * 100\% = 4,9\%$$

$$Verlies_{Tandwiel} = \frac{1,416}{7,213} * 100\% = 19,6\%$$

$$Versnellingsenergie = \frac{4,997}{7,213} * 100\% = 69,3\%$$

De versnellingsenergie is het overig vermogen dat volledig wordt gebruikt om het wagentje te doen versnellen. Het Sankey diagram kan men hieronder vinden in figuur 35.



Figuur 36 - Sankey diagram na 4 meter na testrit



## 6 Sankey diagrammen Umicar 2009

Hieronder zijn de Sankey diagrammen voor de umicar bij topsnelheid en bij halve topsnelheid terug te vinden. De berekeningen zijn gebaseerd op een situatie waarbij alle energie van de zonnecellen komt en er dus geen vermogen door de batterijen geleverd wordt.

### 6.1 Sankey diagram bij topsnelheid

De oppervlakte (vanuit bovenaanzicht) van de Umicar wordt berekend met behulp van afmetingen uit de technische tekeningen (zie bijlage 8).

$$(1800 * 5000)mm^2 - (470 * 975)mm^2 = 854175 * 10^6 mm^2 = 8,542 m^2$$

Deze oppervlakte kan vergeleken worden met de oppervlakte die effectief gebruikt wordt door de zonnecellen. Deze kan via een nieuwe berekening berekend worden. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de gegevens van de twee types zonnecellen: 280 RWE en 2578 Emcore.

280 RWE:

Oppervlakte van 1 cel:

$$40 mm^2 * 80 mm^2 = 3200 mm^2$$

Oppervlakte van totaal 280 RWE = 0,896 m<sup>2</sup>

2578 Emcore:

Oppervlakte van 1 cel:

$$76,10 mm^2 * 37,16 mm^2 = 2827,9 mm^2$$

Oppervlakte van totaal 2578 Emcore = 7,29 m<sup>2</sup>

Totaal oppervlakte van de zonnecellen = 8,186 m<sup>2</sup>.

Hieruit kan afgeleid worden dat niet het volledig beschikbare oppervlak van de zonnewagen wordt gebruikt. Een veronderstelling is dat de zon (bij een rit in België) een vermogen levert van 800 W/m<sup>2</sup>.

Het totale vermogen als er geen verliezen zijn is dan:

$$800 \frac{W}{m^2} * 8,186 m^2 = 6548,8 W$$

Ongeveer 20% van de invallende straling op de zonnecellen gaat verloren door weerkaatsing en opwarming van het zonnepaneel:

$$6548,8 * 0,8 = 5239,04 W$$

Nu wordt het vermogen berekend die elke zonnecel kan leveren:

280 RWE:

$$P * \frac{\text{opp RWE}}{\text{opp Totaal}} = 5239,04 * \frac{0,896 \text{ m}^2}{8,186 \text{ m}^2} = 573,44 \text{ W}$$

2578 Emcore:

$$P * \frac{\text{opp Emcore}}{\text{opp Totaal}} = 5239,04 * \frac{7,29 \text{ m}^2}{8,186 \text{ m}^2} = 4665,60 \text{ W}$$

De gemiddelde efficiëntie van een RWE cel is zo'n 30% en de gemiddelde efficiëntie van een Emcore cel is zo'n 24,5%:

280 RWE:

$$P = 573,44 \text{ W} * 0,30 = 172,03 \text{ W}$$

2578 Emcore:

$$P = 4665,60 \text{ W} * 0,245 = 1143,07 \text{ W}$$

Het totale vermogen van de zonnecellen is dus:

$$172,03 + 1143,07 = 1315,1 \text{ W}$$

De motor die de Umicar gebruikt, heeft een efficiëntie van om en bij de 95%.

$$P = 1315,1 * 0,95 = 1249,35 \text{ W}$$

De controller heeft een efficiëntie van 99%.

$$P = 1249,35 * 0,99 = 1236,85 \text{ W}$$

De Umicar maakt gebruik van een in-wheel motor, wat wil zeggen dat er geen overbrengen nodig zijn om de wagen aan te drijven. Op die manier kunnen er ook geen verliezen optreden bij de overbrenging. Het totale vermogen van de zonnecellen dat wordt verkregen, is 1236,85 W. Hier moeten nu nog een aantal verliezen van worden afgetrokken die optreden bij de Umicar.

*Luchtweerstand*

$$F_w = \frac{C_w * A * \rho * v^2}{2}$$

Met:  $C_w = 0,077$  (fiche 2)

$A = 0,81 \text{ m}^2$  (datasheets)

$\rho_{\text{lucht}} = 1,20 \text{ kg/m}^3$

$v = \text{snelheid zonnwagen (m/s)}$

$$P_{\text{lucht}} = F_w * v = \frac{0,077 * 0,81 \text{ m}^2 * 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * v^3}{2} = 0,0374 * v^3$$

*Rolweerstand*

$$F_r = C_r * R$$

Met: rolweerstandcoëfficiënt  $C_r = 0,0025$

$$\text{verticale reactiekracht } R = m * g = (255 + 80)kg * 9,81 = 2992 N$$

$$P_r = C_r * R * v = 0,0025 * 2992N * v = 7,48 * v$$

Uit de vergelijkingen van de luchtweerstand, de rolweerstand en het totale vermogen wordt de topsnelheid gehaald.

$$P_{netto} - P_{lucht} - P_r = 0$$

$$1236,85 - (0,0374 * v^3) - (7,48 * v) = 0$$

Als de vergelijking opgelost is, kan de snelheid hieruit berekend worden:

$$v = 30,02 \frac{m}{s} = 108,07 \frac{km}{u}$$

De topsnelheid die hier bekomen is, is lager dan de effectieve topsnelheid van de Umicar. Dit komt omdat er geen rekening gehouden is met het vermogen dat door de batterijen geleverd kan worden.

Aangezien er een Sankey diagram opgesteld wordt bij halve snelheid en topsnelheid, moeten de luchtweerstand en rolweerstand bij deze snelheden berekend worden. Voor topsnelheid zijn deze twee vermogensverliezen hieronder berekend.

$$P_{lucht} = \frac{0,077 * 0,81 m^2 * 1,2 \frac{kg}{m^3} * \left(30,02 \frac{m}{s}\right)^3}{2} = 1011,82 W$$

$$P_r = C_r * R * v = 0,0025 * 2992N * 30,02 \frac{m}{s} = 224,55 W$$

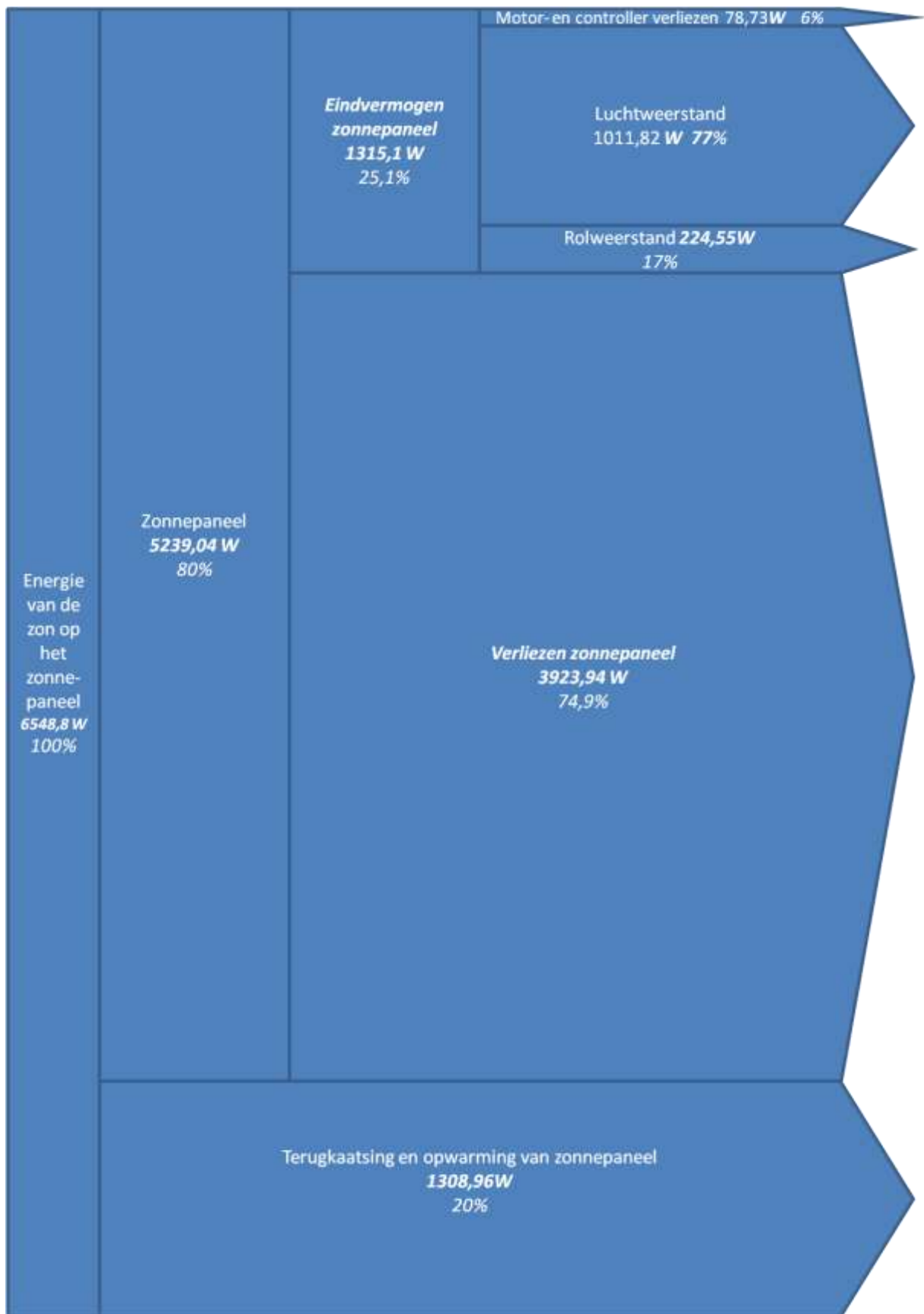
De uiteindelijke percentuele vermogens van de verliezen zijn dan:

$$P_{lucht} = \frac{1011,82}{1315,1} * 100\% = 77\%$$

$$P_r = \frac{224,55}{1315,1} * 100\% = 17\%$$

$$P_{controller} = \frac{78,73}{1315,1} * 100\% = 6\%$$

Het Sankey diagram vindt men in figuur 37.



Figuur 38 - Sankey diagram van de umicar bij topsnelheid

## 6.2 Sankey diagram bij halve topsnelheid

Bij halve topsnelheid zijn enkel de lucht en de rolweerstand verschillend ten opzichte van het Sankey diagram bij topsnelheid. Deze worden hier berekend:

$$v = 15,01 \frac{m}{s}$$

$$P_{lucht} = \frac{0,077 * 0,81 m^2 * 1,2 \frac{kg}{m^3} * \left(15,01 \frac{m}{s}\right)^3}{2} = 126,55 W$$

$$P_r = C_r * R * v = 0,0025 * 2992N * 15,01 \frac{m}{s} = 112,27 W$$

De uiteindelijke procentuele vermogensverliezen en het overige versnellingsvermogen zijn dan:

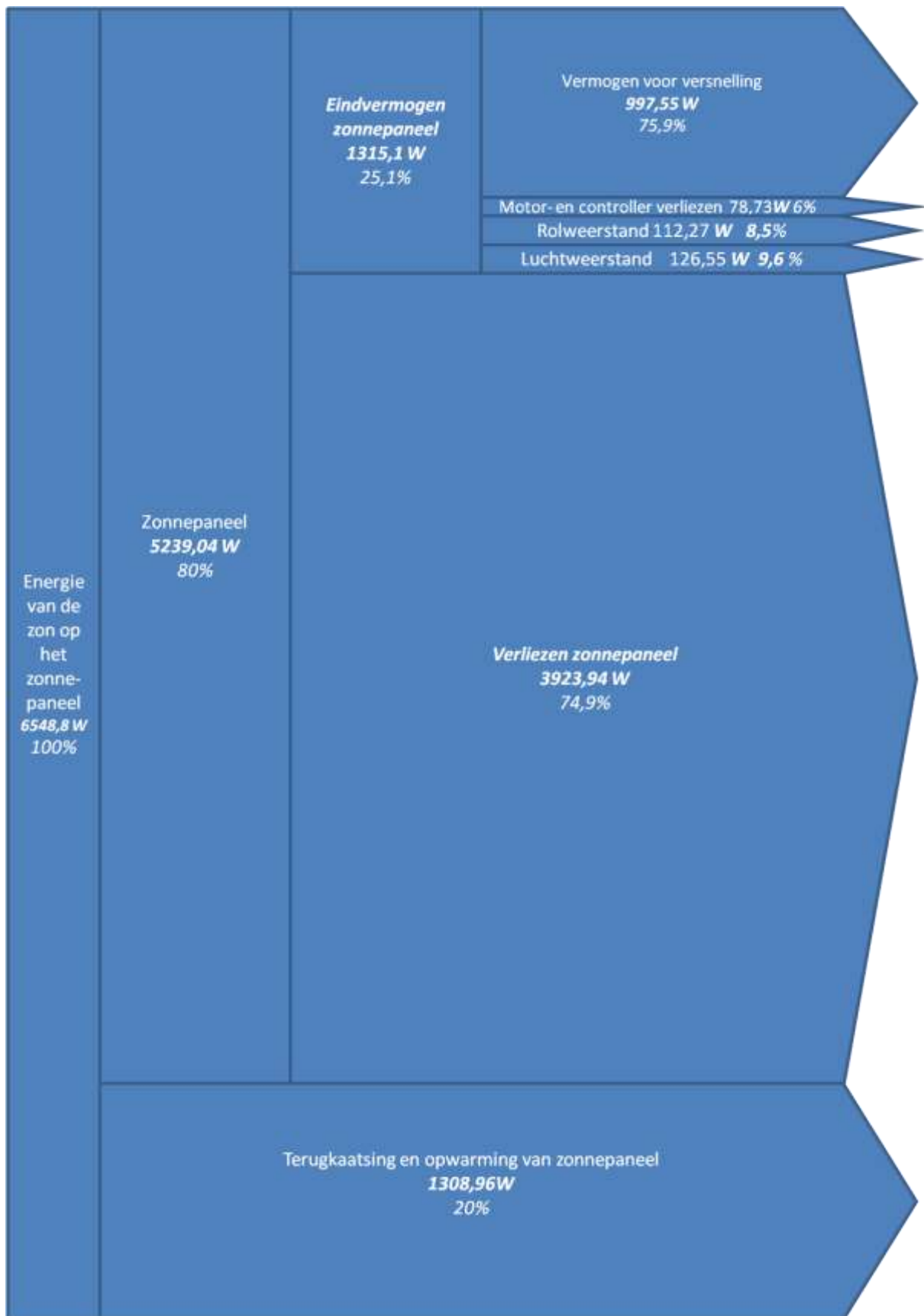
$$P_{lucht} = \frac{126,55}{1315,1} * 100\% = 9,6\%$$

$$P_r = \frac{112,27}{1315,1} * 100\% = 8,5\%$$

$$P_{controller} = \frac{78,73}{1315,1} * 100\% = 6\%$$

$$P_{versnelling} = \frac{997,55}{1315,1} * 100\% = 75,9\%$$

Dit Sankey diagram vindt men in figuur 39.



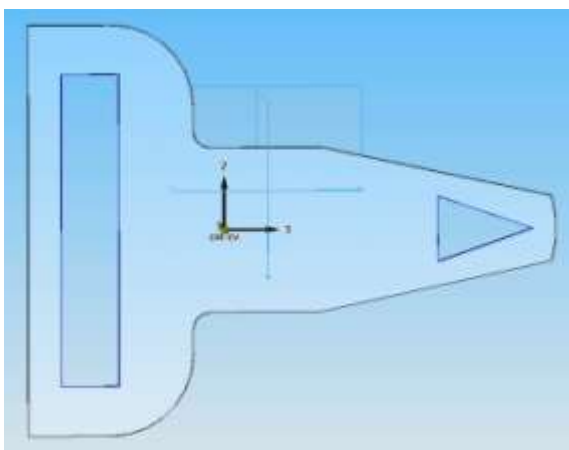
Figuur 40 - Sankey diagram van de Umicar bij halve topsnelheid

## 7 Design

In het voorlaatste hoofdstuk wordt het design van de SSV besproken. Er wordt vooral gekeken naar het gekozen frame en de gebruikte wielen. Hieronder staat het uiteindelijke design beschreven met een korte toelichting van de gemaakte keuzes.

### 7.1 Frame

Het frame (zie figuur 41) van de SSV is vervaardigd uit plexiglas voor de stevigheid en omdat het meteen voorhanden is in *Fablab Leuven*. De dikte van 4 mm is het beste compromis tussen een zo laag mogelijk gewicht en de nodige stevigheid. Het basis design van het frame is een T-vorm met een breedte van 250 mm en een lengte van 300 mm. Met een volledige T-vorm zou de SSV te veel wegen, het frame zou dan namelijk een gewicht hebben van 216 g. Door op plaatsen waar geen ander onderdeel van de SSV op steunt materiaal weg te laten, is het gewicht op een efficiënte manier gereduceerd. Na deze aanpassingen weegt het frame nog slechts 180 g. Dit komt overeen met een procentuele gewichtsvermindering van 16,7 %. Voor aerodynamische redenen zijn plotse overgangen afgerond. De achterwielen bevinden zich aan weerszijde van de brede kant en de voorwielen aan de smalle kant, waar het frame als een afgeknotte puntvorm eindigt. Bij het versnellen van de zonnewagen verplaats het gewicht van de SSV zich, door de inertie, naar achteren en dus op de achterwielen. Daardoor is voor de SSV achterwielaandrijving beter dan voorwielaandrijving. Meer gewicht op de gedreven wielen betekent meer grip. De motor en de versnellingsbak zijn tevens ook op de achteras gemonteerd. Het zonnepaneel zelf is vast geschroefd op een GPS-houder. In de GPS-houder zit een kogelgewricht waarmee het zonnepaneel loodrecht op de zon gericht kan worden. De GPS-houder heeft ook een zuignap en kan zo eenvoudig bevestigd worden op het frame. De accelerometer neemt de overige plaats in tussen de neus en het zonnepaneel.



Figuur 42 - Onderkant frame

## 7.2 Wielen

### 7.2.1 Achterwielen

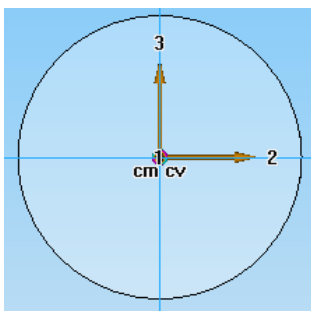
De achterwielen (figuur 43) zijn gebaseerd op de afmetingen van een CD maar dan breder en iets kleiner. Dit wil zeggen een straal van 50 mm en een dikte van 2 mm. De wielen zijn net zoals het frame vervaardigd uit plexiglas. Om zo weinig mogelijk nadeel van het gewicht van de achterwielen te hebben, zijn ze zo licht mogelijk gemaakt door grote delen uit het wiel te snijden. Een vol wiel heeft een gewicht van 23 g en de gebruikte wielen hebben slechts een gewicht van 13 g. Dit komt overeen met een gewichtsverlies van 56 %.



Figuur 44 - Achterwiel

### 7.2.2 Voorwielen

De voorwielen (figuur 45) hebben een straal van 25 mm en een dikte van 2 mm en zijn ook vervaardigd uit plexiglas. Uit de voorwielen wordt geen materiaal weggesneden omdat deze slechts een gewicht hebben van 5g. Daarnaast staan de achterwielen hoger dan de voorwielen om het zwaartepunt van het wagentje nog meer aan de achterkant te leggen, waardoor er meer grip is en de kracht van de motor optimaler kan benut worden.



Figuur 46 - Voorwiel



### **7.3 Geleiding**

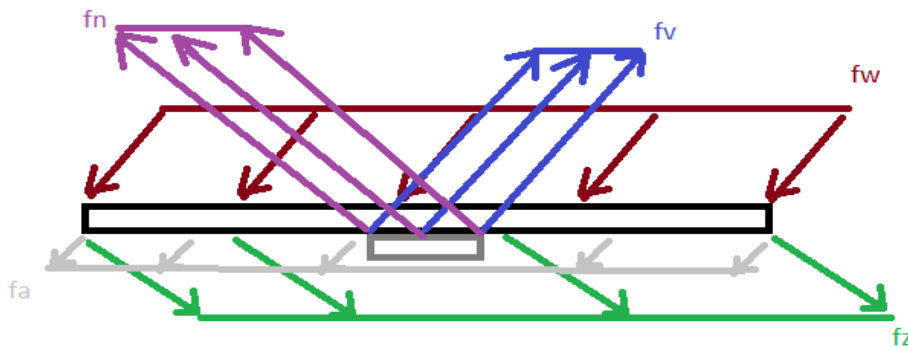
Om de SSV op de racetrack op een rechte baan te houden is er geleiding nodig. De geleiding bestaat uit twee plexiglazen blokjes op een afstand van 10 mm van elkaar. Deze zijn afgerond om eventuele vertraging door botsingen tegen het L-profiel te vermijden. De geleiding staat vooraan op de punt van de SSV en is eveneens de ophanging van de voorwielen.

## 8 Spanningen op het zonnepaneel

Tijdens de race staat het zonnepaneel onder bepaalde spanningen. Deze worden in dit hoofdstuk besproken op het moment dat de zwaarste spanningen op het zonnepaneel staan.

### 8.1 Krachten

Op het zonnepaneel werken drie krachten: luchtweerstand  $F_w$ , zwaartekracht  $F_z$  en de kracht die de steun op het paneel uitoefent. Deze laatste is opgesplitst in een voortduwende component  $F_v$  en een normaalcomponent  $F_n$ . Verder wordt de inertie als een kracht  $F_a$  meegerekend. Dit zijn allemaal verdeelde belastingen, daarom worden de belastingen hieronder met kleine  $f$ 's geschreven. In de onderstaande tekening staat een voorstelling van de krachten op het paneel. Hierin is de linkerkant de bovenkant van het paneel.



Figuur 47 - De krachten op het zonnepaneel

#### 8.1.1 Krachtenberekening

Aan de hand van volgende gegevens kan men de verschillende krachten berekenen.

$b$  = breedte van het paneel

$h$  = hoogte van het paneel

$A$  = oppervlakte van het paneel

$A_f$  = frontale oppervlakte van het paneel

$C_w$  = luchtweerstandcoëfficiënt

$\theta_{min}$  = laagste hoek zon

$A_{ond}$  = ondersteunde oppervlakte door aluminium versteviging

$l$  = lengte van de ondersteuning (volgens hoogterichting van paneel)

Hieronder vindt men de berekening van de krachten.

### 8.1.1.1 De luchtweerstand

De eerste kracht die berekend wordt, is de luchtweerstand  $F_w$ .

$$F_w = \frac{1}{2} * \frac{C_w * A_f * \rho * v^2}{A}$$

Hiervoor dienen enkele andere dingen gekend te zijn:

$$A = b * h = 0,225 * 0,27 = 0,06075 \text{ m}^2$$

$$A_f = A * \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{min}\right) = A * \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{46 * \pi}{180}\right) = 0,0422 \text{ m}^2$$

$$v = \frac{3}{3,6} = 0,833 \text{ m/s}$$

$$C_w = 0,5 \text{ \& } \rho = 1,293 \text{ kg/m}^3$$

Hiermee bekomt men uiteindelijk voor de luchtweerstand:

$$F_w = \frac{1}{2} * \frac{0,5 * 0,0422 * 1,293 * 0,833^2}{0,06075} = 0,156 \text{ N/m}^2$$

### 8.1.1.2 De voortduwende kracht

De tweede kracht die berekend wordt, is de voortduwende kracht. Dit wordt als volgt berekend:

$$F_v = \frac{m * a}{A_{ond}}$$

Hiervoor dient men enkele andere gegevens te weten:

$$m = 0,345 \text{ kg \& } a = 3,622 \text{ m/s}^2$$

$$A_{ond} = b * l = 0,225 * 0,025 = 0,00563 \text{ m}^2$$

Hiermee bekomt men dan een voortduwende kracht:

$$F_v = \frac{0,345 * 3,622}{0,00563} = 222 \text{ N/m}^2$$

### 8.1.1.3 De normaalkracht, zwaartekracht en inertiekracht

De normaalkracht  $F_n$ , zwaartekracht  $F_z$  en inertiekracht  $F_a$  kunnen berekend worden aan de hand van eenvoudige formules:

$$F_n = \frac{m * g}{A_{ond}} = \frac{0,345 * 9,81}{0,00563} = 601,68 \text{ N/m}^2$$

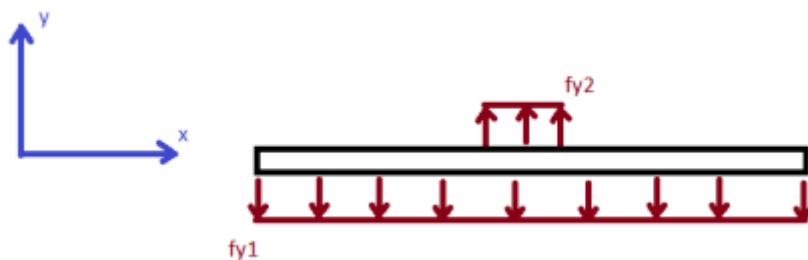
$$F_z = \frac{m * g}{A} = \frac{0,345 * 9,81}{0,06075} = 55,71 \text{ N/m}^2$$

$$F_a = \frac{m * a}{A} = \frac{0,345 * 3,622}{0,06075} = 20,57 \text{ N/m}^2$$

## 8.2 Vereenvoudiging

Het berekenen van de spanningen is een ingewikkeld probleem dat makkelijk vereenvoudigd kan worden. Om het te vereenvoudigen, worden de krachten omgerekend in een equivalent krachtenstelsel van twee verdeelde belastingen en één component in de x-richting (assenstelsel: zie figuur 48). Deze laatste moet echter nul zijn, omdat de inertie van het zonnepaneel al meegeteld is en er dus netto geen kracht kan overblijven. Hierdoor kan er ook in de y-richting geen netto kracht meer overblijven en kan volgende stelling bewezen worden:

$$F_{y2} * A_{ond} = F_{y1} * A \Rightarrow F_{y2} = \frac{F_{y1} * A}{A_{ond}}$$



Figuur 49 - Vereenvoudigd krachtenstelsel

Men kan dan  $F_{y1}$  en  $F_{y2}$  uitrekenen aan de hand van onderstaande formules.

$$F_{y1} = F_z * \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{min}\right) + F_a * \cos(\theta_{min}) + F_w * \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{min}\right) \Rightarrow F_{y1} = 54,47 \text{ N/m}^2$$

$$F_{y2} = F_v * \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{min}\right) + F_n * \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{min}\right) \Rightarrow F_{y2} = 587,13 \text{ N/m}^2$$

### 8.3 Dwarskrachten- en momentendiagram

Met onderstaande berekeningen kan vervolgens het dwarskrachten- en momentendiagram geplott worden in *Maple*. Voor het dwarskrachtendiagram word het volgende berekend (zie figuur 50):

```
Dw1 := fy1·b :  
evalf(Dw1)
```

12.25625308

```
Dw2 := fy1·b -  $\frac{fy1 \cdot A}{Aond} \cdot b$  :  
evalf(Dw2)
```

-120.1112802

```
p1 := plot(Dw1·x, x = 0 ..0.1225)
```

PLOT(...)

```
p2 := plot(Dw1·0.1225 + Dw2·(x - 0.1225), x = 0.1225 ..0.1475)
```

PLOT(...)

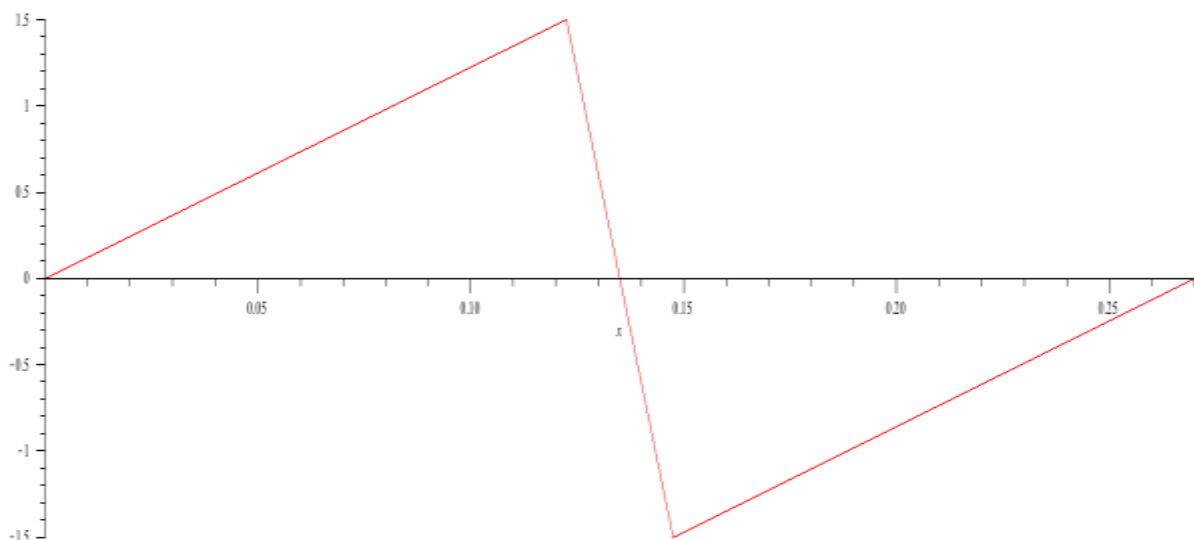
```
p3 := plot(Dw1·(x - 0.1475) + Dw1·0.1225 + Dw2·0.025, x = 0.1475 ..0.27)
```

PLOT(...)

```
display(p1, p2, p3)
```

**Figuur 51 - Berekeningen van het dwarskrachtendiagram**

Het plotten van het dwarskrachtendiagram (zie figuur 52) geeft een grafiek die de afstand op het zonnepaneel (op de x-as) geeft in functie van de dwarskracht in N (op de y-as).



**Figuur 53 - Het dwarskrachtendiagram**

Voor het momentendiagram kan het volgende berekend worden in *Maple* (zie figuur 54):

```
p1 := plot(Dw1·x2, x = 0 ..0.1225)
                                          PLOT(...)

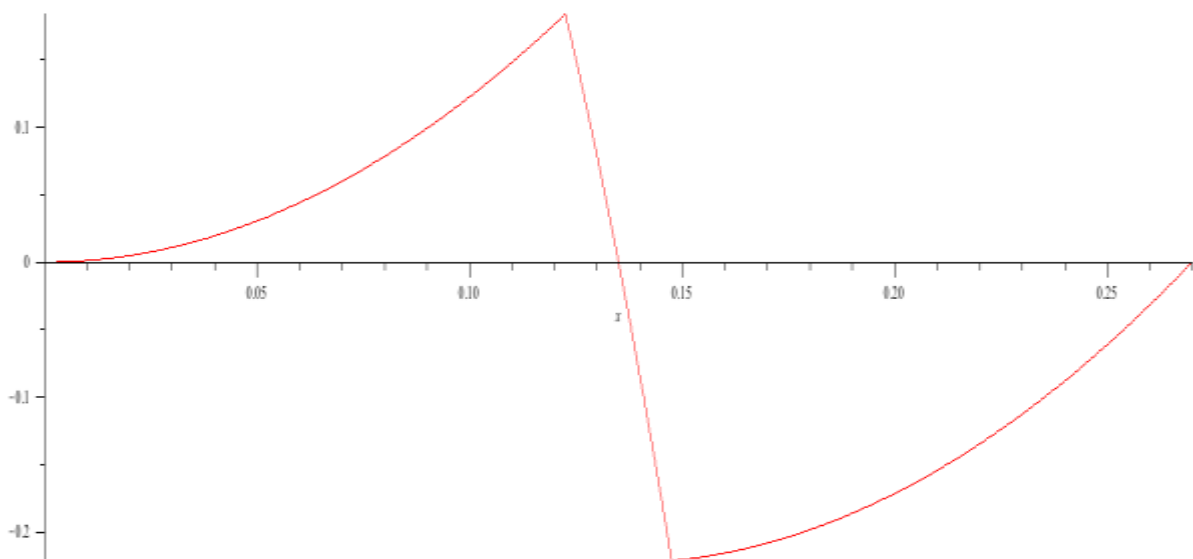
p2 := plot((Dw1·0.1225 + Dw2·(x - 0.1225))·x, x = 0.1225 ..0.1475)
                                          PLOT(...)

p3 := plot((Dw1·(x - 0.1475) + Dw1·0.1225 + Dw2·0.025)·x, x = 0.1475 ..0.27)
                                          PLOT(...)

display(p1, p2, p3)
```

**Figuur 55 - De berekeningen van het momentendiagram**

Het plotten van het momentendiagram (zie figuur 56) geeft een grafiek die de afstand op het zonnepaneel (op de x-as) geeft in functie van het moment in Nm (op de y-as).



**Figuur 57 - Het momentendiagram**

## 8.4 Maximale buigspanning

Voor het berekenen van de maximale buigspanning wordt de volgende formule gebruikt:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} * Y}{I_{tr}}$$

Hierbij is  $I_{tr}$  het traagheidsmoment van de dwarsdoorsnede en  $Y$  de afstand tot de neutrale lijn. Het neutrale vlak ligt bij de doorsnede van een balk in het midden van de doorsnede.

De maximale buigspanning kan vervolgens met volgende berekeningen worden uitgerekend. Hierin is  $H$  de dikte van het zonnepaneel.

$$M_{max} = Dw1 * 0,1225^2 = 0,1839 Nm$$

$$I_{tr} = \frac{b * H^3}{12} = \frac{0,225 * 0,002^3}{12} = 1,5 * 10^{-10} m^4$$

Waaruit volgt:

$$\sigma_{max} = \frac{0,1839 * 0,002}{1,5 * 10^{-10}} = 2,45 * 10^6 Pa$$

## 8.5 Maximale afschuifspanning

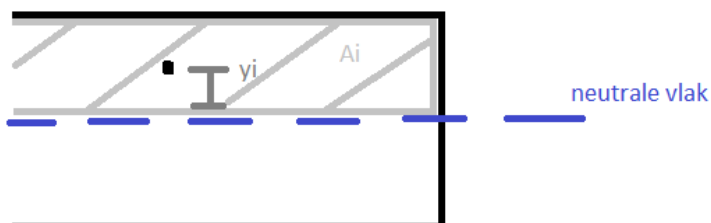
Bij het berekenen van de maximale afschuifspanning wordt de volgende formule gebruikt:

$$\tau_{max} = \frac{D_{max} * S_{y_{max}}}{I_{tr} * b}$$

$S_{y_{max}}$  is hierbij het maximale statische moment dat men in het paneel kan aantreffen.

$A_i$  = oppervlak van gearceerde gebied

$y_i$  = afstand van zwaartepunt van gearceerde gebied tot neutrale lijn



Figuur 58 - Schets voor berekening maximaal statisch moment

$S_y$  is maximaal op de neutrale lijn. Hieruit volgt:

$$y_i = \frac{1}{4} * H = \frac{1}{4} * 0,002 = 0,0005 \text{ m}$$

$$A_i = \frac{1}{2} * H * l = \frac{1}{2} * 0,002 * 0,025 = 2,5 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$S_{y_{max}} = y_i * A_i = 1,25 * 10^{-8} \text{ m}^3$$

Om te weten waar de dwarskracht D maximaal is, wordt gekeken naar de waarde van de extrema in het dwarskrachtendiagram. De twee extrema hebben dezelfde absolute waarde, waardoor het dus om het even is welk extremum gebruikt wordt voor verdere berekeningen. Het eerste extremum wordt genomen omdat dit het rekenwerk vereenvoudigt.

De maximale afschuifspanning wordt ten slotte als hieronder berekend.

$$\tau_{max} = \frac{Dw1 * 0,1225 * 1,25 * 10^{-8}}{1,5 * 10^{-10} * 0,225} = 2,78 * 10^5 \text{ Pa}$$

## 8.6 Maximale rek

De maximale rek wordt voor het zonnepaneel zowel voor de onderkant als voor de bovenkant van het zonnepaneel berekend.

### 8.6.1 Maximale rek voor de onderkant van het zonnepaneel

Voor het berekenen van de maximale rek aan de onderkant van het zonnepaneel wordt de volgende formule gebruikt:

$$\delta_{cd} = \frac{N * L}{A_{do} * E}$$

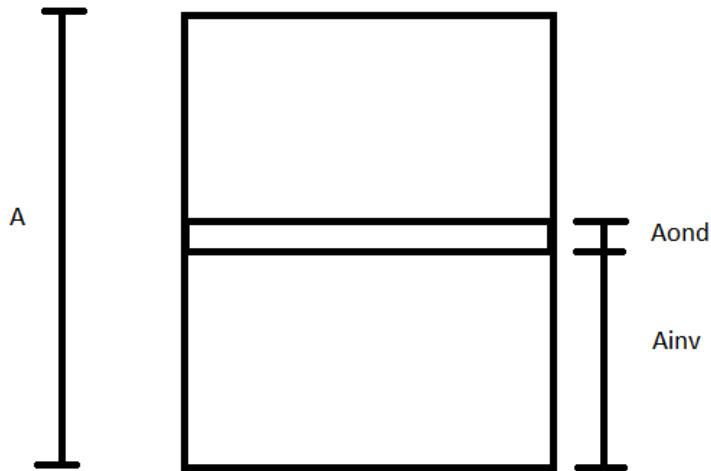
Hiervoor geldt:

$A_{do}$  = oppervlakte van de doorsnede

$A_{inv}$

= oppervlakte van het oppervlak waarop het deel van de verdeelde belasting een invloed zal hebben





**Figuur 59 - Schets van het zonnepaneel**

$L = \text{afstand van onderste rand van het zonnepaneel tot de ondersteuning} = 0,1225 \text{ m}$

$E = \text{de elasticiteitsmodulus van aluminum} = 73,1 * 10^9 \text{ N/m}^2$

$A_{do} = b * H = 0,225 * 0,002 = 0,00045 \text{ m}^2$

$N = A_{inv} * \left( F_z * \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{\min}\right) - F_a * \sin(\theta_{\min}) - F_w * \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{\min}\right) \right) = 0,656 \text{ N}$

De componenten van de kracht van de steun worden niet meegerekend, want samen zijn ze negatief, dus verminderen ze de rek. Dit is tevens de reden waarom de rek het grootste zal zijn onder het deel van  $A_{inv}$ .

Het onderstaande resultaat is de maximale rek van de onderkant van het zonnepaneel. De rek is slechts zeer klein, waardoor men duidelijk kan zien dat rek te verwaarlozen is.

$$\delta_{cd} = \frac{0,656 * 0,1225}{0,00045 * 73,1 * 10^9} = 2,44 * 10^{-9} \text{ m}$$

### **8.6.2 Maximale rek voor de bovenkant van het zonnepaneel**

Aan de bovenkant van het zonnepaneel wordt exact hetzelfde resultaat verkregen. Het enige verschil is dat de normaalkracht het paneel zal samen drukken en het resultaat dus geen uitrekking maar een indrukking is. Deze maximale indrukking bedraagt  $2,442 * 10^{-9} \text{ m}$ .



## Bijlage 2: Energy function - parameters

```
function dx = f(t,x)

a=0.1253; %hoek (0,1253 --> 7,18°)
M=0.75; %massa *****
g=9.81; %zwaartekracht
Ce=8.9285e-4; %inverse speed constant (1/1120)
r=0.05; %driving wheel STRAAL
Crr=0.012; %rolling resistance
Cw=0.5; %air drag coefficient *****
A=0.02; %Frontal area *****
p=1.293; %Air density
Isc=0.85; %short circuit current
Is=1e-8; %saturatie stroom
Ur=0.0257; %terminal voltage
m=1.23; %diode factor
N=15; %number of solar cells in serie
R=3.32; %terminal resistance (Ra)
ratio= 13; % van 0 tot 2
ratiob= 6; % van 2 tot 4
ratioc= 6; % van 4 tot 10
ratiod= 6; % van 10 tot 12
ratioe= 13; % van 12 tot 14

options=optimset('TolFun',1e-15);

%x(2)
%pause
sol = zeros(1,2);
[sol,f]= fzero('func',sol(2),options,x(2));
%pause

U=sol
if U>9
    I=0 ;
else
    I=Isc-Is*(exp(U/(m*N*Ur))-1)
end
```



## Bijlage 4: Energy solver

```
1 |
2 |
3 - close all;
4 - clear all;
5 |
6 |
7 - t0 = 0; % Start time
8 - tf = 10; % Stop time
9 |
10 - x0 = [0 0]'; % Initial conditions
11 - options = odeset('RelTol',1e-5);
12 - [t,s] = ode15s(@Energy_func,[t0,tf],x0,options);
13 % [t,s] = ode45(@Energy_func,[t0,tf],x0);
14 % s=[ pos vel] as function of time T
15 |
16 |
17 |
18 - plot(t,s(:,1))
19 |
20 - figure
21 - plot(t,s(:,2))
22 |
23 |
24 |
25 |
26 |
```

## Bijlage 5: Function

```
1 | function f =func(var,vel)
2 |
3 - U=var;
4 |
5 - Isc=0.85;
6 - Is=1e-8;
7 - Ur=0.0257;
8 - m=1.23;
9 - N=15;
10 - R=3.32;
11 |
12 - Ce=8.9285e-4;
13 - r=0.05;
14 - ratio=6;
15 |
16 |
17 - f=U - R*(Isc-Is*(exp(U/(m*N*Ur))-1)) -60*Ce*vel*ratio/(2*pi*r); %U - R(i(t))-E(t)
18 |
```

## Bijlage 6: Excel uitzetten afstands- en snelheidsgrafieken

Parameter	waarde	t	s	v	l	E	a
a	0,12531464	0	0	0	0,85	0	3,622
M	0,75	0,1	0,018	0,362	0,847	0,803	3,605
g	9,81	0,2	0,072	0,723	0,850	0,803	2,335
Ce	0,00089285	0,3	0,156	0,956	0,850	1,602	2,949
r	0,05	0,4	0,267	1,251	0,850	2,120	2,928
Crr	0,012	0,5	0,406	1,544	0,850	2,773	2,991
Cw	0,5	0,6	0,576	1,843	0,850	3,422	2,994
A	0,05	0,7	0,775	2,142	0,850	4,085	2,974
p	1,293	0,8	1,004	2,440	0,850	4,749	2,931
Isc	0,85	0,9	1,263	2,733	0,850	5,408	2,869
Is	0,00000001	1	1,550	3,020	0,850	6,058	2,793
Ur	0,0257						
m	1,23						
N	15						
R	3,32						
ratio	13						

t	s	v	l	E	a
0	0	0	0,85	0	3,622
0,2	0,072	0,724	0,805	1,606	3,455
0,4	0,286	1,415	0,850	1,606	2,265
0,6	0,615	1,869	0,850	3,138	2,787
0,8	1,044	2,426	0,850	4,142	2,664
1	1,583	2,959	0,850	5,378	2,603

t = tijd (s)

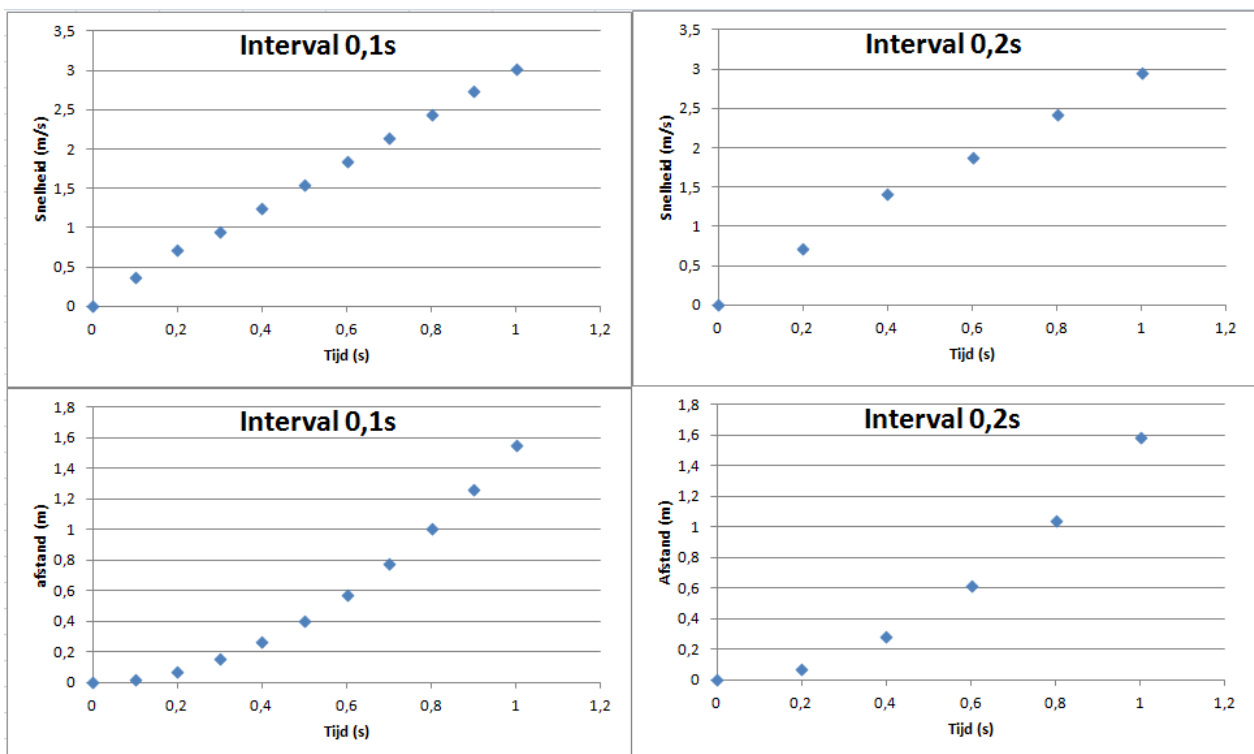
s= afstand (m)

E= Spanning gegenereerd door de motor (V)

l= stroom (A)

v = snelheid (m/s)

a= versnelling (m/s<sup>2</sup>)



## Bijlage 7: Berekening van de weerstandskrachten

Verschillende weerstanden zorgen voor een zekere weerstandskracht. Deze worden hier berekend. Naast de verschillende krachten wordt ook de weerstandscoëfficiënt bepaald.

### Luchtweerstand

De luchtweerstandcoëfficiënt wordt geschat op 1. De dichtheid van lucht bedraagt bij 20-25 °C ongeveer 1,2 kg/m<sup>3</sup>. Bij vrijloop ligt de topsnelheid bij 4,2m/s. De wortel van deze topsnelheid geldt als gemiddelde. Als men dan de frontale oppervlakte van de SSV zonder zonnepaneel op 0,0100 m<sup>2</sup> schat, dan is de frontale oppervlakte in het ergste geval (zonnepaneel in grootste hoek) 0,0522 m<sup>2</sup>. Daaruit kan dan de kracht berekend worden die door de lucht wordt uitgeoefend op het wagentje in het ergste geval (grootste hoek met de zon, topsnelheid).

$$F_W = \frac{1}{2} * C_w * A * \rho * v^2$$

$$F_W = \frac{1}{2} * 1 * 0,0522 * 1,2 * \sqrt{4,2}^2$$

$$F_W = 0,1315 N$$

### Rolweerstand

De rolweerstand wordt bepaald door het gewicht van de SSV en de rolweerstandcoëfficiënt. De rolweerstandcoëfficiënt zal worden afgeleid aan de hand van de testrit en deze formule. Dat de normaalkracht zal verschillen bij de helling ten opzichte van het platte stuk wordt hier verwaarloost omdat dit slechts een zeer klein verschil is. De massa van de SSV is 1,1kg.

$$F_r = C_{rr} * N$$

$$N = 1,1 * 9,91 = 10,8$$

$$F_r = C_{rr} * 10,8$$

### Hellingsweerstand (hier is dit winst)

De kracht die tijdens de helling wordt uitgeoefend op de SSV is de eerste vier meter positief ten opzichte van de bewegingsrichting. De laatste vier meter is deze negatief ten opzichte van de bewegingsrichting, maar deze blijft even groot. De massa van de SSV is 1,1kg.

$$F_{slope} = m * g * \sin(\alpha)$$

$$\sin(\alpha) = \frac{0,5}{4} = 0,125$$

$$F_{slope} = 1,1 * 9,81 * 0,125 = 1,35 \text{ N}$$

De SSV legt tijdens de testrit negen meter af. De eerste vier meter worden afgelegd in een tijd van 2,71 s en de totale negen meter wordt afgelegd in 6,65 s.

De arbeiden zijn dan als volgt (stel  $v = 2 \text{ m/s}$ ):

Luchtweerstand (over de volledige negen meter):

$$W = 0,1315 * 9m = 1,18 \text{ J}$$

Rolweerstand (over de volledige negen meter):

$$(C_{rr} * 10,8) * 9m = (97,2 * C_{rr}) \text{ J}$$

Hellingsweerstand (enkel bij de eerste vier meter aanwezig):

$$W = 1,35 * 4m = 5,4 \text{ J}$$

Als men de tandwielweerstand (in vrijloop, maar de tandwielen draaien nog mee met de wielen) even groot schat als de luchtweerstand en de rolweerstand tezamen (deze is niet te bepalen), bekomt men voor de weerstandcoëfficiënt:

$$5,4 \text{ J} = 2 * (1,18 + (97,2 * C_{rr})) \text{ J}$$

$$C_{rr} = \frac{\frac{5,4}{2} - 1,18}{97,2} = 0,0156$$

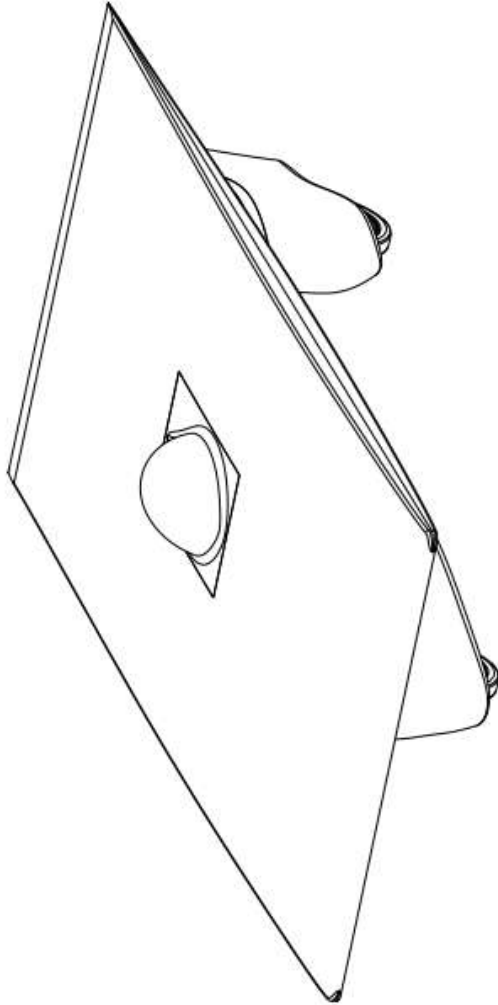
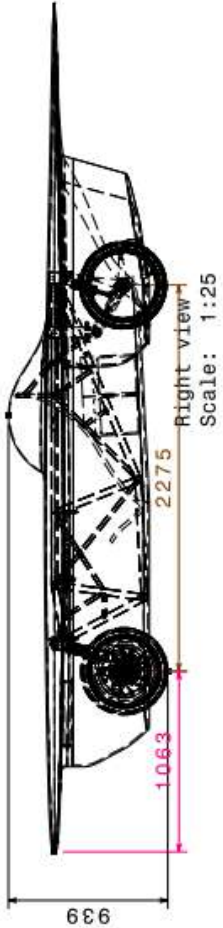
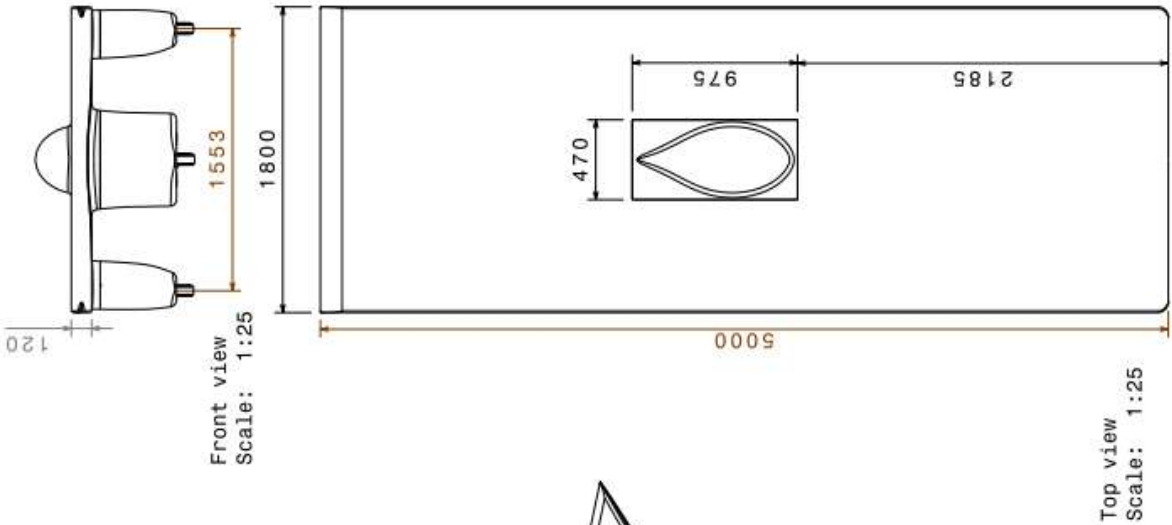
De uiteindelijke weerstandcoëfficiënt bedraagt 0,0156.

De arbeid die de rolweerstand dan levert is:

$$W = 10,8 * 0,0156 = 0,1685 \text{ J}$$



**Bijlage 8: Technische tekening van de Umicar**



## Bijlage 9: Lagrange vergelijking

Dit is de Lagrange vergelijking is de basis voor de *Simulink* simulatie en de *matlab* berekeningen. Hieronder is de manuele numerieke benadering te vinden.

Kinetic energy ( $E_k$ ):  $Mv^2(t)/2$

Change of Potential energy ( $E_p$ ):  $Mg\sin(\alpha) \times (4 - s(t))$

Dissipated power ( $P=F \times v(t)$ ):  $MgC_{rr} \cos(\alpha) \times v(t)$  ;  $C_w A \rho \times v^3(t)/2$

Input work ( $W=UIt$ ):  $E(t)I(t) \times dt$

$d/dt [\partial(E_k - E_p)/\partial v] - [\partial(E_k - E_p)/\partial s] = [-\partial P/\partial v] + [\partial W/\partial s]$  (niet conservatief systeem)

Kan geschreven worden als:

$a(t) = g(\sin(\alpha) - \cos(\alpha) \times C_{rr}) + I(t) \times E(t)/(M \times v(t)) - 3C_w A \rho \times v^2(t)/2M$

Motor:  $E(t) = K_e \times \omega = C_E \cdot \Phi \times 60 \times v(t) \times \text{gear ratio} / (2\pi r)$

Solar panel:  $I(t) = I_{sc} - I_s (e^{U(t)/(mN U_r)} - 1) = I_{sc} - I_s (e^{(E(t)+I(t)R)/(mN U_r)} - 1)$

Oplossing met numerieke aproximatie method:

1. Zonnewagen parameters:

$$\alpha = 5^\circ; g = 9.81 \text{N/kg}; C_{rr} = 0.012; C_E \cdot \Phi = 8.9285 \text{e}^{-4} \text{V/rpm}; \\ r = 0.04 \text{m}; \pi = 3.14; M = 1 \text{kg}; C_w = 0.5; A = 0.02; \rho = 1.293 \text{kg/m}^3$$

Zonnepaneel parameters:  $I(t) = I_{sc} - I_s (e^{(E(t)+I(t)R)/(mN U_r)} - 1)$

$$I_{sc} = 0.88 \text{A}; I_s = 1 \text{e}^{-8} \text{A/m}^2; m = 1.1; N = 15; U_r = 0.0257 \text{V}; R_a = 3.32 \Omega$$

2. Los de energie vergelijking op

Initiële conditie:  $s(0) = 0$ ;  $v(0) = 0$ ;  $I(0) = 0.88 \text{A}$

$$a(0) = g(\sin(\alpha) - \cos(\alpha) \times C_{rr}) + I(0) \times E(0)/(M \times v(0)) - 3C_w A \rho \times v^2(0)/2M \approx 2.615 \text{m/s}^2$$

**Tijdens elk tijdsinterval (T, 0.1s) blijf de acceleratie constant.**

3. Bereken de initiële conditie van het volgende tijdsinterval

$$v(0.1) = a(0) \times T = 2.615 \text{m/s}^2 \times 0.1 \text{s} = 0.2615 \text{m/s}$$

$$s(0.1) = v(0) \times T + a(0) \times T^2/2 = 0.0131 \text{m}$$

$$E(0.1) = C_E \cdot \Phi \times 60 \times v(0.1) \times \text{gear ratio} / (2\pi r) = 0.5577 \text{V}$$

$$I(0.1) = I_{sc} - I_s (e^{(E(0.1)+I(0.1)R)/(mN U_r)} - 1) \approx 0.87 \text{A}$$

4. Los de energie vergelijking op

$$a(0.1) = g(\sin(\alpha) - \cos(\alpha) \times C_{rr}) + I(0.1)E(0.1)/(M \times v(0.1)) - 3C_w A \rho v^2(0.1)/2M \approx 2.593 \text{m/s}^2$$

5. Bereken de initiële conditie van het volgende tijdsinterval

$$v(0.2) = v(0.1) + a(0.1) \times T = 0.5208 \text{m/s}$$

$$s(0.2) = s(0.1) + v(0.1) \times T + a(0.1) \times T^2/2 = 0.0522 \text{m}$$

$$E(0.2) = C_E \cdot \Phi \times 60 \times v(0.2) \times \text{gear ratio} / (2\pi r) = 1.1107 \text{V}$$

$$I(0.2) = I_{sc} - I_s (e^{(E(0.2)+I(0.2)R)/(mN U_r)} - 1) \approx 0.87 \text{A}$$

6. ...

## Bijlage 10: Budgettering

Dit zijn alle uitgaven (en inkomsten) van het project.

Onderdelen en werktuigen									
Onderdeel	Aantal	Beschrijving	Prijs	Leverancier	Datum	Teamlid	Opmerkingen	terugbetaald	INDIEN TERUGBETAALD
Tandwielen	2	11 tanden, staal	8	Caracars Modelbouw	24/03/2012	Joris	/	J	8
NINCO Motorritzel Werkzeug	1	Om tandwielen op assen te plaatsen	19	Caracars Modelbouw	24/03/2012	Joris	/	J	19
Frame en wielen	1	Frame en wielen van wagen	11	Fablab	24/03/2012	Sam	/	J	11
Frame lichter	1	Lichter frame	4,5	Fablab	17/04/2012	Raphaël	/	J	4,5
Secondelijm	1	Lijmen	5,79	Gamma	25/04/2012	Raphaël	/	J	5,79
Twee componentlijm	1	Verstegingen/lijmen	9,99	Gamma	25/04/2012	Raphaël	/	J	9,99
Twee componentlijm	1	Twee componentenlijm	5	Brico	21/04/2012	Joris	/	J	5
Lagers assen	/	Kogellagers en assen	49,99	Caracars Modelbouw	21/04/2012	Joris	/	J	49,99
Klitteband + schildertape	/	/	8,55	Brico	21/04/2012	Sam	/	J	8,55
Elektronika	/	Arduino + Bekabeling	57,59		17/03/2012	Lennert	/	J	57,59
Plaat Fablab	/	Versnellingsbox	9	Fablab	17/04/2012	Sam	/	J	9
Lagers en rollementen	/	/	7,5	Albatros	24/04/2012	Jason	/	J	7,5

Gelddonaties							
Persoon	Eerste donatie	Tweede donatie	Totaal	Persoon	Eerste donatie	Tweede donatie	Totaal
Sam	10	15	25,00	Raphaël	10	15	25,00
Lennert	10	15	25,00	Jason	10	15	25,00
Joris	10	15	25,00	Zeger	10	15	25,00
Sander	10	15	25,00	Sus	10	15	25,00

Samengevat	
INPUT	200
TERUGBETAALDE UITGAVEN	195,91
HUIDIGE KAS	4,09
ALLE UITGAVEN SAMEN	195,91
ALS ALLES TERUGBETAALD	4,09

## **Bijlage 11: Technische tekening**

De technische tekening van het frame van de SSV is te vinden in de externe bijlage.