

De Waterstofboot

Een profielwerkstuk over de bouw van een zonneboot, de ombouw tot waterstofboot en het gebruik van waterstof in de Nederlandse pleziervaart



Mathijn L.A. Brink, Jesper B. Pijnacker & Jonas J. Rensmaag

Begeleider: Stephan G.H. Berendsen

In samenwerking met: Port of Den Helder, Gemeente Den Helder & DeoBoat

Profiel: Natuur & Techniek met biologie en economie

6 vwo (2015-2021)

Lyceum aan Zee te Den Helder

SAMENVATTING

In dit profielwerkstuk onderzoeken Mathijn Brink, Jesper Pijnacker en Jonas Rensmaag hoe ze een zonneboot kunnen ombouwen tot een waterstofboot. Ze behoren tot het Solar Team Lyceum aan Zee 2020 en hebben met een groep van negen 6 vwo scholieren een zonneboot gebouwd in 2019 en 2020. Met deze boot hebben ze deelgenomen aan de Young Solar Challenge en zijn ze vijfde van Nederland geworden. Hierna besloten Mathijn, Jesper en Jonas om deze boot te verbeteren door een waterstoftank en brandstofcel toe te voegen om de actieradius te vergroten. Om dit mogelijk te maken hebben ze zich verdiept in waterstof en deze kennis toegepast tijdens het ombouwen van de boot. Ook hebben ze sponsors gevonden voor dit project, waardoor deze boot Scholen aan Zee netto geen geld gekost heeft en vooral veel positieve media-aandacht heeft opgeleverd. De techniek achter de waterstofboot wordt uitgebreid toegelicht en de resultaten van de testvaart geanalyseerd. Tenslotte wordt gekeken naar de mogelijkheden voor het gebruik van waterstof als energiedrager voor de Nederlandse pleziervaart.

Veel leesplezier!

INHOUDSOPGAVE

Samenvatting.....	2
Inhoudsopgave	3
Voorwoord.....	7
Inleiding	8
Hoofdvraag	9
Hypothese	9
Deelvragen	9
Opmerkingen vooraf.....	9
1. De zonneboot	10
1.1 Ontstaan Solar Team Lyceum aan Zee	10
1.2 Bouwproces	11
1.2.1 Herstelwerkzaamheden.....	11
1.2.2 Houtwerk.....	11
1.2.3 Epoxy.....	12
1.2.4 Glasvezel lamineren	13
1.2.5 Plamuur- en spuitwerkzaamheden	13
1.2.6 Drijftest en elektrisch systeem	14
1.2.7 Veiligheidseisen.....	14
1.3 Sponsorwerving en media-aandacht	15
1.3.1 Projectfinanciering	15
1.3.2 Mediastrategie.....	16
1.4 Race	17
1.4.1 Laatste voorbereidingen.....	17
1.4.2 Race	18
1.4.3 Resultaten.....	19
1.5 Conclusie	20
2. Waterstof als energiedrager.....	21
2.1 Waterstof	21
2.2 Productie waterstof.....	22
2.2.1 Grijs	22
2.2.2 Blauw.....	22
2.2.3 Groen.....	23
2.2.4 Alternatieven	23
2.3 Opslag en vervoer	24
2.3.1 Mogelijkheden opslaan	24
2.3.2 Mogelijkheden transporteren.....	24
2.3.3 Veiligheid.....	25

2.4	Brandstofcel.....	27
2.4.1	Werking brandstofcel.....	27
2.4.2	Toepassingen brandstofcel.....	28
2.4.3	Efficiëntie brandstofcel	28
2.4.4	Veiligheid brandstofcel	29
2.4.5	Overige soorten brandstofcellen	29
2.5	Vergelijking met accu's.....	31
2.5.1	Elektrochemische cel.....	31
2.5.2	Voordelen waterstof ten opzichte van een accu	31
2.5.3	Nadelen ten opzichte van een accu	33
2.6	Conclusie	33
3.	Ombouwen tot waterstofboot	34
3.1	Beperkingen van zonneboot	34
3.2	Ontwerpproces	35
3.2.1	Eerste ideeën	35
3.2.2	Bezoek aan Deoboat Rotterdam en Team Ecorunner Delft.....	36
3.3	Verbeterplan: project waterstofboot	37
3.3.1	Ideaal systeem	37
3.3.2	Definitief systeem.....	38
3.4	Uitgebreide beschrijving van de techniek	42
3.4.1	Torqueedo cruise 2.0 RS (motor).....	42
3.4.2	Rule 360 bilgepomp (lenspomp)	42
3.4.3	Relais (klein en groot) en motorswitch	42
3.4.4	Panasonic photovoltaic module, Model no. VBHN240SJ25 (zonnepanelen) ...	43
3.4.5	Optima Batteries Yellowtop model 8012-254 (accu's).....	43
3.4.6	Victron energy Bluesolar charge controller MPPT 75 / 15.....	44
3.4.7	Eaton Moeller RMQ-Titan - Drukknopkast M22-PV/KC11/IY (noodknop)	44
3.4.8	Hymera 200 (brandstofcel).....	45
3.4.9	Linde Genie (waterstoftank)	45
3.5	Constructie.....	46
3.5.1	Verbeteren van de bootconstructie	46
3.5.2	Elektrisch systeem.....	46
3.6	Veiligheid.....	48
3.6.1	Werkplaats	48
3.6.2	Boot	48
3.7	Financiering.....	49
3.7.1	Kosten.....	49
3.7.2	Baten	49

3.7.3	Balans	49
3.8	Conclusie	50
4.	De praktijk versus de theorie	51
4.1	Verwachte verbetering.....	51
4.1.1	Het doel	51
4.1.2	Theorie waterweerstand.....	51
4.1.3	Optimale en maximale snelheid.....	52
4.1.4	Actieradius	52
4.2	Testvaart 6 december 2020	53
4.2.1	Verloop van dag.....	53
4.2.2	Bevindingen.....	53
4.2.3	Resultaten.....	54
4.3	Verwerking van resultaten.....	55
4.3.1	Samengevoegde grafiek snelheid/vermogen	55
4.3.2	Uitkomst verwachtingen	55
4.3.3	Toepassingen van gegevens.....	57
4.4	Foutendiscussie	57
4.4.1	Windrichting	57
4.4.2	Verskil in gewicht tussen Jesper en Jonas	57
4.4.3	Aantal metingen	57
4.4.4	Onnauwkeurigheid in aantal watt.....	57
4.5	Conclusie	58
5.	Duurzame pleziervaart in Nederland	59
5.1	Situatie op dit moment	59
5.1.1	Dieselmotoren en uitstoot.....	59
5.1.2	Huidige duurzame initiatieven	59
5.2	Duurzame alternatieven voor diesel.....	60
5.2.1	LPG.....	60
5.2.2	Biobrandstof.....	61
5.2.3	Accu's.....	61
5.2.4	Zonnepanelen.....	61
5.2.5	Waterstof.....	61
5.2.6	Zeilen.....	62
5.3	Boten ombouwen.....	62
5.3.1	Zeilboten.....	63
5.3.2	Kleine motorboten	63
5.3.3	Middelgrote motorboten	63
5.3.4	Grote motorboten (topsegment)	63

5.4	Waterstofnetwerk in Nederland	64
5.4.1	Ideale oplossing.....	64
5.4.2	Productie	64
5.4.3	Vervoer	65
5.4.4	Waterstoftankstations	65
5.5	Conclusie	67
	Conclusie	68
	Reflectie.....	70
	Woord van dank	71
	Bibliografie	72
	Bijlagen.....	77
A.	logboek	77
B.	Elektrisch systeem van zonneboot	81
C.	Elektrisch systeem van waterstofboot.....	82
D.	Formulier technische keuring	83
E.	Resultaten testvaart 6 december 2020	84
	Jesper:.....	84
	Jonas:	85
F.	Krantenartikelen	86

VOORWOORD

Een VWO scholier zit tijdens zijn schooltijd voornamelijk in de boeken, de opleiding is erg theoretisch. In de vijfde klas kregen wij de mogelijkheid om met een team van negen scholieren een zonneboot te bouwen en deel te nemen aan de Young Solar Challenge 2020. Dit was de ideale kans om eindelijk een keer praktisch bezig te zijn en echt iets te bouwen. Met ons team bouwden we maandenlang aan de boot en lieten de docenten zien hoe een stapel latten en planken veranderde in een zonneboot met een topsnelheid van 16,5 km/h.

Project Zonneboot kwam precies op het juiste moment, onze school had een paar maanden eerder een vernietigend rapport van de Inspectie ontvangen en het complete schoolbestuur was naar huis gestuurd of opgestapt. De nieuwe directeur Hans van Beekum en de teamleiders Hielke ter Veld en Jeroen Roggeveen haalden letterlijk - tien containers vol oude troep werd opgehaald - en figuurlijk de bezem door de school. Ook ontstond er een cultuur waarin ruimte was voor initiatieven van leerlingen.

Door de boot kwam het Lyceum aan Zee geregeld positief in de lokale media en konden wij veel interessante personen ontmoeten. Deze hadden wij zonder dit project nooit gesproken. De burgemeester, zijn wethouders en verschillende directeuren van allerlei bedrijven kwamen kijken. Toen het geraamte enigszins op een boot begon te lijken begonnen we plannen te maken voor de periode na de race.

Al in januari 2020 was tijdens een sponsorwervingstraining het wilde idee ontstaan om de boot om te bouwen tot waterstofboot. Waterstof heeft namelijk de toekomst, tenminste dat zeggen Frans Timmermans en de artikelen die steeds vaker in de krant staan. Het idee was toen hoogstens een jongensdroom en zou waarschijnlijk nooit zijn uitgevoerd als wij niet thuis hadden gezeten tijdens de eerste lockdown als gevolg van Covid-19. Tijdens deze periode hadden wij veel tijd om na te denken en kwam dit idee weer naar voren toen wij in april een onderwerp moesten kiezen voor ons profielwerkstuk.

We mochten de boot gebruiken voor dit onderzoek, maar twijfelden hieraan. Het leek niet erg interessant om alleen een verslag te schrijven van het bouwproces, bovendien: wat zouden we precies moeten onderzoeken? Na een reeks Skypegesprekken kwamen we terug op het idee om de boot te veranderen in een waterstofboot. Het nadeel van de zonneboot zit al in de naam: de zon moet schijnen om te kunnen varen. Daar komt bij dat de motor meer energie verbruikt dan de twee zonnepanelen ooit opleveren, waardoor wij genoodzaakt zijn om 40 kg aan accu's aan boord te hebben. Om het feest compleet te maken is de laadtijd van deze accu's met onze acculader zo'n zes tot twaalf uur.

Het voordeel van waterstof is dat het een enorm hoge energiedichtheid heeft en makkelijk te tanken is. Daarnaast is het gewoon ontzettend gaaf om een boot op waterstof te hebben, zeker als je deze boot zelf hebt gebouwd. Totaal onervaren in de wereld van de waterstof begonnen wij plannen te maken voor de boot. De eerste plannen bleken achteraf onrealistisch of volledig onbetaalbaar. Na een bezoek aan waterstofexpert Marcus Rolloos in Rotterdam werd het uiteindelijke plan bedacht.

In de boot werd een brandstofcel ingebouwd waarmee waterstof uit een aan boord geplaatste tank (300 bar) wordt omgezet in elektrische energie. De actieradius van de boot werd hierdoor aanzienlijk vergroot, waardoor het mogelijk is om aankomend voorjaar van Alkmaar naar Den Helder te varen. Tijdens een testvaart bleek het systeem het te doen en wierp ons harde werk zijn vruchten af. Veel plezier met het lezen van dit profielwerkstuk!

Mathijn Brink, Jesper Pijnacker en Jonas Rensmaag

INLEIDING

Waterstof is de meest voorkomende stof in ons heelal, ongeveer driekwart van de totale materie bestaat uit waterstof. Naarmate de tijd verstreek is men steeds meer te weten gekomen over de eigenschappen van de stof en de mogelijkheden ervan. In het jaar 1800 produceerde chemicus Johann Wilhelm Ritter voor het eerst waterstof via elektrolyse, waterstof werd toen nog niet echt ergens voor gebruikt. In 1838 ontwikkelde Christian Friedrich Schönbein het eerste prototype van de moderne brandstofcel. In het jaar 1900 vond de eerste proefvlucht van een zeppelin gevuld met waterstof plaats; deze ontwikkeling belooft een belangrijke rol voor waterstof in de luchtvaart. Echter, in die tijd waren vliegtuigen ook in ontwikkeling en het neerstorten van de Hindenburg in 1937 kwam de reputatie van waterstof niet ten goede. Toch werd er in de eerste helft van de 20^e eeuw volop geëxperimenteerd met waterstof en brandstofcellen. Na 1970 doofde de stroom van ontwikkelingen een beetje uit. Tot nu.¹

De laatste jaren komt de naam waterstof steeds meer naar voren tijdens discussies over het klimaat, waterstof is namelijk een veelbelovende energiedrager. Het heeft de hoogste energiedichtheid van alle bekende stoffen en is volledig milieuvriendelijk. Desondanks stuit het gebruik van waterstof nog steeds op weerstand door onbekendheid en concurrentie van fossiele brandstoffen. Toch zijn er ontwikkelingen. Zo worden brandstofcellen voor steeds meer doeleinden gebruikt en verbeterd door de klimaatdiscussie de reputatie van waterstof.

Zoals eerder vermeldt ontwikkelde chemicus Johann Wilhelm Ritter de eerste versie van een elektrolyser. Een elektrolyser splitst met behulp van energie water in waterstof en zuurstof en is een volledig duurzame manier om waterstof te produceren. Waterstof is natuurlijk alleen duurzaam als de energie die gebruikt wordt voor de productie ook duurzaam is. Momenteel is dit nog lang niet altijd het geval.

In 1838 ontwikkelde Christian Friedrich Schönbein de eerste brandstofcel. Een brandstofcel is eigenlijk precies het omgekeerde van een elektrolyser. In plaats van water te splitsen in waterstof en zuurstof voegt een brandstofcel waterstof en zuurstof samen tot water. Hierbij is niet zoals bij een elektrolyser energie nodig, maar komt juist energie vrij. Deze energie kan gebruikt worden om allerlei elektrische apparatuur te voeden. Bijvoorbeeld een elektrische buitenboordmotor van een kleine boot.

Dat is precies wat er in dit profielwerkstuk gedaan is, met behulp van waterstof en een brandstofcel een boot aandrijven. De beschikbare boot was een zonneboot die door het Solar Team Lyceum aan Zee 2020 is gebouwd om mee te doen aan de Young Solar Challenge 2020. Met hulp van sponsors lukte het om de boot om te bouwen tot een waterstofhybride boot. Na het ombouwen werden er tests uitgevoerd om te kijken of de boot door waterstof kon worden aangedreven. Dit bleek mogelijk, de boot voer tijdens de testvaart op waterstof circa zeven km/uur en de actieradius werd enorm vergroot.

Verder zijn de mogelijkheden van waterstof in de Nederlandse pleziervaart onderzocht, onderverdeeld in productie, vervoer, tankstations en de mogelijkheid van het ombouwen van boten tot waterstofboten. Waterstof heeft zeker potentie als brandstof in de pleziervaart, het is lichter dan accu's en schoner dan fossiele brandstoffen.

Waterstof heeft enorm veel potentie in deze veranderende wereld en zal een steeds belangrijkere rol gaan vervullen als vervanger van fossiele brandstoffen. Er zijn nog enkele struikelblokken in de technologie, maar de ontwikkeling van brandstofcellen staat niet stil en deze problemen zullen uiteindelijk worden verholpen. Als dit lukt is er een grote kans dat waterstof de brandstof van de toekomst zal zijn.²

¹ (Viessmann Belgium, Onbekend)

² (Walle, 2020)

HOOFDVRAAG

“Hoe kan een zonneboot worden omgebouwd tot waterstofboot en kan waterstof gebruikt worden om de pleziervaart in Nederland te verduurzamen?”

HYPOTHESE

Wij denken dat het mogelijk is om onze zonneboot om te bouwen tot waterstofboot. Dit wordt bereikt door een brandstofcel en een waterstoftank toe te voegen aan het systeem. Door deze aanpassing zal de actieradius van de boot toenemen. Als deze hypothese klopt, is onze vervolghypothese dat waterstof kan worden gebruikt om de Nederlandse pleziervaart te verduurzamen door schepen om te bouwen tot waterstofboot en een waterstofnetwerk aan te leggen dat de waterstof vervoert van de productielocaties naar de waterstoflaadpunten van de pleziervaart.

DEELVRAGEN

1. *Hoe bouw je een zonneboot?*
2. *Hoe kan waterstof worden gebruikt als energiedrager?*
3. *Hoe bouw je een zonneboot om tot waterstofboot?*
4. *Wat is het effect van de toevoeging van een brandstofcel in vergelijking met de verwachte verbetering?*
5. *Hoe kan waterstof worden gebruikt om de Nederlandse pleziervaart te verduurzamen?*

OPMERKINGEN VOORAF

Dit document bestaat uit vijf hoofdstukken waarbij in ieder hoofdstuk één deelvraag wordt behandeld. Deze hoofdstukken bestaan uit meerdere kopjes waarin minideelvragen worden besproken, de conclusies hiervan ondersteunen de conclusie van ieder hoofdstuk en de eindconclusie. Aan het eind van het document treft u een aantal bijlagen aan:

- A. Logboek
- B. Elektrisch systeem van zonneboot
- C. Elektrisch systeem van waterstofboot
- D. Formulier technische keuring
- E. Resultaten testvaart 6 december 2020
- F. Krantenartikelen

De bronnen die voor dit document zijn gebruikt, zijn opgenomen in de bibliografie. Tevens wordt er verwezen naar deze bronnen door middel van voetnoten³ en verkorte notaties van deze bronnen. Het grootste deel van dit verslag is geschreven in de derde persoon, alleen waar nodig is de wij-vorm gebruikt. Bij het gebruik van het woord 'brandstofcel' wordt in dit hele profielwerkstuk een PEM waterstofbrandstofcel⁴ bedoeld, tenzij anders vermeld.

³ Voorbeeld: (NVON-commissie, 2013)

⁴ Zie hoofdstuk 2 voor uitleg over PEM brandstofcel

1. DE ZONNEBOOT

In dit hoofdstuk wordt verteld hoe het Solar Team Lyceum aan Zee in een jaar tijd een zonneboot heeft gebouwd en vijfde werd tijdens de Young Solar Challenge (YSC) 2020. Het was een geweldig jaar waarin het team ontzettend veel heeft geleerd. Er wordt een antwoord gegeven op de eerste deelvraag: *Hoe bouw je een zonneboot?*

1.1 ONTSTAAN SOLAR TEAM LYCEUM AAN ZEE

Hoe is het Solar Team Lyceum aan Zee ontstaan?

Op dinsdag 2 juli 2019 had de Medezeggenschapsraad van het Lyceum aan Zee zijn laatste vergadering in Restaurant Lands End in Den Helder. Het was een turbulente tijd, twee weken eerder was het volledige management opgestapt nadat het Lyceum aan Zee door de onderwijsinspectie ‘zeer zwak’ was verklaard⁵. Tijdens het afsluitend etentje na deze vergadering vertelde de nieuwe directeur Hans van Beekum over een nog vrijwel ongebruikt bouw pakket voor een zonneboot. Het skelet van de boot stond al ruim een jaar ontzettend in de weg op het Beroepsonderwijs aan Zee en het zag er niet naar uit dat er ooit nog aan gewerkt zou worden. ‘Hé Mathijn, jij wilt toch iets technisch gaan studeren? Ga jij volgend jaar eerst maar eens een boot bouwen’, werd er gezegd. En zo ontstond in een restaurant met uitzicht over de Waddenzee op een mooie zomeravond het idee voor het Solar Team.

Direct na de zomervakantie werd een team geformeerd bestaande uit negen leerlingen uit de vijfde klas van het VWO. Het Solar Team Lyceum aan Zee was ontstaan en werkte de rest van het jaar hard door om de boot af te krijgen voor de Young Solar Challenge 2020. Er stonden drie raceweekenden in de planning in mei en juni 2020 (Akkrum, Purmerend en Naaldwijk) en de winnaar zou zich Nederlands kampioen zonnebootrace mogen noemen. Om ervaringen uit te wisselen en inspiratie op te doen is het Solar Team in februari 2020 langs geweest bij het TU Delft Solar Boat Team. Ook volgden ze twee juniorclasses bij de NHL Stenden in Leeuwarden, hier kregen ze alle informatie over de races en techniek achter de boot.

“De Young Solar Challenge is een fantastisch project voor jongeren tussen de 14 en 17 jaar. Het doel is om meer jongeren enthousiast te maken voor techniek en dit doen we op een leuke en interactieve manier door ze zelf een zonneboot te laten bouwen. Op deze manier komen ze niet alleen in contact met techniek, maar ook nog eens met innovatie en duurzaamheid. Bovendien spelen onder andere teamwork, tactiek, communicatie, begroten en sponsoring ook een belangrijke rol. Voor sommige jongeren is dit project niet alleen een super ervaring maar vinden ze ook hun roeping in de techniek.”⁶



⁵ (Duin, 2019)

⁶ (Young Solar Challenge, sd)

1.2 BOUWPROCES

Hoe verliep het bouwproces van de zonneboot?

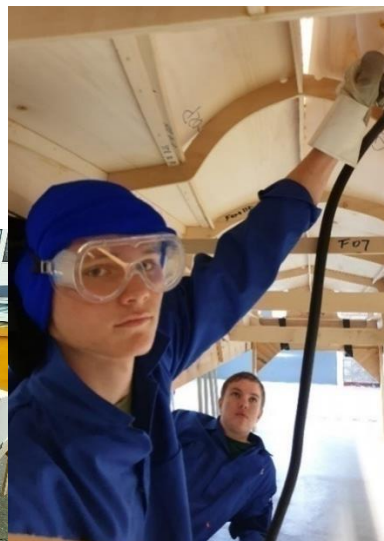
1.2.1 Herstelwerkzaamheden

Het bouwpakket voor de zonneboot was besteld voor de leerlingen van het Beroepsonderwijs aan Zee. Helaas is er in het hele jaar dat de boot zich hier bevond vrijwel niets gebeurd met dit bouwpakket, het geraamte stond half overleind en de kiel was scheef gebouwd. Ook waren er minstens vier planken gebroken of onherstelbaar beschadigd. Gelukkig schoot mevrouw Kloppers van de Mavo aan Zee ons te hulp en mochten de beschadigde onderdelen opnieuw worden gemaakt met behulp van een lasersnijmachine in haar lokaal. Het apparaat was te klein om de meeste onderdelen direct te maken, dus werden deze componenten als puzzelstukjes gemaakt en later in elkaar gezet. De kiel trok tijdens het bouwproces gelukkig steeds rechter als gevolg van de spanning van de rest van de onderdelen hierop.



1.2.2 Houtwerk

Nadat de boot was gerepareerd kon het werk echt van start gaan. In een korte tijd werden er grote stappen gezet en al rond de kerstdagen werden de eerste platen aan de boot vast gespijkerd. De zijanten waren geen enkel probleem, deze werden met behulp van een spijkerpistool en een paar honderd spijkers vastgezet. Echter, de onderkant van de boot is gebogen en hout (tri- en multiplex) is van nature niet erg buigzaam. Bij een te grote kracht op een plaat bleek deze al snel scheuren vertonen en uiteindelijk breken. Er is geëxperimenteerd met verschillende technieken om deze platen te buigen. Nadat een plantenspuit niet erg effectief bleek te zijn is een behangstoommachine gebruikt. Gelukkig bleek dit goed te werken en is het gelukt om de zijplaten te buigen. Het 'trial and error' stoomproces heeft meer dan een maand tijd in beslag genomen. Het volgende Solar Team is aangeraden om de stoomtechniek verfijnen door gebruik te maken van een stoomkist, om zo het proces te versnellen.



1.2.3 Epoxy

In half maart ging heel Nederland in een ‘intelligente lockdown’ en moesten alle scholen dicht. Het was binnen de maatregelen helaas niet mogelijk om op school verder te bouwen aan de zonneboot. Om die reden is de boot op 30 maart 2020 tijdelijk verhuisd naar de loods bij het huis van een van de teamleden (Finn Braat). In de nieuwe werkplaats kon worden begonnen met het waterdicht en stevig maken van de zonneboot. Allereerst werd al het hout ontvet en geschuurd. Daarna werd al het hout bewerkt met injectiehars, een sterk ruikende vloeistof die bestaat uit twee componenten. Injectiehars trekt in het hout en vult alle luchtbellens, waar het stolt en het hout steviger maakt. Ook werden alle kieren gevuld met epoxy primers, het effect is vergelijkbaar met kit.



Hoewel dit hele epoxyproces hier in een paar zinnen wordt beschreven, heeft het meerdere maanden geduurd. Dit kwam hoofdzakelijk door het gebrek aan ervaring met epoxy en de strenge maatregelen die golden tijdens de eerste golf van de coronacrisis. Het team werkte bijvoorbeeld steeds met maximaal twee (later drie) personen tegelijkertijd aan de boot. De punt en spiegel van de boot zijn bewerkt met een verf op epoxybasis omdat deze delen van boot later slecht bereikbaar voor een kwast zouden zijn. Er is heel veel geleerd in deze maanden en uiteindelijk is het hele epoxyproces goed doorlopen.



1.2.4 Glasvezel lamineren

Nadat de laatste kieren waren gevuld met stroperige epoxy kon men eindelijk spreken van een boot. Echter, er waren nog een paar stappen te nemen voordat de boot daadwerkelijk te water kon worden gelaten. Om de zonneboot stevigheid te geven moest hij worden gelamineerd met glasvezel en nóg meer epoxy. Het bleek uiteindelijk moeilijker dan verwacht omdat het lastig was om geen luchtballen onder de glasvezelmat te krijgen tijdens het lamineren. Daarnaast reageren de twee componenten van de impregneerhars (epoxy) erg snel waardoor de beschikbare werktijd vaak niet meer dan twintig minuten is. Bij een warme buitentemperatuur reageert de hars bovendien extra snel, wat ervoor zorgt dat de epoxy al binnen een paar minuten te hard wordt om te gebruiken en zelfs begint te roken. Dit heeft er in geresulteerd dat er tijdens de warmste weken van de zomervakantie niet kon worden gewerkt, afgezien van een poging om na een barbecue in de koelte van de schemering door te werken.



1.2.5 Plamuur- en spuitwerkzaamheden

Hoewel de glasvezelmat op het grootste deel van het onderwaterschip en een deel van de zijanten er keurig op zat, waren er ook grote stukken simpelweg mislukt. De glasvezel zat niet goed vast, de epoxy was verkeerd gemengd en niet uitgehard of er waren grote en kleine luchtballen ontstaan. Meneer v.d. Westelaken van Westelaken Spuiterij hadden we een paar weken eerder gevraagd of hij onze boot wilde spuiten. Hij vond het een mooi project en hielp ons graag. Er bleek alleen veel meer werk in de boot te zitten dan hij had verwacht, doordat de glasvezellaag deels was mislukt kon hij de boot niet direct spuiten. Eerst werden de mislukte stukken er deels afgeschuurd, hierbij hebben een aantal teamleden meegewerkt. Vervolgens werden deze delen gecorrigeerd of vervangen door polyesterplamuur. Dit heeft meneer v.d. Westelaken erg veel tijd gekost, hij vertelde ook: 'het spuiten zelf is echt maar een paar minuten werk, maar de voorbereiding kost vaak dagen'. De boot werd eerst wit gespoten en vervolgens in twee extra kleuren. Het spuiten ging inderdaad razendsnel en op 1 oktober 2020 met nog 48 uur tot de race kon de boot terug naar school.



1.2.6 Drijftest en elektrisch systeem

Op donderdag 1 oktober 2020 stond de boot weer op school en was het tijd om te testen of de boot überhaupt zou blijven drijven. Gelukkig heeft onze school een vijver en lukte het – met wat getrek en geduw – de boot hierin te krijgen. Tot opluchting van de menigte die zich om de vijver had verzameld, bleef de boot drijven. Jeroen v.d. Meijden en Sonny Kloosterman gingen in hun onderbroek het water in om een rondje te peddelen in de vijver. De boot lag keurig in het water en werd er weer uitgetild, een half uur stond iedereen klaar voor de schoolfotograaf. De een met zijn mooiste kleren aan, de andere met modder aan zijn voeten.

Op donderdag en vrijdag werd er druk gewerkt aan de boot, in twee dagen tijd moest het hele elektrische systeem worden opgebouwd. Het systeem zal in hoofdstuk 3 uitgebreid worden toegelicht zodat alle gegevens op één plek staan en niet dubbel worden besproken. Er werd een oude stoel gesloopt en in de boot geplaatst, een kikker op de punt gezet, het stuursysteem aangesloten en vooral heel veel gesleuteld aan de accu's, motor, zonnepanelen, zekeringen, relais, kabels et cetera. Om iedereen in goed humeur te houden werden er 's avonds hamburgers gebakken. Het was een ware race tegen de klok en weinig docenten en klasgenoten hadden er vertrouwen in dat de boot op 3 oktober zou gaan racen.



1.2.7 Veiligheidseisen

Om deel te mogen nemen aan de Young Solar Challenge moeten de boot en schipper voldoen aan alle regels van de *Technical Regulations*⁷. In normale omstandigheden wordt de dag voor de race een uitgebreide technische inspectie van de boot gedaan, hierbij wordt onder andere de boot volgegooid met water om te testen of de lenspomp (bilgepomp) het doet en voldoende capaciteit heeft. Ook worden alle teamleden overhoord over de technische details van de boot en moeten de schippers een vaar- en zwemtest doen.

In verband met de coronamaatregelen werd de YSC 2020 in een andere vorm dan gebruikelijk gehouden. Het was hierdoor onmogelijk voor de organisatie om bij iedere boot een inspectie uit te voeren. Om de veiligheid te garanderen moest ieder team een ouder of docent als jurylid aanwijzen die de boot technisch zou keuren. Ook werd een aantal teams steekproefsgewijs gecontroleerd. Zie bijlage C voor het formulier van de technische keuring. De zwemtest ging natuurlijk wél door en Mathijn Brink moest het Amstelmeer in.

⁷ (Young Solar Challenge, NK Groenleven Zonnebootrace, Solar Sport One en Solar & Energy Boat Challenge, 2019)

1.3 SPONSORWERVING EN MEDIA-AANDACHT

Hoe werd dit project gefinancierd en gepromoot?

1.3.1 Projectfinanciering

Het bouwen van een boot is natuurlijk niet gratis, vooral de materiaalkosten zijn tamelijk hoog. Alleen al aan glasvezel is naar schatting zo'n 400-500 euro uitgegeven, om van epoxy nog maar te zwijgen. De eerste grote kostenpost was de aanschaf van het bouwpakket en de inschrijving voor de raceweekenden. Scholen aan Zee heeft hier helaas onnodig kosten gemaakt door zich in 2019 in te schrijven en vervolgens niet deel te nemen aan de races en juniorclasses. De kosten in 2020 waren hierdoor wel lager, aangezien het snijpakket al was aangeschaft.

Om dit project mogelijk te maken had het Solar Team sponsors nodig. Deze sponsors kunnen worden verdeeld in twee groepen: financiële sponsors en sponsors die producten en diensten sponsoren. Binnen het team zorgden een aantal leden voor de sponsorwerving en Public Relations (PR). Eerst dacht het team dat sponsoren vooral zouden worden aangetrokken met sponsorpakketten, flyers, aandacht via sociale media en een keurige begroting.

Al snel bleek dat potentiële sponsors in praktijk zelden geïnteresseerd zijn in sponsorpakketten of flyers. Om een sponsor 'binnen te halen' is het vooral belangrijk om een goed verhaal te hebben en enthousiasme uit te stralen. Sponsorpakketten werken hierbij juist als een belemmering doordat sponsors in hokjes worden gestopt. Het is voor kleine sponsoren niet leuk om te horen dat ze slechts een 'bronzen sponsor' zijn. Ook is het erg lastig om aan sponsordeals van materialen of spullen zoals een bootbok een bedrag te hangen.

Sponsoring:	Door wie:
Werkplaats, startkapitaal, etc.	Scholen aan Zee (Lyceum aan Zee)
Zak met fietsbinnenbanden	Verdoes Fietsen
Computerbeeldscherm, toetsenbord en muis	Helderse Uitdaging <i>Cyril Kraak</i>
Vriezer met 4 lades	De Wandelcoach en Helderse Uitdaging <i>Jasper Tolhuijs en Cyril Kraak</i>
Onderwatercamera Canon Pixma W300 16,05 megapixel en tot 30 m waterdicht t.w.v. circa € 400,00.	Directie Materiële Instandhouding (DMI) en Helderse Uitdaging <i>Cyril Kraak</i>
Boottrailer met strandtrailer	Prommenz & Helderse Uitdaging <i>Robert Bak en Cyril Kraak</i>
Bootbok, op maat gemaakt met wieltjes extra hoog i.v.m. motorophanging.	www.bootbokken.nl <i>Joep v.d. Wielen</i>
Stalen frame van 4,10 x 1,00-1,10 m met wieltjes o.a. voor eerste bouwphase boot 2021.	Oosterhuis Techniek <i>Pieter Staats</i>
Een groot bedrag! Ter bevordering van techniekonderwijs op het Lyceum aan Zee.	Gemeente Den Helder <i>Wethouder Peter de Vrij</i>
€ 50,00	Bais Tegelwerken
€ 250,00 aan zelf uit te kiezen gereedschap en standaard een hoge korting op al het gereedschap voor het huidige team en alle toekomstige teams.	Govers BV <i>Michel Kruik en Bart Brinkman</i>
Spuiten, schuren en plamuren boot	Spuiterij Westelaken (Westelaken Autoschade) <i>Albert v.d. Westelaken</i>
Stickers op boot (incl. opmeten en beplakken)	Slot Reclame <i>Bob Slot</i>
€ 3200,00 voor aanschaf Torqeedo motor	Solar Turn

1.3.2 Mediastrategie

Binnen het Solar Team was een deel van het team verantwoordelijk voor de promotie en media-aandacht. Hiervoor zijn er interviews gegeven aan de Helderse Courant, Den Helder op Zondag en Regio Noordkop.⁸ Ook was een deel van het team geregeld te gast bij de LOS Radio Den Helder.⁹ Verder werden er posters verspreidt voor de race en werden er vooral veel gasten ontvangen bij de boot. Inmiddels weten veel mensen dankzij mond-tot-mondreclame in Den Helder van het bestaan van het Solar Team. Het team heeft van Michael van Alderwegen een sponsorwervingstraining gekregen, hierbij stond vooral storytelling centraal. De sociale media was een PR succes, het Instagram account heeft inmiddels zo'n 250 volgers.



⁸ Zie bijlage E Media

⁹ (Lenselink & Brink, Solarteam Lyceum aan Zee bouwt verder aan zonneboot, 2020) en (Lenselink, Porto, Pijnacker, & Brink, 2019)

1.4 RACE

Hoe verliepen de race en de voorbereidingen hiervoor?

1.4.1 Laatste voorbereidingen

Op zaterdag 3 oktober was de dag van de race eindelijk aangebroken. Het team had de vorige avond nog tot 23:00 uur doorgewerkt om de boot af te krijgen en stond om 8:00 uur 's morgens al klaar om de laatste kabels te verbinden en een controle te doen. De avond van tevoren bleek er exact één kabelschoentje te missen; Jonas is daarom vroeg opgestaan en heeft met zijn vader alsnog een kabelschoentje gevonden. Om 11:30 uur werd de boot uit de werkplaats gehaald en door meneer Roggeveen naar Willemsoord gereden. Op de boothelling van de oude Rijkswerf werd met een zeil een mobiele werkplaats ingericht. Tientallen mensen keken vol spanning toe terwijl de zonnepanelen in de boot werden gelegd en het elektrisch systeem werd verbonden.



Rond 13:30 uur was het zover, het zeil werd weg gehaald en de hoofdschakelaar omgedraaid. Gespannen keek iedereen toe en de teleurstelling toen er niets gebeurde was dan ook groot. Na een complete controle van het systeem bleek de fout heel simpel: één accukabel was nog niet aangesloten. Poging twee was gelukkig wel succesvol, het systeem deed het. Meneer Berendsen werd direct naar voren gehaald om de technische inspectie uit te voeren en zoals verwacht, kon hij tien minuten later zijn handtekening zetten onder de checklist van Young Solar.



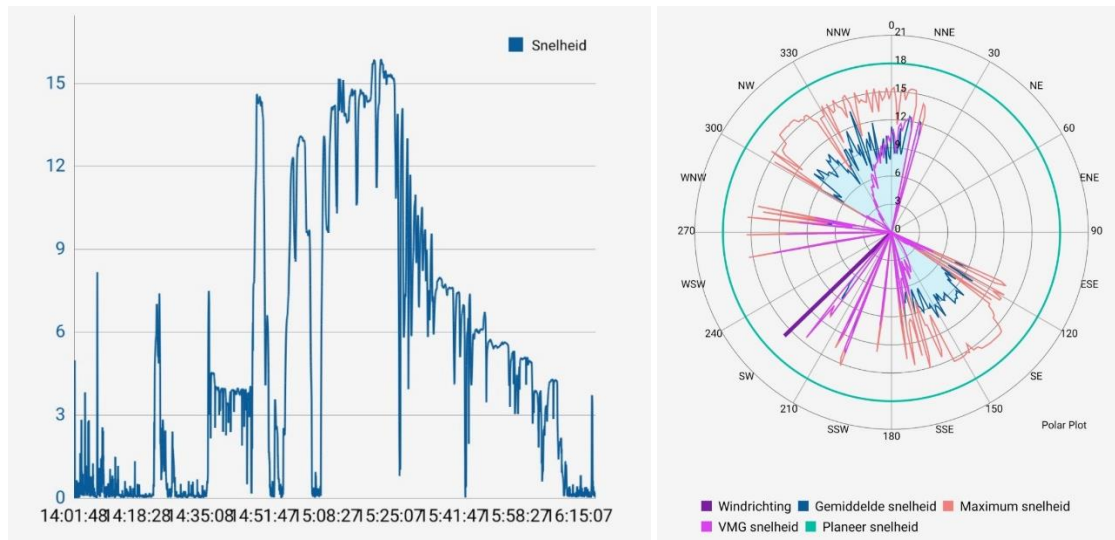
1.4.2 Race

Direct na de technische keuring kwam iedereen in actie en reed meneer Roggeveen de trailer stapvoets het water in. Na een paar acrobatische stunts en veel getrek aan de sleeplijn dreef de boot keurig naar een aanlegsteiger. De laatste spullen werden aan boord gebracht, de twee GPS-trackers gestart en de havendienst zoals afgesproken ingelicht via de VHF. Mathijn kreeg nog een peptalk van zijn vader en klom hierna aan boord. Voorzichtig werd de gashendel een klein stukje naar voren gedrukt, direct volgde een zachte zoem en werd de boot een beetje naar voren gedrukt. Eerst heel rustig en al snel steeds harder voer de boot door de Binnenhaven richting de Van Kinsbergenbrug. Langs de Flaneerkade stonden mensen te kijken en aan te moedigen. Terwijl de filmmuziek van *Pirates of the Caribbean* vanaf de kade schalde, genoot het team met volle teugen.



1.4.3 Resultaten

Op driekwart van de race verscheen er op het motordisplay ‘error 43’, de accu spanning was te laag. Eerder stond er op dit scherm dat de accu’s nog voor circa 45% vol zaten, kennelijk was deze inschatting incorrect. Zoals te zien is in de onderstaande grafiek zakte de snelheid vervolgens geleidelijk terug. Op het dieptepunt werd de boot ingehaald door een eend. Dat was het punt waarop besloten werd de boot uit het water te halen en de gegevens naar Young Solar te versturen. De meting begon om 14:01 uur en eindigde om 16:15; alleen het snelste uur telde mee voor het klassement.



De boot werd weer naar school teruggereden en iedereen ging naar huis om droge kleren aan te trekken. In de avond kwam het team met meneer Berendsen en meneer Roggeveen samen in een restaurant om de race uitslag af te wachten. Via een zoommeeting met de organisatie en alle andere teams werd de winnaar bekend gemaakt. Tot grote verbazing bleek het Solar Team Lyceum aan Zee de vijfde plaats hebben behaald. Het team kwam hier pas een kwartier later achter omdat kwaliteit van de WiFi verbinding niet optimaal was. De directeur belde apentrots op en ook de begeleiders en ouders waren erg blij.

TEAM:	KM:
Drachtster Lyceum	12,395
Leeuwarder Lyceum LelyV	11,232
Helen Parkhurst Dalton Blues	10,717
Spinoza Lyceum	9,839
Lyceum aan Zee	9,402
CSG Bogerman	9,257
Stellingwerf College	7,450
SG de Triade Party Animals	5,955

Als er tijd was geweest om van tevoren een testvaart te maken zou een podiumplek misschien wel haalbaar zijn geweest. De winnaar was het Drachtster Lyceum, een team dat net als het Lyceum aan Zee voor het eerste jaar meedeed. Oorspronkelijk zouden er ruim dertig boten meedoen aan de Young Solar Challenge; aan deze corona-editie zouden veertien teams deelnemen. Uiteindelijk hebben tien teams daadwerkelijk gevaren, waarvan er twee zijn gediskwalificeerd vanwege het onjuist verzenden van gegevens.

1.5 CONCLUSIE

Hoe bouw je een zonneboot?

Een zonneboot bouw je vooral door met een team veel te experimenteren. Niemand in het team had ooit een boot gebouwd, sponsors gezocht of een elektrisch systeem in elkaar gezet. Er werd hout bewerkt, epoxy gebruikt, met glasvezel gewerkt en een elektrisch systeem gemaakt. Voor het project werden veel sponsors gezocht en promotie gemaakt. De schoolsluiting tijdens de coronacrisis leverde uitdagingen op voor het bouwproces. Uiteindelijk eindigde het Solar Team Lyceum aan Zee op de vijfde plek tijdens de Young Solar Challenge 2020. Het was een geweldig project!



2. WATERSTOF ALS ENERGIEDRAGER

Hoe kan waterstof worden gebruikt als energiedrager?

2.1 WATERSTOF

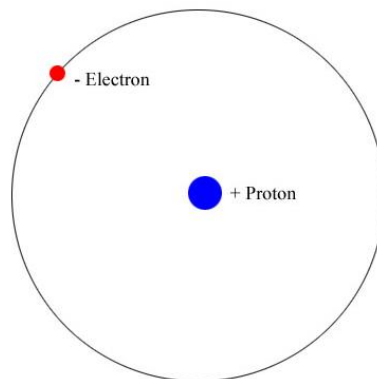
Wat is waterstof?

Waterstof is het lichtste atoom in het periodiek systeem van Mendeljev. Het element bestaat uit een kern van één proton met daar omheen draaiend één elektron. Het is het meest voorkomende atoom in het universum. De wetenschappelijke naam van waterstof is hydrogenium. Hydrogenium heeft de volgende eigenschappen: ¹⁰

Symbool	H
Massa	1,0079 x 1,66 x 10 ⁻²⁷ kilogram of 1,0079 u
Kleur	Kleurloos
Geur	Geurloos
Atoomstraal	3,7 x 10 ⁻¹¹ meter
Smeltpunt	14,01 graden Kelvin
Kookpunt	20,28 graden Kelvin
Energiedichtheid	120 Mega Joule per kilogram
Dichtheid	0,08988 kilogram per kubieke meter

Hydrogenium komt in de natuur voor in paren (H₂), in ionen (H⁺) of in andere moleculen (bijvoorbeeld NH₃). Door de hoge energiedichtheid is het zeer effectief te gebruiken voor processen waarbij energie benodigd is en geschikt voor het opslaan van energie. Er is veel hydrogenium in het heelal, ongeveer 75% van het heelal bestaat uit waterstof.¹¹ Bij het gebruik van hydrogenium zijn er diverse uitdagingen. Ten eerste gaat waterstof snel een reactie aan met andere elementen zoals zuurstof, deze reactie kan heftig verlopen. Ten tweede is de dichtheid van waterstof onder normale druk op zeeniveau (ongeveer 1 bar) ontzettend laag. Voor het effectief opslaan van waterstof is een hoge druk benodigd.

Tot slot komt waterstof niet in pure vorm voor op aarde. Het moet worden gewonnen uit moleculen die hydrogenium bevatten. Het meest op aarde voorkomende molecuul wat hydrogenium bevat is water. De twee meest gebruikte manieren om energie uit waterstof te winnen zijn: energie winnen door van verbranding en energie winnen met behulp van een brandstofcel. De tweede optie heeft het hoogste rendement. De chemische energie die waterstof bevat wordt hierbij omgezet tot elektrische energie.



¹⁰ (NVON-commissie, 2013)

¹¹ (WaterstofNet Nederland, sd)

2.2 PRODUCTIE WATERSTOF

Hoe wordt waterstof geproduceerd?

Het produceren van waterstof kan op diverse manieren. De methoden hebben de volgende namen gekregen¹² om het soort waterstof te onderscheiden:

1. Grijs waterstof
2. Blauwe waterstof
3. Groene waterstof

De manier van het winnen van waterstof berust bij alle drie de soorten op dezelfde techniek. Moleculen die hydrogenium bevatten worden gesplitst in aparte moleculen, waaronder H_2 .

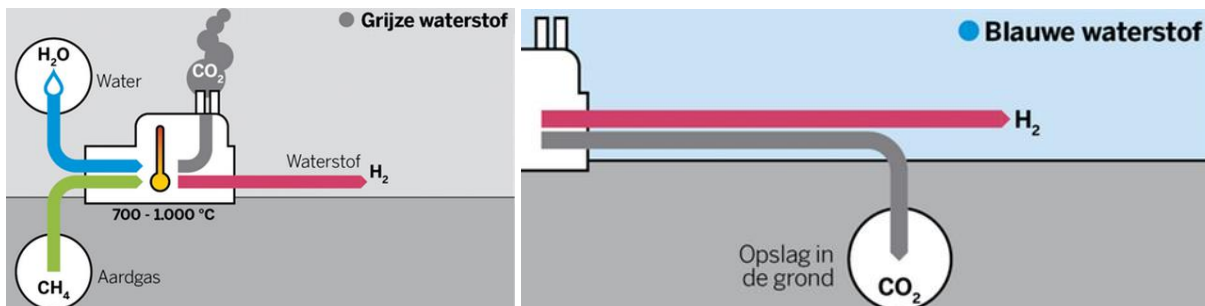
2.2.1 Grijs

Momenteel is grijze waterstof de meest gebruikte soort waterstof. Grijze waterstof wordt gewonnen uit fossiele brandstoffen. Hiervoor wordt voornamelijk methaangas (CH_4) gebruikt. Methaangas wordt gemixt met water (H_2O) onder een hoge druk van 3 tot 25 bar en onder hoge temperatuur van ongeveer 1000 tot 1300 graden Kelvin. Hierbij ontstaat waterstofgas (H_2) en ook koolstofdioxide (CO_2). Het probleem is echter dat fossiele brandstoffen eindig zijn, dus de productie van grijze waterstof is op een gegeven moment niet meer mogelijk. Ook is het een probleem dat er koolstofdioxide ontstaat bij het opwekken van grijze waterstof. Koolstofdioxide is een broeikasgas, dus zorgt het voor de opwarming van de aarde.

Deze manier van energie winnen is efficiënter dan het winnen van energie aan de hand van verbranding van fossiele brandstoffen. Het rendement van het verbranden van fossiele brandstoffen is 44%, terwijl het omzetten tot waterstof een rendement levert tot 49,6%. Het omzetten van fossiele brandstoffen heeft een rendement van 60% en het omzetten van waterstof naar elektrische energie heeft een rendement van 82,7%, wat een totaal rendement geeft van 49,6%. Dat is een winst van 5,6% aan rendement.¹³

2.2.2 Blauw

Koolstofdioxide is een broeikasgas, wat degressief is voor het klimaat. Door koolstofdioxide warmt de aarde op, omdat het warmte goed vast kan houden in de atmosfeer, wat vele negatieve effecten met zich meedraagt. Om de negatieve effecten van de emissie van koolstofdioxide te voorkomen, wordt bij de productie van blauwe waterstof uit fossiele brandstoffen de koolstofdioxide opgevangen. Hierdoor is er geen uitstoot van koolstofdioxide meer in het milieu. De koolstofdioxide wordt bijvoorbeeld opgeslagen in leeggepompte gasvelden onder de grond. De betrouwbaarheid van de opslag is onbekend. Aardgas heeft zich eeuwen bevonden onder de grond, maar nu de gasvelden geopend zijn zou er mogelijk iets aan de structuur kunnen zijn veranderd. Toch is dit veel beter voor het klimaat dan grijze waterstof, omdat de koolstofdioxide niet direct wordt uitgestoten.¹⁴



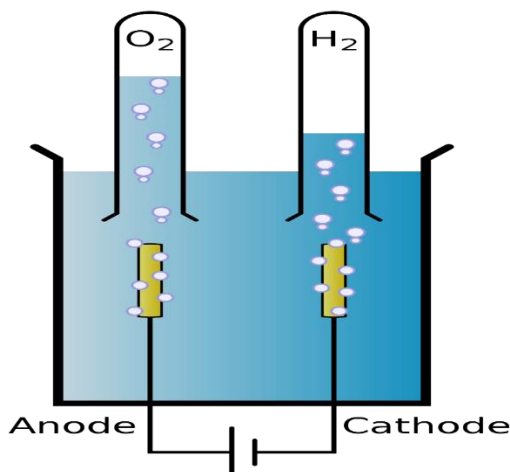
¹² (van der Ent, 2019)

¹³ (Lutsey, 2015)

¹⁴ (Berk, 2019)

2.2.3 Groen

Fossiele brandstoffen zijn eindig en daarom is het geen toekomstige vaste mogelijkheid om waterstof te produceren. Er zijn meerdere moleculen die hydrogenium bevatten om waterstof uit te maken. Zoals eerder gezegd is water het meest voorkomende molecuul op aarde wat hydrogenium bevat. De watermoleculen worden aan de hand van elektrolyse gespleten. Met elektrolyse is er in water een positieve anode en een negatieve kathode aanwezig. Door de elektrische stroom ontstaat er een impuls, wat het water splitst in waterstofgas en zuurstofgas. Hieronder is een schematische afbeelding van elektrolyse en de reactie ervan weergegeven.¹⁵



Deze reactie verloopt aan de hand van twee halve reacties.



Zoals te zien ontstaat er ook zuurstof. Zuurstof is juist progressief voor het klimaat. Het zuurstofgas komt aan de kant van de positieve anode, omdat zuurstof een negatieve lading heeft. Waterstofgas komt aan de kant van de negatieve kathode, omdat waterstofgas een positieve lading heeft. Het volume van de kant waar waterstofgas wordt opgeslagen is twee keer groter dan het volume van de kant van de zuurstofgas. Dit komt doordat de molaire verhouding van hydrogenium: oxigenium twee staat tot een is. Bij het energie winnen uit waterstofgas bij zowel verbranding als bij een brandstofcel gaat waterstofgas een reactie aan met zuurstofgas, waarbij water ontstaat. Hierdoor is water een oneindige bron voor de productie waterstofgas.

2.2.4 Alternatieven

In sommige chemische reacties ontstaat waterstofgas als bijproduct, bijvoorbeeld bij biobrandstof of bij de productie van chloorgas. Dit waterstofgas zou opgeslagen en gebruikt kunnen worden. Het voordeel hiervan is dat er bij de reactie waarbij waterstofgas ontstaat, een hoger rendement is door minder ongewenste of onbruikbare stoffen. Het probleem is dat er niet zoveel waterstofgas geproduceerd kan worden als gewenst is. De hoeveelheid waterstofgas wat geproduceerd wordt is afhankelijk van de hoeveelheid watermoleculen die worden omgezet in waterstof.

¹⁵ (Landa & Schouten, 2020)

2.3 OPSLAG EN VERVOER

Hoe wordt waterstof opgeslagen en vervoerd?

Het produceren van waterstof is op vele manieren mogelijk, maar wanneer waterstof geproduceerd is, wordt het meestal niet direct gebruikt. Waterstofgas moet dus worden opgeslagen. Ook wordt waterstofgas niet altijd op de locatie gebruikt waar het geproduceerd is. Het moet dus ook getransporteerd kunnen worden.

2.3.1 Mogelijkheden opslaan

Waterstofgas is de lichtste stof die bestaat en ook is het erg reactief. Het moet goed beveiligd opgeslagen worden zonder andere stoffen en ook nog onder hoge druk. Het waterstofgas wordt opgeslagen in speciaal hiervoor ontworpen opslagtanks. De hoeveelheid waterstofgas wat hierin kan worden opgeslagen is afhankelijk van 2 factoren: de inhoud van de opslagtank en de druk in de opslagtank. Beide factoren kunnen aangepast worden. De druk kan variëren van een lage druk (15 tot 30 bar) tot aan 700 bar. Daarnaast kan waterstof vloeibaar worden opgeslagen door het te koelen tot minder dan 20 graden Kelvin. Omdat dit proces veel energie kost, wordt het zelden toegepast en is waterstof vloeibaar opslaan alleen aantrekkelijk in de luchtvaart.

2.3.2 Mogelijkheden transporteren

Waterstofgas moet van de plaats waar het geproduceerd wordt, getransporteerd worden naar de locatie waar het nodig is. Hiervoor zijn diverse mogelijkheden:

- Opslagtanks met waterstofgas worden vervoerd.
- Waterstofgas kan vervoerd worden via gasleidingen.
- Waterstofgas kan lokaal worden geproduceerd.

Opslagtanks die gevuld zijn met waterstof kunnen vervoerd worden door diverse voertuigen. Het kan vervoerd worden via het vliegtuig, de boot of een vrachtwagen. Een boot kan groter hoeveelheden vervoeren, maar gaat relatief langzaam. Een vliegtuig kan snel vervoeren, maar kleinere hoeveelheden dan een boot. Beide kunnen niet over het land vervoeren. Vrachtwagens vervoeren opslagtanks tussen locaties met een relatief kleine afstand. Deze manier van het vervoeren van waterstofgas is echter ontzettend inefficiënt, doordat het vervoeren veel energie kost.

Een efficiëntere manier van het vervoeren van waterstofgas is via de gasleidingen. De gasleidingen zijn al bijna overal aanwezig, omdat momenteel veel huishoudens en andere gebouwen een vraag hebben naar gas voor energie. Het gas is eindig en op een dag zullen de leidingen niet meer gebruikt worden. Waterstofgas zou die plaats kunnen innemen. Het kost alleen energie om waterstof in de leidingen te pompen, net zoals nu nodig is met gas. Het vervoeren via leidingen is vele malen efficiënter dan vervoeren door een vervoersmiddel.

Waterstofgas zou ook lokaal kunnen worden geproduceerd in plaats van te vervoeren. Het systeem achter het produceren van waterstof aan de hand van elektrolyse is vrij simpel en betrouwbaar. Het proces kan op elke locatie plaatsvinden waar elektrische energie is. De waterstof moet dan wel lokaal opgeslagen worden, zodat het op een ander moment gebruikt kan worden. Het nadeel is dat er een grotere vraag naar waterstof zou kunnen zijn dan er op dat moment beschikbaar is, dus zou er een extra opslag of toevoer moeten zijn.

2.3.3 Veiligheid

Waterstofgas is zeer reactief en het opslaan ervan gebeurt onder hoge druk. Om ervoor te zorgen dat het opslaan en het vervoer veilig gebeurt zijn er veel veiligheidseisen. Als alle veiligheidseisen worden opgevolgd is het werken met waterstofgas volledig veilig. Het vervoer en het opslaan kan veilig plaats vinden. Bij de veiligheidseisen wordt gekeken naar de volgende aspecten:

- Ontwerp en constructie
- Onderhoud en keuring
- Informatie en labels
- Veiligheidsmaatregelen

Wanneer er wordt gekeken naar het ontwerp en de constructie, dan kijkt men naar de vorm en de materialen van de opslag en vervoer. Waterstoftanks hebben allemaal de vorm van een cilinder, omdat dat een stevige constructievorm is. Ook is de vorm van een cilinder gemakkelijk te passen in bijvoorbeeld auto's, boten en huizen. Er zijn diverse soorten materialen die te gebruiken zijn voor waterstoftanks. Er worden vier soorten tanks onderscheiden:

Type 1 is met staal of aluminium, een stalen waterstoftank kan een druk aan van 200 bar en een aluminium waterstoftank kan een druk aan van 175 bar. Type 2 is een waterstoftank van aluminium met wikkelingen van glasvezel, aramide of koolstofvezel. Dit type kan een druk aan tot 299 bar. Type 3 lijkt op type 2, maar is gemaakt van een composiet, wat bestaat uit glasvezel, aramide of koolstofvezel met metalen. De maximale druk is 438 bar. Als laatste is er type 4, wat een composiet is van koolstofvezel met een thermoplastische polymeer. De maximale druk op een type 4 tank is 700 bar.

Waterstoftanks hebben verschillende lagen, zodat de gunstige eigenschappen van veel stoffen gecombineerd worden. Vaak een metaal/composiet laag met daar omheen een laag van rubber, gevolgd door een laag met hard plastic.

Ook het vervoer moet veilig gebeuren. De tanks worden tegen elkaar vastgezet, zodat er onderling geen wrijving of botsingen kunnen ontstaan. Het vervoersmiddel is stevig gemaakt, zodat de waterstoftanks niet gemakkelijk uit het voertuig kunnen ontsnappen bij een ongeluk. Hierbij wordt rubber gebruikt, omdat het veel grip heeft en het relatief zacht is. De buitenkant van het voertuig bestaat uit metaal. Bij het vervoer via leidingen hoeft waterstof niet onder hoge druk te staan. Daarom kan dit gebeuren met buizen van alleen metaal.¹⁶

Waterstoftanks worden niet altijd goed geproduceerd en met de mate van tijd neemt de kwaliteit af. Daarom is onderhoud en keuring van de waterstoftanks essentieel. Bij het produceren van de tanks wordt er als laatste stap gecontroleerd of de tanks geschikt zijn voor de verkoop. Er wordt gekeken in de tanks of er geen lekken zijn en of het de druk aan kan. Regelmatig is er controle naar de waterstoftanks of ze nog werken zoals ze zouden moeten werken en of ze nog veilig zijn. Dan wordt er op dezelfde manier gekeken als de controle na de productie, maar er wordt ook gekeken naar de corrosie van het materiaal van de waterstoftanks. Wanneer een waterstoftank niet voldoet aan de veiligheidseisen moet de tank worden gerecycled.

Wanneer het transport via de gasleidingen zou gaan, zouden de gasleidingen ook regelmatig gecontroleerd moeten worden. Dit is ook zo het geval bij het huidige gasnet, aangezien het huidige gas ook brandbaar is. De aansluitingen van het waterstofgasnetwerk op de huizen moet veilig zijn en mogelijk kunnen er waterstofgasmelders worden geplaatst.

Ook is het informeren over de waterstof in bijvoorbeeld waterstoftanks is heel belangrijk. De consument moet goed geïnformeerd worden over het veilig gebruiken van de waterstoftank,

¹⁶ (Godula-Jopek, Jehle, & Wellnitz, 2012)

dit wordt geïnformeerd aan de hand van een gebruiksaanwijzing. Ook is het verplicht dat er labels bij zitten die aanduiden welke mogelijke gevaren er zijn. Wanneer een consument goed weet wat de gevaren van waterstof kunnen zijn en hoe dat te voorkomen kan de consument er veilig mee omgaan. Op de volgende afbeelding is een waterstoftank inclusief drukregelaar te zien. Er staat op de drukregelaar de druk in de waterstoftank en de druk van de waterstof wat de tank verlaat. Er zijn twee labels te zien: waterstof is brandbaar en gas onder druk. Ook is er een sticker waarop de specificaties van de waterstoftank staan.



Er worden ook extra veiligheidsmaatregelen getroffen wanneer er met waterstofgas wordt gewerkt. Zo is het handig om een brandblusser in de buurt te hebben voor het geval dat waterstofgas een reactie aangaat en er vuur ontstaat. Om te voorkomen dat waterstof reactief wordt, is antistatische kleding nodig. Ook moeten er geen andere voorwerpen aanwezig zijn die een vonk of een vlam kunnen veroorzaken. Wanneer er waterstofgas zou ontsnappen is het handig om een waterstofgasmelder te hebben, zodat er vroegtijdig ingegrepen kan worden bij een lek. Om het waterstofgas weg te krijgen uit een ruimte is een goede doorstroming van lucht nodig. Waterstoftanks dienen daarom opgeslagen te worden in een goed geventileerde ruimte of in de buitenlucht.

2.4 BRANDSTOFCEL

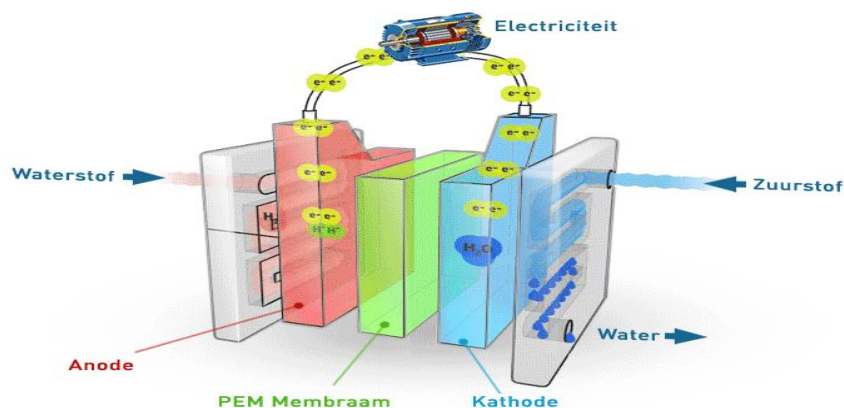
Hoe kan waterstof worden omgezet in elektrische energie?

Energie opslaan in waterstofgas is mogelijk, maar wanneer er energie nodig is moet de energie uit het waterstofgas gehaald kunnen worden. Een brandstofcel zorgt ervoor dat dit proces verloopt en er elektrische energie uit waterstof gehaald wordt.

2.4.1 Werking brandstofcel

Er zijn diverse soorten brandstofcellen. De meest voorkomende brandstofcel is 'de proton exchange membrane brandstofcel' (PEM-brandstofcel), deze wordt gebruikt in dit onderzoek. Daarom wordt tot aan 2.5 verteld over de PEM-brandstofcel. In 2.5 wordt verteld over andere brandstofcellen. In een brandstofcel gaat waterstofgas een reactie aan met zuurstofgas en komt er energie vrij. Het waterstofgas komt van een tank en het zuurstofgas komt uit de omgeving.

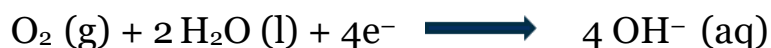
In een brandstofcel zit een semipermeabel membraan, wat alleen protonen door laat (een hydrogeniumkern, H^+). De elektron laat los van de proton en het proton gaat door het membraan naar het zuurstofgas. Van de kant van waterstofgas tot de kant van het zuurstofgas loopt een metalen draad. De elektronen kunnen zich door het metalen draad voortbewegen van de kant van waterstof, waar de anode is, naar de kant van de zuurstof, waar de kathode is. Doordat de elektronen door het metalen draad gaan lopen, gaat er een elektrische stroom lopen. Als reactieproduct naast elektrische energie hiervan ontstaat water. Hieronder is in een afbeelding de brandstofcel versimpeld weergegeven.



De reactie die in een brandstofcel plaatsvindt is het tegenovergestelde van de reactie bij elektrolyse en gaat als volgt:



Deze reactie verloopt aan de hand van twee halve reacties.



Om het waterstofgas te splitsen in twee losse hydrogenium atomen wordt platina gebruikt als katalysator. Zuurstofgas is lastiger te splitsen dan waterstofgas, bij zuurstofgas wordt ook platina als katalysator gebruikt. Er is momenteel geen betere katalysator dan platina. Platina gaat geen reactie aan met hydrogeniumatomen of oxigeniumatomen, wat belangrijk is, omdat de katalysator niet verbruikt of aangepast moet worden. Platina is een duur metaal, omdat het een edelmetaal is. Een optimaal efficiënt gebruik van platina is daarom belangrijk. Dat wordt gerealiseerd aan de hand van het optimaliseren van de vorm en de grootte van het platina, waarbij de oppervlakte zo groot mogelijk wordt gemaakt.

2.4.2 Toepassingen brandstofcel

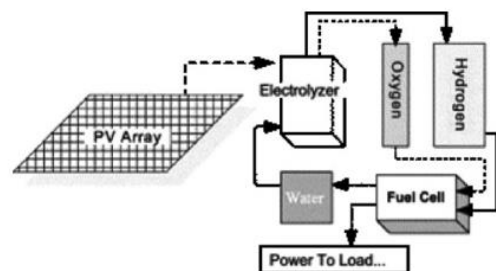
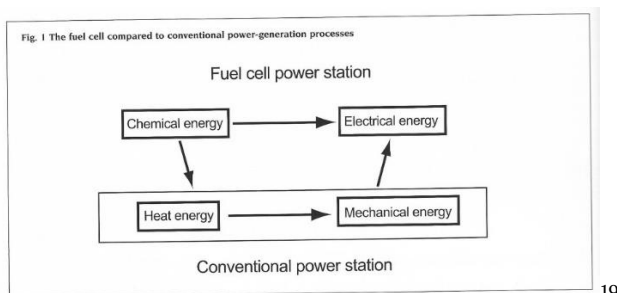
De brandstofcel kent vele toepassingen. Een brandstofcel is relatief compact en het zet energie uit het waterstofgas om in elektrische energie. Een brandstofcel kan gebruikt worden als een verwarming en als een energieleverancier voor voertuigen. De huidige centrale verwarmingen werken op aardgas. Dat is eindig en milieuvriendelijk. Een centrale verwarming kan ook werken op waterstofgas. Het gas kan zowel verbrand worden als in een brandstofcel omgezet worden tot elektrische energie. Het meest effectief is het omzetten tot elektrische energie aan de hand van een brandstofcel. De elektriciteit kan gebruikt worden om omgezet te worden tot warmte. Ook kan de elektrische energie uit de brandstofcel gebruikt worden voor de huidige processen in een huishouden waarvoor elektrische energie benodigd is. De aardgasleidingen die naar de CV ketels leiden kunnen veranderen in leidingen voor waterstofgas, wanneer de CV ketels op waterstofgas werken.

Voertuigen moeten voortgedreven worden door een kracht. Deze kracht kan worden geleverd door brandstofcellen. De brandstofcellen leveren de energie, wat in een elektrische motor wordt omgezet tot beweging. De voertuigen die geschikt zijn voor brandstofcellen zijn: auto's, vrachtwagens, boten, kleine schepen, motoren en elektrische fietsen. Voertuigen die een hoge energiehoeveelheid per seconde nodig hebben zoals: vliegtuigen en grote schepen kunnen wel waterstofgas gebruiken, maar dan kan het beter verbrand worden.

Ook kunnen brandstofcellen accu's vervangen. Brandstofcellen kunnen snel gevuld worden met waterstof, terwijl accu's in vergelijking een langere laadtijd hebben. Daarbij is een brandstofcel lichter dan een accu. Dit is handig in situaties waarbij er geen tijd is om een accu op te laden, zoals bij serious request 2019, waarbij tijdens een tocht van Goes naar Groningen constant werd gelopen en radio uitgezonden.

2.4.3 Efficiëntie brandstofcel

Een optimaal rendement is 100%. Dat betekent dat de theoretische maximale hoeveelheid elektrische energie wat kan worden opgeleverd ook in de praktijk wordt opgeleverd. Het is belangrijk dat een brandstofcel een zo hoog mogelijk rendement behaalt. De efficiëntie van de huidige ontwikkelde brandstofcellen is maximaal 82,7%¹⁷ bij kamertemperatuur. De proton exchange membrane brandstofcel heeft een hoger rendement dan andere brandstofcellen. De overige energie gaat uit naar warmteontwikkeling. Wel is het mogelijk de warmteontwikkeling nuttig te gebruiken, wat het rendement kan vergroten. De atoomeconomie¹⁸ in dit proces is 100%. Het water wordt met de elektrolyse omgezet in waterstofgas en zuurstofgas, wat vervolgens in de brandstofcel terug wordt omgezet tot water. In de afbeelding hieronder is het proces te zien in een blokschema.



¹⁷ (Haseli, 2018)

¹⁸ Atoomeconomie geeft aan hoeveel atomen van de beginstoffen ook daadwerkelijk in het product terecht komen, uitgedrukt in massa.

¹⁹ (Macdonald & Berry, 2000)

²⁰ (Wee, 2006)

2.4.4 Veiligheid brandstofcel

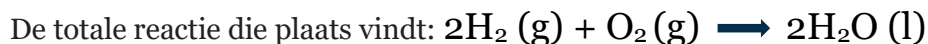
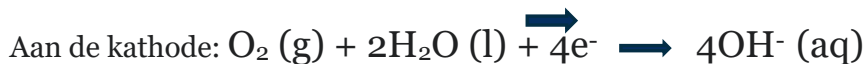
Waterstofgas wordt in een brandstofcel omgezet tot elektrische energie. Dit moet veilig gebeuren, daarom zijn er diverse veiligheidseisen aan een brandstofcel om te zorgen dat een brandstofcel veilig is. Goede brandstofcellen hebben een ingebouwd systeem, welke controleert of alle processen verlopen zoals het hoort. Waterstof hoort niet te kunnen lekken uit de brandstofcel. Wanneer er toch waterstof lekt uit een geavanceerde brandstofcel, wordt dit gedetecteerd door de brandstofcel en wordt het systeem afgesloten. Ook controleert de brandstofcel de hoeveelheid energie die opgewekt kan worden. Wanneer de energie niet opgeslagen kan worden, wordt er geen energie uit waterstof gehaald. De brandstofcel gaat uit in het geval dat het niet wordt gebruikt of als er iets niet goed functioneert. Tenslotte heeft de brandstofcel een koelingssysteem, wat oververhitting voorkomt. Het is dus belangrijk dat een brandstofcel niet lekt, uitgerust is met een waterstofdetector of anders lekdetectiesysteem en gekoeld wordt tijdens gebruik.

2.4.5 Overige soorten brandstofcellen

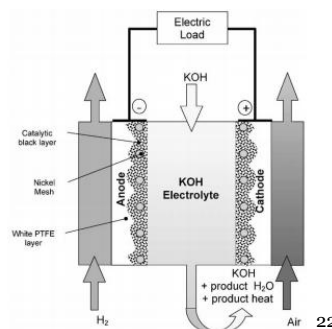
Naast de 'proton exchange membrane' brandstofcel zijn er nog vele andere soorten brandstofcellen. Deze cellen zijn gebaseerd op hetzelfde proces; elektronen laten lopen door een metalen draad. Het elektron door het draad vervoeren, gebeurt via halfreacties. Het verschil tussen de diverse brandstofcellen is het verschil in de halfreacties.

Alkalische brandstofcel

De alkalische brandstofcel werkt ook aan de hand van een reactie met waterstofgas en zuurstofgas. Aan de kant van de anode is waterstofgas en aan de kant van de kathode is zuurstofgas. Door het elektrolyt gaan geen protonen, maar OH^- -ionen. Om deze twee half reacties op gang te brengen moet er elektronenoverdracht plaats vinden. Dat gebeurt via een metalen draad, met als gevolg dat er stroom loopt. De volgende 2 half reacties vinden plaats in de brandstofcel:



Om het zuurstofgas en waterstofgas te splitsen wordt ook in dit proces platina als katalysator gebruikt. De reden dat in deze brandstofcel platina wordt gebruikt is dezelfde reden als beschreven bij de PEM-brandstofcel. Het elektrolyt bestaat uit kalium, omdat dat optimaal was om OH^- -ionen door te laten, maar niet de protonen. In de afbeelding hieronder is schematisch weergegeven hoe een alkalische brandstofcel te werk gaat. Het rendement van de alkalische brandstofcel is 64%.²¹



²¹ (Huizhi Wanga, 2017)

²² (T. Niet, 2002)

Gesmolten carbonaat brandstofcel

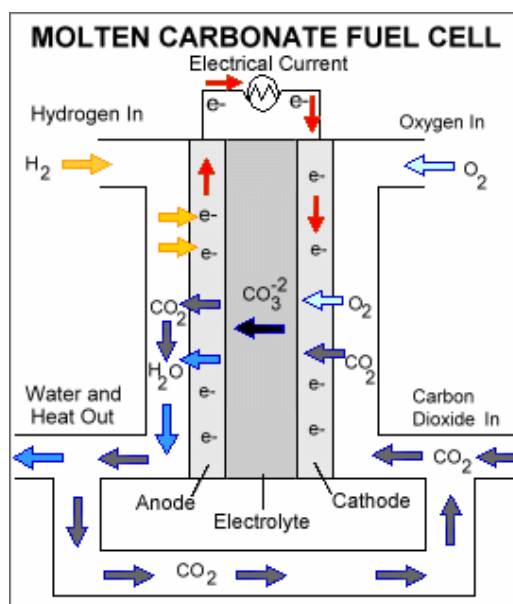
Naast waterstofgas en zuurstofgas wordt er in de gesmolten carbonaat brandstofcel ook koolstofdioxide gebruikt. In deze brandstofcel zit koolstofdioxide in een circulatie. Aan de kant van de kathode bevinden zich zuurstofgas en koolstofdioxide. Aan de kant van de anode bevindt zich waterstofgas. Door de elektrode gaat koolstoftrioxide. Het reactieproduct is water. Het rendement van deze brandstofcel is 60%. De volgende half reacties vinden plaats in de brandstofcel:

Aan de kant van de anode: $\text{H}_2 (\text{g}) + \text{CO}_3^{2-} (\text{aq}) \longrightarrow \text{H}_2\text{O} (\text{l}) + \text{CO}_2 (\text{g}) + 2 \text{e}^-$

Aan de kant van de kathode: $\text{O}_2 (\text{g}) + 2\text{CO}_2 (\text{g}) + 4\text{e}^- \longrightarrow 2\text{CO}_3^{2-} (\text{aq})$

Over de hele brandstofcel gezien: $2\text{H}_2 (\text{g}) + \text{O}_2 (\text{g}) \longrightarrow \text{H}_2\text{O} (\text{l})$

De CO_3^{2-} gaat door het elektrolyt heen. Hieronder is de brandstofcel in een afbeelding schematisch weergegeven.



Vaste oxide brandstofcel

In een vaste oxide brandstofcel is alleen waterstofgas en zuurstofgas aanwezig.²³ Ook hierbij bevindt zich aan de kant van de kathode zuurstofgas en aan de kant van de anode waterstofgas. Door het elektrolyt gaan zuurstof-ionen met een lading van 2-. Het rendement van deze brandstofcel ligt rond de 60%. De volgende reacties vinden plaats in de brandstofcel:

Aan de kant van de kathode: $\text{O}_2 (\text{g}) + 4 \text{e}^- \longrightarrow 2\text{O}^{2-} (\text{aq})$

Aan de kant van de anode: $\text{H}_2 (\text{g}) \longrightarrow 2\text{H}^+ (\text{aq}) + 2 \text{e}^-$

De totale reactie die plaats vindt is: $\text{H}_2 (\text{g}) + \text{O}_2 (\text{g}) \longrightarrow \text{H}_2\text{O} (\text{l})$

²³ (Minh, 200)

2.5 VERGELIJKING MET ACCU'S

Wat zijn de voor- en nadelen van waterstof ten opzichte van accu's?

De elektrochemische cel (accu) wordt momenteel het meest gebruikt om energie in op te slaan en energie te leveren. Er bestaan veel soorten elektrochemische cellen, met allemaal andere eigenschappen. Er wordt veel onderzoek gedaan naar de mogelijkheid om het rendement van een elektrochemische cel verhogen. Het doel is de elektrochemische cel een hogere energiedichtheid te geven, sneller vol te laden en met een laag gewicht.

2.5.1 Elektrochemische cel

Een vereenvoudigde soort elektrochemische cel is een Daniell-cel²⁴ en bestaat uit een anode en een kathode. Deze bevinden zich in een medium met opgeloste ionen. De ionen gaan redox reacties aan en nemen een elektron op of stoten een elektron af. Hierdoor gaat een atoom ioniseren of verandert een ion in een normaal atoom. Als gevolg ontstaat er bij zowel de kathode als anode een half reactie met de oxidator aan de kant van de kathode en de reductor aan de kant van de anode.

In de werkelijkheid zijn de huidige elektrochemische cellen veel geavanceerder. De elektrochemische cel heeft een negatieve en positieve pool. In de elektrochemische cel zitten vele negatief en positief geladen platen om de beurt gerangschikt. Tussen de verschillende lagen zit een poreuze laag. In een elektrochemische cel vinden 2 half reacties plaats. De elektronen moeten van de reductor naar de oxidator, om de half reacties te kunnen laten verlopen. Door de elektronenoverdracht ontstaat er elektrische energie. Er zijn 2 soorten elektrochemische cellen: de oplaadbare en de niet-oplaadbare elektrochemische cellen.

De niet oplaadbare elektrochemische cellen worden batterijen genoemd. Vaak bevatten batterijen een lage hoeveelheid energie en zijn ze compact. Ze worden meestal gebruikt voor apparaten die klein zijn en een kleine hoeveelheid energie vragen. In dit onderzoek zijn batterijen niet relevant.

Elektrochemische cellen die oplaadbaar zijn, worden accu's genoemd. De grootten en eigenschappen van accu's kunnen enorm verschillen. Er zijn diverse soorten accu's: de nikkelmetaalhydrideaccu, de nikkelcadmiumaccu, de natriumzwavelaccu, de loodaccu en de lithium-ion-accu. De diverse eigenschappen en grootten van de accu's zorgen ervoor dat zij voor vrijwel alle apparaten die energie vragen bruikbaar zijn. In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van een lood-accu. De reden hiervan is dat lood-accu's gunstige eigenschappen hebben om een boot van energie te voorzien. Ze kunnen een hoge stroomsterkte leveren. Ook hebben zij een hoog vermogen per kilo. Daarbij is een lood-accu relatief betaalbaar. Het nadeel aan een lood-accu is dat hij relatief zwaar is.²⁵

2.5.2 Voordelen waterstof ten opzichte van een accu

Een brandstofcel en een accu zijn zeer verschillend in eigenschappen, ondanks dat ze voor dezelfde doeleinden gebruikt kunnen worden. Een brandstofcel heeft veel voordelen ten opzichte van een accu.

Waterstof is snel te tanken in een tank. Een accu moet een hele tijd opladen om weer vol geladen te zijn met elektrische energie. Onderweg is het prettiger om binnen een paar minuten de auto te kunnen tanken dan een paar uur moeten wachten tot het opladen van een accu voltooid is. Daarbij worden problemen verholpen zoals rijden met elektrische auto's die aan het wachten zijn om opgeladen te kunnen worden. Ook zouden huidige tankstations veranderd kunnen worden in waterstoftankstations.²⁶

²⁴ (Landa & Schouten, 2020)

²⁵ (Grundmann, 2013)

²⁶ (Janson, 2019)

In de loop van de tijd heeft een accu een zelfontlading, wat energieverlies betekent. Maandelijks gaat er bij een lood-accu 5% tot 20% energie verloren. Bij waterstofgas zal in de loop van de tijd geen energieafname plaatsvinden. Er zal namelijk geen waterstof en dus energie ontsnappen uit een waterstoftank, omdat waterstoftanks goed beveiligd zijn.

De kwaliteit van een brandstofcel neemt af met de mate van tijd, maar vele malen minder dan bij een accu. Gemiddeld verliest een accu 20% van zijn capaciteit na 600/800 keren herladen. De brandstofcel in dit onderzoek heeft een garantie van 4000 werkzame uren. Dit betekent dat de brandstofcel langer dan 4000 uren kan functioneren zonder een merkbare afname in kwaliteit. De brandstofcel gaat dus langer mee dan een accu.²⁷

Accu's zijn lastiger te recyclen dan brandstofcellen. Een accu bestaat uit veel verschillende stoffen, die zich allemaal vlak bij elkaar bevinden. De stoffen scheiden kost veel moeite en vaak zijn deze stoffen zware metalen, die lastig te recyclen zijn. De brandstofcel bevat weinig zware metalen en de stoffen zijn gemakkelijker te scheiden en recyclen.²⁸

Een accu is relatief duur ter vergelijking met een brandstofcel. Als alle aspecten worden meegerekend in de kosten van beide, is een brandstofcel financieel aantrekkelijker. Hieronder zijn de drie klassen vergeleken met elkaar in totale kosten.

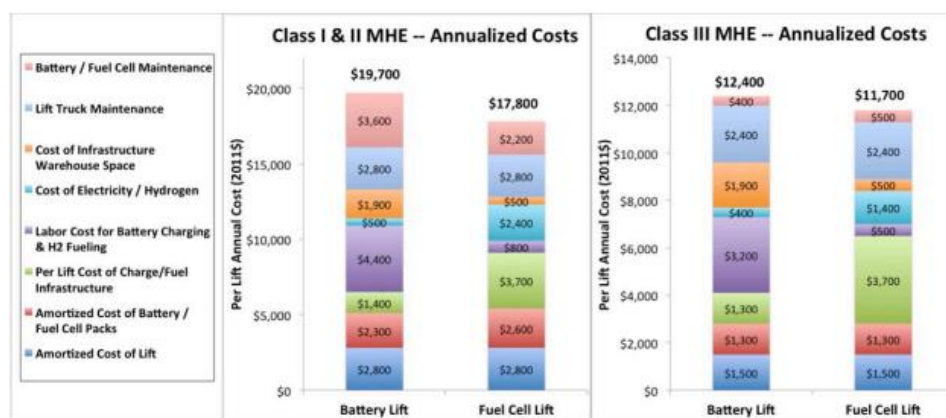


Figure ES-1. Total annual cost of ownership of battery and fuel cell MHE

29

Wanneer er een brand plaatsvindt bij een waterstoftank is het veiliger dan een brand bij een accu. Doordat waterstofgas lichter is dan lucht, stijgt het met een hoge snelheid op als het ontsnapt. Hieronder is in de afbeelding te zien wat er gebeurt als er brand ontstaat in een voertuig met waterstof, de waterstof heeft een hoge ontsnappingssnelheid. Bij een accu centraliseert het vuur zich, omdat de accu zich niet kan verplaatsen. Hierdoor is de brand groter bij het voertuig. Daarbij is ook nog het feit dat accu's lastig te blussen en onvoorspelbaar zijn. Brand van waterstofgas is gemakkelijk te blussen.³⁰



²⁷ (Hermann, 2012)

²⁸ (S. Panero, 1999)

²⁹ (Ramsden, 2013)

³⁰ (Parker & Obeng, 2020)

2.5.3 Nadelen ten opzichte van een accu

Waterstofgas heeft niet alleen voordelen ten opzichte van een accu, maar ook nadelen. De accu heeft soms gunstigere eigenschappen en betere mogelijkheden dan waterstof.

Er zijn nauwelijks locaties waar waterstof te tanken of te kopen is. Er zijn momenteel 4 tankstations voor waterstofgas en de planning is dat er nog 16 bij komen in Nederland de aankomende paar jaar.³¹ Elektrische energie is daarentegen tegenwoordig bijna overal te verkrijgen. Op deze manier is het aantrekkelijker een product met een accu te hebben dan een product met waterstofgas.

Het opslaan van waterstofgas is lastig en veel werk. Het waterstofgas moet in een tank onder een druk tussen de 300 en 700 bar. Daarvoor moet de tank enorm stabiel en stevig zijn wil het zo een druk aankunnen. Ook moet het waterstofgas eerst onder een hoge druk gebracht worden aan de hand van een compressor, wat energie kost. Daarentegen is het waterstofgas uit de tank krijgen aan de hand van een drukregelaar vrij gemakkelijk en kost geen energie.

Het produceren van waterstofgas is een vrij inefficiënt proces. Er is energie nodig, wat water via elektrolyse splitst. Hierbij gaat energie verloren. Het rendement van elektrolyse ligt tussen de 60% en de 80%.³² Het rendement van een brandstofcel is 82,7%. Dat maakt een rendement van het totaal laten liggen tussen de 49,6% en de 66,2%. Het opladen van een loodaccu heeft een rendement van 85%. Ook het ontladen heeft een rendement van 85%.³³ Dit maakt een totale rendement van 72,3%, wat hoger ligt dan het rendement van waterstof.

2.6 CONCLUSIE

Hoe kan waterstof worden gebruikt worden als energiedrager?

Waterstof kan op verschillende manieren geproduceerd worden, de duurzaamste manier is elektrolyse met duurzaam opgewekte elektriciteit. Hierbij wordt water gesplitst in waterstof en zuurstof, waarna de waterstof onder hoge druk (tot 700 bar) in een tank wordt opgeslagen. Vervolgens kan de waterstof door een brandstofcel worden omgezet in elektrische energie, die gebruikt kan worden voor een elektromotor. Het voordeel van waterstof is dat het licht is, makkelijk getransporteerd en snel getankt kan worden.

³¹ (Thomas, 2019)

³² (Buisman & Rozendalab, 2006)

³³ (Wen-Hong Kao, 1997)

3. OMBOUWEN TOT WATERSTOFBOOT

Hoe bouw je een zonneboot om tot waterstofboot?

3.1 BEPERKINGEN VAN ZONNEBOOT

Wat zijn de beperkingen de zonneboot?

Over het algemeen is de V5 zonneboot een prettige boot met een goed ontwerp. De scheepsvorm zou waarschijnlijk nog optimaler kunnen, de maximumsnelheid zou hoger mogen zijn en het zou leuk zijn om passagiers mee te kunnen nemen. Echter, dat zijn luxeproblemen die niet kunnen worden opgelost zonder een nieuwe boot te bouwen. Het grootste nadeel van de boot is de actieradius, die wordt beperkt doordat: (1) de motor meer energie verbruikt dan de zonnepanelen opleveren, (2) de accu een beperkte hoeveelheid energie op kan slaan, (3) deze accu's erg zwaar zijn en (4) de laadtijd van de accu's erg lang is.

1. De twee zonnepanelen leveren in theorie maximaal 240 watt per stuk, dus samen 480 watt op. In praktijk zal zelfs in ideale omstandigheden het opgewekte vermogen lager zijn en zou alleen het piekvermogen 240 watt kunnen zijn. In Nederland is het vaak erg bewolkt en zal het gezamenlijk vermogen niet veel hoger zijn dan 100 watt, terwijl de motor maximaal 2000 watt verbruikt. Door betere zonnepanelen te gebruiken zou het vermogen een beetje hoger kunnen worden, echter zal de hoeveelheid zonne-energie per vierkante meter in Nederland altijd relatief laag zijn ten opzichte van veel andere landen. De actieradius zou eventueel ook kunnen worden vergroot door een extra zonnepaneel mee te nemen, maar het ontwerp is bedoeld voor twee zonnepanelen.
2. De twee accu's wegen gezamenlijk 39 kg en zijn in serie geschakeld, hierdoor worden ze beschouwt als één accu van 24 volt en 55 Ah. Dit komt neer op een theoretisch vermogen van ongeveer 1,3 kWh en een energiedichtheid van ongeveer 0,04 kWh per kg. Bij de maximale snelheid zal de boot ongeveer 40 minuten kunnen varen en bij 8 kilometer per uur is het haalbaar om een paar uur te varen (zie hoofdstuk 4). Een lange vaartocht zoals Den Helder – Alkmaar of een Elfstedentocht is dus niet haalbaar zonder tussendoor de accu's op te laden (zie punt 4). ³⁴
3. Door de accu's wordt het gewicht van de boot erg groot, ze wegen meer dan alle andere onderdelen van de boot samen. Als het gewicht van deze accu's zou worden verminderd zou de boot harder en duurzamer kunnen varen. Lithium-ion accu's zouden een optie kunnen zijn om gewicht te besparen als ze betaalbaarder zouden zijn. Tijdens de Young Solar Challenge zijn lithium-ion accu's vooralsnog verboden. ³⁵
4. De laadtijd van de accu's van de boot schommelt tussen de 6 en 12 uur, afhankelijk van het gekozen laadprogramma (normaal, druppelen of extra vermogen) en het percentage ontlading tijdens het varen. De lader levert een stroom van 5 Ampère en heeft dus in theorie 11 uur nodig om een 55 Ah accu op te laden. Het is dus lastig om tijdens een vaartocht de accu's bij te laden omdat dit te lang duurt.

³⁴ (Optima Batteries, N.v.t.)

³⁵ (Young Solar Challenge, NK Groenleven Zonnebootrace, Solar Sport One en Solar & Energy Boat Challenge, 2019)

3.2 ONTWERPPROCES

Hoe kwam het idee voor de waterstofboot tot stand en hoe werd dit idee geperfectioneerd?

3.2.1 Eerste ideeën

Op 24 januari 2020 kwam waterstof voor het eerst ter sprake als optie om de boot te verbeteren. Michael van Alderwegen gaf toen een sponsorwerftraining en KeyKeg directeur Jan-Willem Veenendaal bleef hier onverwacht de hele ochtend bij. Hij vertelde enthousiast over de waterstofprojecten die in Den Helder zouden plaatsvinden en opperde dat de zonneboot op waterstof zou moeten varen. Toentertijd was de boot nog lang niet af en tijdens de Young Solar Challenge mochten de accu's toch niet vervangen worden.

Toen het een paar maanden later tijd was om een onderwerp te kiezen voor het profielwerkstuk was de zonneboot natuurlijk een goede optie, alleen een beetje te beperkt was de vrees. Jesper haalde het waterstof-idee weer tevoorschijn en dit keer keken we er wel serieus naar. Een reeks Skypegesprekken met onze begeleider meneer Berendsen, directeur, teamleiders en natuurlijk elkaar volgde. Conclusie: de boot wordt na de race omgebouwd tot waterstofboot en de actieradius moet flink vergroot worden.

Op school bleken nog een waterstofautootje, brandstofcel en elektrolyser te staan. Die mochten we van de mevrouw Ebbelaar (Technisch Onderwijs Assistent) wel lenen om een beetje te experimenteren met waterstof. Met behulp van een zonnepaneeltje werden uiteindelijk milliliters waterstof per minuut opgewekt en omgezet in energie. Het bleek erg eenvoudig en gaf het vertrouwen in de slagingskansen van dit project een kleine boost. In deze periode werden er veel artikelen over waterstof gelezen en gaf de vierdelige *Physics, Chemistry, Science & Energy through Hydrogen – Clean Energy for the Future*³⁶ boekenreeks inspiratie.

In het eerste daadwerkelijke plan zou de boot een tank van 1 kg waterstof op 700 bar aan boord hebben die werd gevuld door een elektrolyser en een compressor. De waterstof zou worden omgezet met 2000 W brandstofcel zodat er constant op de maximale snelheid zou kunnen worden gevaren. Twee problemen: het elektrolyser-compressor systeem zou waarschijnlijk nooit worden goedgekeurd en het hele systeem zou waarschijnlijk duurder zijn dan een sportwagen of speedboot. We moesten terug naar de tekentafel en een waterstof expert zoeken die ons kon helpen, anders zou het project niet verder komen dan een schets en een kleine proefopstelling.



³⁶ (Macdonald & Berry, 2000)

3.2.2 Bezoek aan Deoboat Rotterdam en Team Ecorunner Delft

Na lang zoeken vonden wij een waterstof expert uit Rotterdam: Marcus Rolloos. Hij is directeur-eigenaar van Deoboat en is onder andere gespecialiseerd in het gebruik van waterstof op boten. Nadat we hem telefonisch hadden verteld over ons plan mochten we langskomen, hij vertelde ons graag meer over waterstof. Vanwege de lange reistijd werd deze dag gecombineerd met een bezoek aan Team Ecorunner van de TU Delft.

Op 17 september 2020 stapten wij in de trein naar Rotterdam. Onderweg werd er gebrainstormd over het project en nagedacht over goede vragen aan Marcus Rolloos. Uiteindelijk hebben we bijna vier uur met hem gesproken en al onze vragen kunnen stellen. Hij demonstreerde een brandstofcel, mini-elektrolyser en waterstoftank. Ook hebben we onze telefoon natuurlijk opgeladen met stroom die werd opgewekt met waterstof. Het was ontzettend leerzaam en interessant! Marcus Rolloos wilde ons graag helpen en er werd afgesproken dat wij ná de race een concreet plan zouden voorleggen.³⁷

Het was daarna hollen om de bus te halen zodat we nog kort langs konden gaan bij Team Ecorunner in Delft. Dit team doet al jaren mee aan een duurzaamheidsrace en bouwt ieder jaar een extreem energiezuinige auto op waterstof. Deze eenpersoonswagen kan op één kilogram waterstof van Amsterdam naar Moskou rijden, áls deze een nummerbord zou hebben natuurlijk. Het was heel leuk om met deze studenten te praten en we kregen nog een aantal tips mee. Als we vragen zouden hebben zijn ze altijd bereid te helpen. Tenslotte mochten we nog een rondje rijden met de Ecorunner! De dag werd afgesloten in Restaurant 'De Waag' aan de Markt.



³⁷ (Rolloos, Gesprek met Marcus Rolloos, de directeur-eigenaar van Deoboat, over waterstof., 2020)

3.3 VERBETERPLAN: PROJECT WATERSTOFBOOT

Wat is het verbeterplan om de boot om te bouwen tot waterstofboot?

Een ideaal plan is niet altijd realistisch. Het is natuurlijk wel belangrijk om zo vooruitstrevend mogelijk te denken en om zo dicht in de buurt te komen van het ideale systeem. Het definitieve systeem vergelijken met het ideale geeft een goede indicatie hoe effectief het systeem is.

3.3.1 Ideaal systeem

Hoe zou het ideale systeem eruitzien als er een groter budget was?

Een ideaal systeem is waar alles optimaal werkt. De juiste onderdelen hiervoor zijn aanwezig en zij werken perfect samen. Het is echter niet mogelijk om een ideaal systeem te creëren door een tekort aan financiën. In een situatie waar een voldoende budget was zouden de best werkende producten gebruikt worden die zorgen voor het hoogste rendement.

Om te beginnen zou de brandstofcel met het hoogste rendement voor de boot gebruikt worden. Dat is de '500 watt brandstofcel stack integrated'. Deze brandstofcel is speciaal ontworpen voor voertuigen met een licht gewicht, zoals de V5 boot. De brandstofcel heeft de mogelijkheid om 500 watt aan energie te genereren. Ook is de brandstofcel relatief licht, wat het erg geschikt maakt voor in een boot; Het gewicht komt neer op 20 kilogram. Deze brandstofcel heeft een koelsysteem dat werkt aan de hand van luchtstroom. De brandstofcel heeft de mogelijkheid aan en uit gezet te worden. Het heeft een eigen elektronische schakelkast ingebouwd, wat onder andere controleert of er geen waterstof lekt, of de processen goed gaan om energie te winnen, of de energie geleverd kan worden en ook of er geen kortsluiting is het proces ontstaat. De brandstofcel moet het grootste deel van de stroom leveren voor de aandrijving van de motor.³⁸

Om de brandstofcel van waterstof te voorzien is een waterstoftank nodig. De optimale waterstoftank heeft een relatief lage druk, van 30 bar. Het gewicht is 6,9 kilogram en de waterstoftank is 38 centimeter hoog en heeft een diameter van 10 centimeter. Hierin past 81 gram waterstof, wat neer komt op 1,29 kWh. Het onder druk brengen van waterstof in een waterstoftank is een proces wat een hoop energie kost. Daarbij is de tank waarin waterstof zich onder een hoge druk, van bijvoorbeeld 300 bar, veel zwaarder dan een waterstoftank met lage druk. Dat komt doordat de waterstoftank de hogere druk moet kunnen houden, dus de waterstoftank is groter en zwaarder.³⁹

In de boot bevindt zich een kleine lithium-ion accu. Een lithium-ion accu is relatief licht. Het heeft het hoogste rendement onder de accu's, van ongeveer 80% tot 90%. De energiedichtheid is 190 tot 1200 watt per kilogram, wat voor accu's hoog is. De accu is handig om een piekvermogen te leveren, wanneer benodigd. Het gewicht van de lithium-ion accu is afhankelijk van de hoeveelheid energie benodigd is om te piek vermogen op te vangen.

Naast de kleine lithium-ion accu zijn er een paar supercondensators (supercapacitors) aanwezig. Zij kunnen in een korte tijd een hoge hoeveelheid stroom leveren in vergelijking tot hun massa. Dat is handig bij het opstarten van het elektrische systeem en het versnellen van de boot, wanneer er een hoge hoeveelheid stroom nodig is.

Om de benodigde waterstof te verkrijgen is het optimaal om het zelf op te kunnen wekken. Dit kan aan de hand van Hydrofill pro waterstof elektrolyser. Hiermee kan water omgezet worden tot waterstof en direct aangevuld worden in de lagedruk waterstoftank. Hierdoor is er geen vervoer van waterstof nodig. De waterstof wordt buiten de boot om geproduceerd en in de waterstoftank gepompt. Om de waterstoftank tijdens het varen te vullen is er een Linde Genie (300 bar, 424 gram waterstof) waterstoftank aanwezig op de kade of de begeleidingsboot.

³⁸ (Rolloos, 500 Watt Fuel Cell Stack Integrated, 2020)

³⁹ (Rolloos, myH2 900, 2020)

In het totaal werkt alles samen. De waterstoftank levert de brandstofcel voldoende waterstof om 500 watt te kunnen leveren aan de motor. Daarbij leveren de 2 zonnepanelen nog een kleine hoeveelheid energie. Wanneer er een hoog vermogen nodig is in een korte tijd, bijvoorbeeld tijdens het opstarten of versnellen wordt er stroom geleverd vanuit de supercondensators. Wanneer er langere tijd een kleine hoeveelheid extra vermogen nodig is, dan wordt er stroom geleverd vanuit de lithium-ion accu. Het oorspronkelijke systeem van de zoneboot zou hetzelfde blijven, op de loodaccu's na. In bijlage B is het oorspronkelijke elektrische systeem te zien. De loodaccu's worden vervangen door de brandstofcel, waterstoftank, de lithium-ion accu en de supercondensators. De loodaccu's zijn gezamenlijk 40,6 kilogram. In de tabel hieronder is te zien wat de prijs en het gewicht is van het ideale systeem.

Product	Prijs	Gewicht
500 watt fuel cell stack integrated	€7.140,00	20 kilogram
My H2 900 waterstoftank	€2.735,00	6,9 kilogram
24 volt 84 ampère-uur lithium-ion accu	€1.599,00	10,8 kilogram
Hydrofill pro waterstof elektrolyser	€799,00	36 kilogram (buiten de boot)
Linde genie 424gram H2	€155,00/maand huur+vullen	22,4 kilo (buiten de boot)
Supercapacitors	€250,00	0,5 kilogram
Totaal	€11.879,00	96,6 kilogram (waarvan 38,2 kilogram in de boot)

Het ideale systeem is 2,4 kilo lichter dan oorspronkelijke systeem van de zonneboot.

3.3.2 Definitief systeem

Hoe ziet het definitieve systeem eruit?

Door een tekort aan geld is het niet mogelijk een ideaal systeem te creëren voor het elektrische systeem in de boot. Ondanks dat is het wel mogelijk een semi-optimaal systeem te creëren met de beschikbare financiële middelen.

De gebruikte brandstofcel is de Hymera 200 fuel cell. Deze brandstofcel kan 200 watt aan energie leveren. Daarbij heeft de brandstofcel de functies om een lek aan waterstof te detecteren, om te controleren of de processen goed gaan om te controleren of er kortsluiting ontstaat en om te controleren of de energielevering goed gaat. Het gewicht is 10 kilo, wat niet optimaal is, maar ondanks dat is het relatief licht.⁴⁰

Doordat een lagedruk waterstoftank niet te huur is en het aanschaffen van een lagedruk waterstof tank financieel niet realistisch was, was het niet mogelijk een lagedruk tank in het systeem toe te voegen. In het definitieve systeem is een waterstoftank die een druk van 300 bar aan kan gebruikt. Het gewicht van deze waterstoftank is 22,4 kilogram. De hoogte is 66 centimeter en de diameter is 32,5 centimeter. Er past 424 gram waterstof in de waterstoftank, wat neer komt op 7 kWh.⁴¹

Doordat de definitieve brandstofcel 300 watt minder levert dan de ideale brandstofcel, heeft de boot minder energie voor de aandrijving van de motor. Om dit tekort te compenseren zitten er in de boot 2 loodaccu's. Aangezien de loodaccu's de energiepieken kunnen opvangen, is het

⁴⁰ (Rolloos, Hymera 200, 2020)

⁴¹ (Rolloos, Hydrogen Genie, 2020)

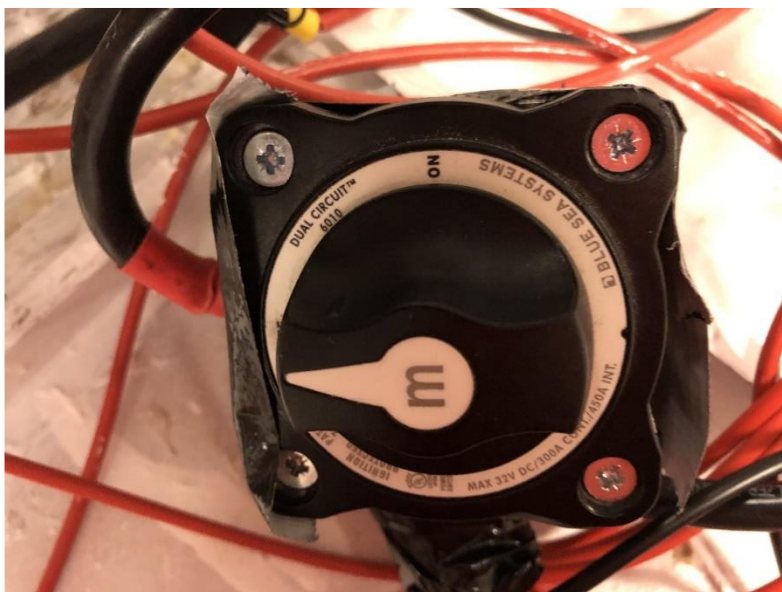
overbodig een lithium-ion accu toe te voegen. Doordat de loodaccu's ook in staat zijn om een hoog vermogen in een korte tijd te leveren, zijn de supercondensators overbodig.

Een elektrolyser is niet aanwezig, omdat het te duur in aanschaf was. Daarbij is het overbodig gezien de inhoud van de waterstoftank. De waterstoftank heeft meer dan voldoende waterstof, waardoor het overbodig is bij te kunnen tanken.

De waterstoftank levert constant waterstof aan de brandstofcel onder een druk van ongeveer 3 tot 8 bar. Een drukregelaar zet de druk van 280 bar om in een druk van 3 tot 8 bar, afhankelijk van hoe ver de drukregelaar wordt opgedraaid. In de rechter afbeelding hieronder is de drukregelaar van de waterstoftank te zien. Op de linker barometer is de druk in de waterstoftank te zien. De druk in de waterstoftank komt neer op 280 bar. Op de rechter barometer is de druk te zien wat de waterstoftank verlaat. De druk van het waterstof wat de tank verlaat is 5 bar.



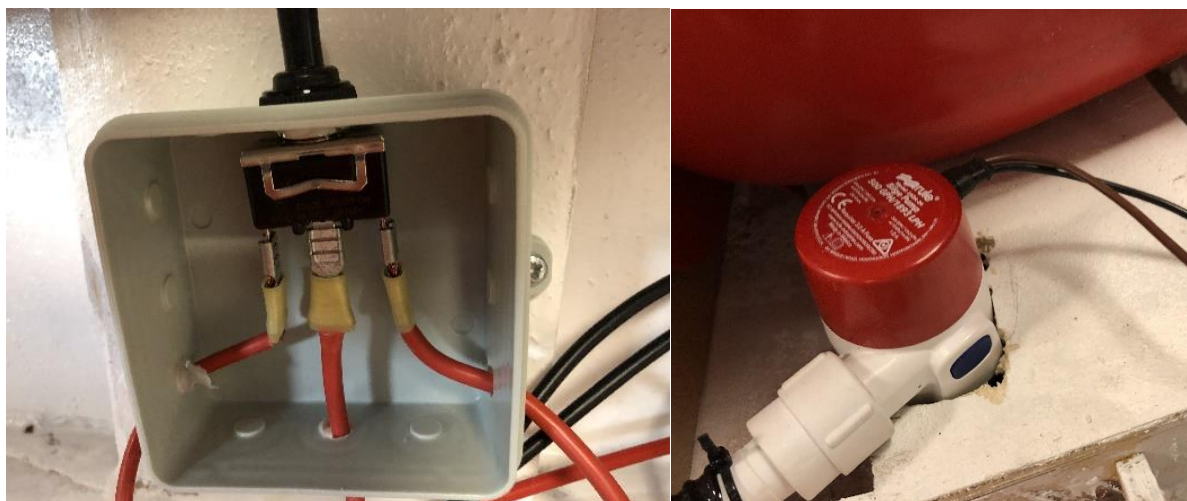
De brandstofcel haalt zuurstof uit de lucht en zet het waterstof en zuurstof om in water en elektrische energie. Ongeveer levert de brandstofcel constant 200 wat aan energie aan de motor. De stroom loopt via de motorswitch naar de motor. In de volgende afbeelding is de motorswitch te zien. De motorswitch staat nu uit, maar wanneer de knop 90 graden naar rechts wordt gedraaid, kan er stroom lopen en gaat het systeem aan.



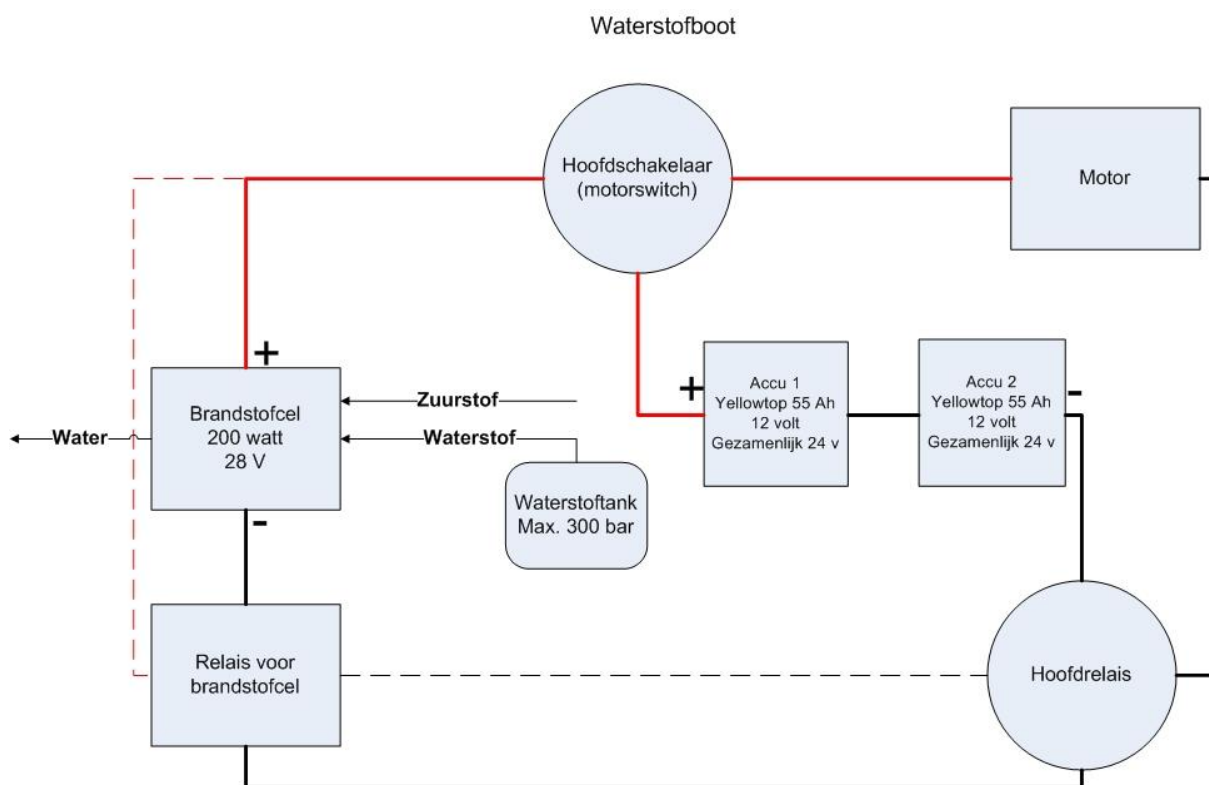
De twee accu's staan serie geschakeld aan elkaar. Gezamenlijk kunnen ze 24 volt en 55 ampère per uur leveren. De stroom loopt vanaf de accu's via de motorswitch naar de motor. Een ander deel van de stroom wordt geleverd door de twee zonnepanelen. De hoeveelheid stroom wat zij kunnen leveren is afhankelijk van de hoeveelheid licht wat erop valt. Tussen de brandstofcel en de accu's en de zonnepanelen en de accu's zitten relais, die op hun beurt weer gekoppeld zijn aan de noodstop en aan elkaar. Er is een hoofdrelais en er zijn drie kleine relais. In de linker afbeelding hieronder is de grote relais te zien vanaf zijaanzicht en in de rechter afbeelding is de grote relais te zien vanaf de onderkant inclusief gekoppelde draden.



De lenspomp is via een switch aan de accu gekoppeld. Wanneer de noodknop is ingedrukt heeft de lenspomp nog steeds de mogelijkheid om energie te krijgen om het water uit de boot te pompen. De lenspomp is via de schakelaar op drie standen te zetten: uit (midden), aan (links) en automatisch (rechts). Bij automatisch gaat de lenspomp water uit de boot pompen wanneer er te veel water in de boot wordt gedetecteerd. In de linker afbeelding is de schakelaar van de lenspomp te zien en in de rechter afbeelding is de lenspomp te zien.



In de afbeelding hieronder is te zien hoe het definitieve elektrische systeem in elkaar zit.



Het systeem lijkt op het elektrische systeem van bijlage B, maar dan is er een brandstofcel met brandstoftank parallel geschakeld aan toegevoegd. De kosten en het gewicht van het definitieve systeem is hieronder in een tabel weergegeven.

Product	Prijs	Gewicht
Hymera fuel cell 200	€400,00/maand (huur)	10 kilogram
Linde hydrogen genie	€155,00/maand (huur)	22,4 kilogram
Twee loodaccu's (al in bezit)	2x € 187,20 (n.v.t.)	2x 20,3 kilogram
Totaal	€555,00/maand (huur)	73 kilogram

Dit systeem is 32,4 kilogram zwaarder dan het oorspronkelijke elektrische systeem van de zonneboot en 34,8 kilogram zwaarder dan het ideale ontwerp voor de waterstofboot.

3.4 UITGEBREIDE BESCHRIJVING VAN DE TECHNIEK

Hoe zit de technische lay-out boot precies in elkaar? Welke elektronica is gebruikt om de boot werkend en efficiënter te krijgen?

3.4.1 Torqeedo cruise 2.0 RS (motor)

De motor van de boot. Een elektromotor van 2000 watt, vergelijkbaar met een dieselmotor van 5 PK. Ontworpen als hoofdaandrijving voor boten en sloepen tot 10 meter. Volledig waterdicht en met een display waarop diverse informatie te vinden is over bijvoorbeeld de resterende acculading en de snelheid.⁴²



In de rechter afbeelding hierboven is de motor te zien. Via een elektrisch draad van het 'gaspedaal' gekoppeld met de motor. Er is een magneet nodig op het 'gaspedaal' om de motor aan te krijgen, deze magneet fungeert tevens als dodemansknop.

3.4.2 Rule 360 bilgepomp (lenspomp)

De pomp van de boot. Werkt op 24 Volt en verplaatst 1400 liter water per uur. In de boot is een schakelaar aangebracht om de pomp aan te zetten of deze automatisch via een vlotter te laten werken. Als de noodknop is ingedrukt kan de lenspomp nog steeds gebruikt worden.

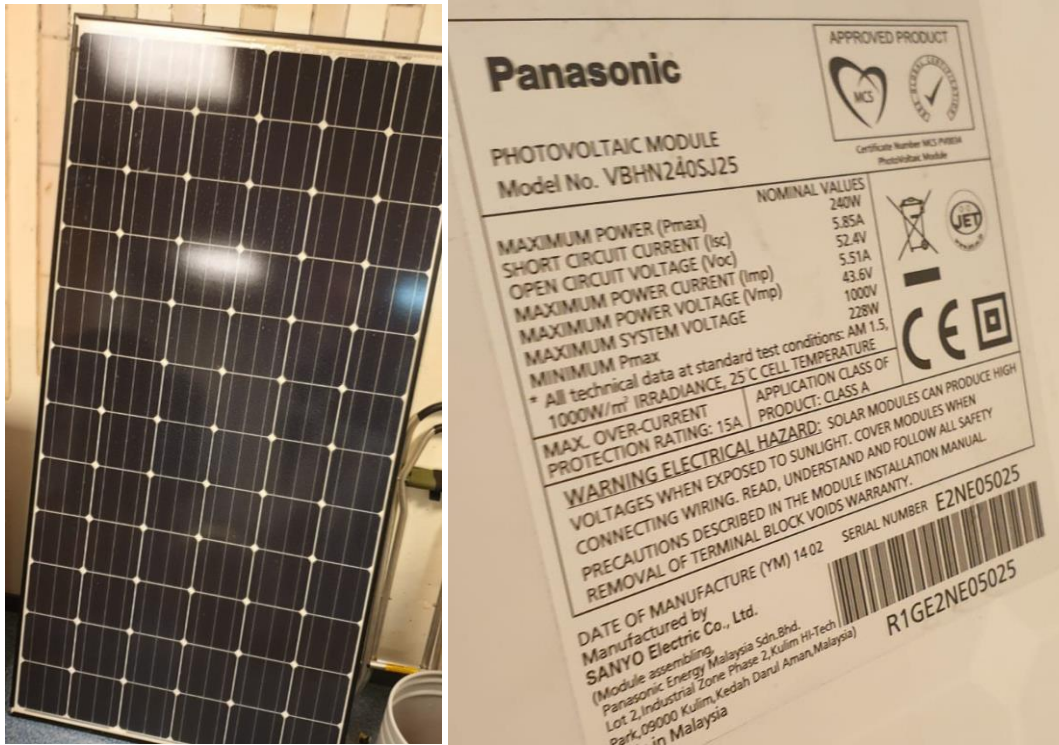
3.4.3 Relais (klein en groot) en motorswitch

Een relais is een schakelaar die met behulp van een elektromagneet een stroomkring kan onderbreken. De motorswitch is een draaischakelaar waarmee de stroom naar de motor kan worden afgesloten. De drie kleine relais worden gebruikt om de stroom van de zonnepanelen en de brandstofcel naar de accu's af te sluiten wanneer de motorswitch uit staat. De grote relais onderbreekt de volledige stroomkring, met uitzondering van de lenspomp.

⁴² (Slikkendam watersport, N.v.t.)

3.4.4 Panasonic photovoltaic module, Model no. VBHN240SJ25 (zonnepanelen)

De twee zonnepanelen op de boot. Zonnepanelen met een maximumvermogen van 240 W per stuk. Door eerder gebruik zal dit maximum lager liggen. In de linker afbeelding hieronder is het bovenaanzicht van het zonnepaneel te zien. In de rechter foto zijn de specificaties van het zonnepaneel te zien.



3.4.5 Optima Batteries Yellowtop model 8012-254 (accu's)

Twee 12V loodzuurbatterijen. Deze zijn in serie geschakeld om zo één batterij van 24V te creëren met een maximale energieopslag van 1,3 KWh. Optima yellowtops hebben een tot 3 keer langere levensduur dan andere loodzuuraccus, zijn erg schok en trilbestendig en kunnen in elke positie worden gemonteerd.⁴³ In de afbeelding hieronder is het bovenaanzicht van een van de twee accu's te zien. Rechts boven een aansluiting van de positieve pool en linksboven een aansluiting voor een negatieve pool.



⁴³ (Optima Batteries, N.v.t.)

3.4.6 Victron energy Bluesolar charge controller MPPT 75 / 15

Twee MPPT's (Maximum Power Point Tracker), voor elk zonnepaneel één. Een MPPT dient als spanningsregelaar en zorgt ervoor dat de pieken en dalen aan vermogen die uit de zonnepanelen komen worden omgezet in een constant vermogen, waarmee de accu's kunnen worden gevoed. In de afbeelding hieronder is een MPPT te zien. Onderin de MPPT zijn de aansluitingen voor de accu's en de zonnepanelen. Op de MPPT staan de specificaties en hoe de MPPT werkt.



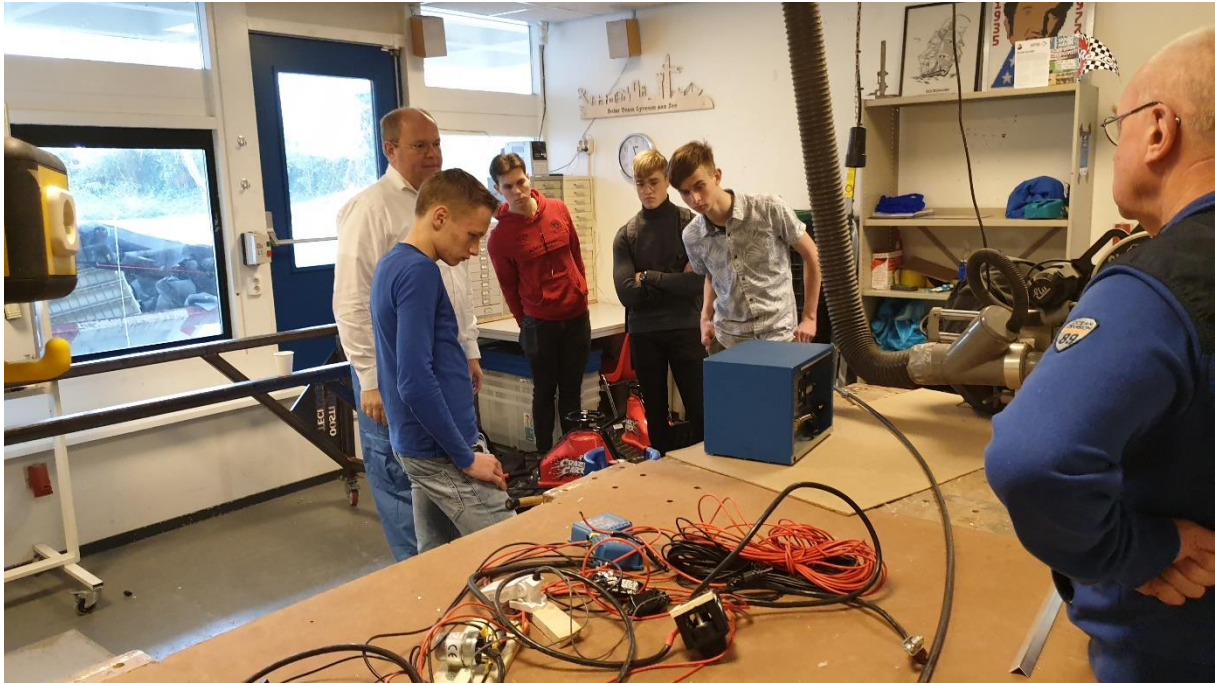
3.4.7 Eaton Moeller RMQ-Titan - Drukknopkast M22-PV/KC11/IY (noodknop)

De noodknop. Door deze knop in te drukken wordt de stroom onderbroken en komt het gehele systeem stil te liggen. Een uitzondering hierbij is de pomp, deze is zo geschakeld dat hij nog steeds werkt als de noodknop is ingedrukt. In de afbeelding hieronder is de noodknop te zien. De noodknop bevindt zich rechts van de bestuurder, zodat zowel de bestuurder als iemand buiten de boot de mogelijk heeft de noodknop in te drukken. De noodknop bedient de grote en drie kleine relais in de boot (zie 3.4.9).



3.4.8 Hymera 200 (brandstofcel)

De brandstofcel van de boot. De brandstofcel zet waterstof met behulp van zuurstof om in energie en laadt hiermee de accu op. De hymera 200 levert 200 Watt en kan gebruikt worden om batterijen te monitoren en op te laden. De brandstofcel werkt met waterstof onder een druk van 5-10 bar, hij is volledig geruisloos en stoot slechts een beetje water uit.



3.4.9 Linde Genie (waterstoftank)

De waterstoftank van de boot. De tank weegt leeg 22,4 kg, de tank bevat 424 gram waterstof onder een druk van 300 bar. Dit staat gelijk aan ongeveer 7 kWh aan energie. Via een drukregelaar en een slang wordt deze waterstof onder een druk van 5-10 bar naar de brandstofcel gebracht, waar het wordt omgezet naar elektrische energie.



3.5 CONSTRUCTIE

Hoe verliep het ombouwproces?

Een zonneboot ombouwen tot waterstofboot is een heel proces. Het hele (elektrische) systeem moet worden aangepast, zodat er een brandstofcel en waterstoftank in passen. Ook moet de constructie van de boot zelf worden verbeterd. Alles moet zorgvuldig gebeuren zodat het eindresultaat zo optimaal mogelijk is.

3.5.1 Verbeteren van de bootconstructie

Na de boot op zonne-energie getest te hebben, zijn er enkele aspecten opgevallen die verbetering vergden. Om gemakkelijk overal bij te kunnen is eerst de gehele boot weer leeggehaald.

Toen de boot leeg was is eerst de boot met wit epoxyverf van binnen geverfd. Van binnen was het hout van de boot nog onbehandeld. Aangezien water ervoor kan zorgen dat de houten boot van binnenuit weg kan rotten moest dit voorkomen worden. De witte epoxyverf is waterbestendig en weert water, zodat het niet bij het hout kan komen. Ook zorgt de witte epoxyverf ervoor dat de boot iets steviger wordt, aangezien de verf uithardt.

Naast het algemeen verstevigen en beschermen van de boot, was er nog een zwak punt bij de boot. Dat was achterop de boot bij de plank waar de motor aan vast zit die tijdens het varen enige bewegingen vertoonde. De motor is relatief zwaar, 15,3 kilogram, waardoor er een behoorlijk gewicht aan de achterste plank hangt. De achterste plank is verstevigd door extra planken aan de binnenkant van de boot te zetten en deze met moeren en bouten vast te maken aan de andere plank waaraan de motor zit.

Er waren in de boot ook enkele lekken, waardoor er een kleine hoeveelheid water de mogelijkheid had om naar binnen te komen. Om dit te voorkomen zijn veel hoeken in de boot, waar er een grote kans is dat water de mogelijkheid krijgt om de boot binnen te komen, dicht gemaakt met kit. Hierdoor is de boot een stuk beter waterdicht.

Omdat de accu's, de brandstofcel en de waterstoftank stabiel in de boot moeten kunnen staan, zijn planken op maat gemaakt en aan de boot vastgezet met schroeven of houtlijm. Gezien het feit dat de waterstoftank een cilinder is, moest het stabiel kunnen liggen zonder te bewegen. Hiervoor zijn houten balken op een plaat gemonteerd op de juiste afmetingen voor de waterstoftank. De platen waren zo ontworpen en in de boot gezet dat er spanbanden aan vast gemaakt konden worden, zodat de accu's, waterstoftank en brandstofcel niet konden verplaatsen tijdens het varen.

3.5.2 Elektrisch systeem

Door het inbouwen van een brandstofcel en waterstoftank, werd de boot 32,4 kilo zwaarder. Het gewicht moest goed verdeeld worden voor een stabiele waterliging. Hierdoor moesten veel onderdelen van het elektrische systeem verplaatst worden. Het gevolg ervan was dat een aantal draden te kort en een aantal draden te lang waren.

Eerst werd een nieuwe indeling gemaakt van het elektrische systeem. Een accu kwam voorin, de andere accu kwam achterin, de waterstoftank kwam achter de bestuurder te liggen, de brandstofcel kwam links van de bestuurder, de motorswitch kwam rechts van de bestuurder, MPPT's en de relais kwamen rechts aan de zijkant van de boot te zitten en de lenspomp kwam onder de bestuurdersstoel te zitten. Hiermee werd geprobeerd een goede gewichtsverdeling te bereiken.

Nadat deze indeling gemaakt was konden de draden afgemeten worden. De draden werden op de juiste maat gemaakt en op de uiteinden van de draden werden koppelstukjes gevestigd. Deze werden allemaal gekoppeld aan de onderdelen van het elektrische systeem en vastgemaakt. Om de draden netjes weg te werken en stabiel te laten liggen, werden er gaten door het skelet

van de boot geboord en hierdoor werden de draden geleid. De relais werden in relaiskastjes gedaan, zodat ze veilig en redelijk waterdicht afgeschermd lagen. Een relais in een relaiskastje is in de afbeelding hier linksonder te zien. In de afbeelding rechtsonder⁴⁴ zijn de onderdelen te zien die nodig waren om de brandstofcel aan het elektrische systeem te koppelen.



Toen het gehele elektrische systeem in elkaar zat werd het getest. Er werd getest of het functioneerde aan de hand van het aanzetten van de motor en het kijken of er geen kortsluiting ontstaat. Eerst werd er gecontroleerd of het systeem werkt zonder aanvulling van de brandstofcel. Daarna werd de brandstofcel aangezet in het systeem en als laatste werd getest of het elektrische systeem in zijn geheel functioneerde inclusief de pomp, de zonnepanelen, de brandstofcel en de noodknop. Alles functioneerde meteen zoals het gepland was, behalve de brandstofcel. Doordat de accu's volledig opgeladen waren en de brandstofcel ingesteld was pas energie te gaan leveren wanneer de accu's leeg raakten leek het erop dat de brandstofcel niet werkte. Na een tijdje de instellingen te hebben aangepast werkte alles naar behoren.

Omdat de boot versterkt was en het elektrische systeem goed functioneerde konden de overige onderdelen van de boot in de boot vastgezet worden. Eerst werd de stoel voor de bestuurder in de boot gezet, deze is midden in de boot. Vervolgens werd het stuursysteem in de boot geïnstalleerd. Er moesten ook voor het stuursysteem gaten geboord worden door het skelet van de boot, om het netjes weg te werken en stabiel te laten liggen. Het stuur is stabiel en stevig vastgemaakt vlak voor de zitplaats van de bestuurder, wel zo dat de bestuurder comfortabel kan zitten. In de afbeelding hieronder is het stuur te zien vanaf het perspectief van de bestuurder.



⁴⁴ Het stopcontact op de foto en één van de kleine stekkers onderaan de foto zijn niet gebruikt.

3.6 VEILIGHEID

Hoe wordt de veiligheid te allen tijde gewaarborgd?

Waterstof heeft grotendeels onterecht een slechte reputatie en wordt door veel mensen gezien als iets engs. In tegenstelling tot wat veel mensen beweren is waterstof niet explosief. Wel is waterstof erg brandbaar en moeten er daarom meerdere veiligheidsmaatregelen in acht genomen worden.

3.6.1 Werkplaats

De werkplaats bevindt zich op de begane grond van de blauwe vleugel van het Lyceum aan Zee en is uitgerust met meerdere brandblussers en een nooduitgang. De conciërges, schoolleiders, bèta-docenten, directeur, voorzitter van het College van Bestuur en de technisch onderwijsassistent (TOA) zijn op de hoogte van het waterstofproject. Ook is er een medewerker van Scholen aan Zee die over de veiligheid gaat langs geweest; ze gaf zelfs een compliment voor de getroffen veiligheidsmaatregelen en heldere uitleg.

Op het moment dat de waterstoftank niet wordt gebruikt staat deze in een kast met een afzuiginstallatie in het magazijn van het laboratorium. De ruimte waar deze kast in staat is afgesloten en kan alleen door de bèta-docenten of TOA worden geopend. Zodra de waterstoftank in de werkplaats staat, worden er antistatische overalls aangetrokken om het risico op vonkvorming te minimaliseren. Ook wordt er een raampje opengezet, zodat er bij een (onopgemerkt) waterstoflek geen ophoping van waterstof kan ontstaan. Bij een concentratie van minder dan vier procent waterstof in de lucht, kan het niet ontbranden. Bovendien is de ontsnappingssnelheid van waterstof circa 20 m/s. Dit betekent dat bij een lek in een goed geventileerde ruimte de waterstof niet zal blijven hangen en het risico op ontbranding zeer klein is.

3.6.2 Boot

De waterstoftank is met meerdere spanbanden verankerd en ligt geblokkeerd op een metalen plaat met een aantal houten blokjes aan de zijkanten. De brandstofcel staat naast de bestuurder zodat deze altijd bediend en uitgeschakeld kan worden. In de brandstofcel zitten twee zekeringen, één kan handmatig worden gereset en de andere moet in de fabriek worden vervangen. Door deze zekeringen zal de stroom nooit te hoog worden. De brandstofcel is tevens een accubewaker en controleert of er geen waterstof weglekt in het systeem. Als er een fout wordt gedetecteerd wordt de waterstoftoevoer gestopt en geeft het apparaat een foutmelding (error).

Zoals in hoofdstuk één besproken voldoet de boot aan de technische eisen van de Young Solar Challenge, dit is nog steeds het geval. De enige regel waar niet aan wordt voldaan is de verplichting om een helm te dragen, dit vermindert naar onze mening het zicht en gehoor van de bestuurder. Wel draagt de bestuurder uiteraard een (automatisch opblaasbaar) reddingsvest en is er een portofoon aan boord.

De boot heeft een noodknop die er door middel van één grote relais en drie kleine relais voor zorgt dat de motor uit wordt gezet en er geen stroom van de zonnepanelen en brandstofcel door het systeem loopt. Er is ook een lenspomp aan boord, die handmatig of automatisch (met een vlotter) werkt en in een noodsituatie zal blijven werken.

3.7 FINANCIERING

Wat zijn de kosten van dit project en hoe worden deze gefinancierd?

3.7.1 Kosten

Hieronder is een kostenoverzicht gegeven van het project, de kosten die gemaakt zijn door het Solar Team voordat de boot werd omgebouwd zijn niet meegenomen. Ook is het gebruik van materialen zoals (rest)hout uit het magazijn van school niet meegenomen, dit zal het Lyceum aan Zee hoogstens tien euro gekost hebben.

Omschrijving:	Kosten:
Huur brandstofcel bij Deoboat inclusief transport	€ 400,00 *
Huur waterstoftank inclusief transport	€ 155,00 *
3 Antistatische overalls bij Unishore	€ 315,00
3 Regenjassen inclusief bedrukken logo	€ 165,00
Reiskosten naar Rotterdam en Delft + eten	€ 120,00 **
Elektronica bij Elektrostart (kabels, relais, zekering, accu-check, etc.)	€ 100,00 **
2 Blikken witte verf op epoxy-basis	€ 39,60
4 Zwarte kunststof kikkers inclusief moeren en bouten	€ 27,60
10 Spanbanden in verschillende lengtes	€ 35,60
Automatisch Reddingsvest 165 N mh rood	€ 87,95
Boottrailer	<i>Gesponsord door Prommenz!</i>
Waterbestendige camera t.w.v. € 400	<i>Gesponsord door DMI!</i>
€250 aan gereedschap bij Govers, o.a. steeksleutels en uitgebreide set boortjes	<i>Gesponsord door Govers!</i>
Totaal:	€ 1445,75

**Gesponsord door Port of Den Helder*

***Schatting, dus waarschijnlijk 10% foutmarge*

3.7.2 Baten

De volledige kosten van huur van de brandstofcel en waterstoftank (€555,-) zijn gesponsord door Port of Den Helder. Port of Den Helder wordt de komende jaren een belangrijke speler in de energietransitie en waterstofeconomie door onder andere een waterstoftankstation en waterstoffabriek te openen. Het bedrijf is daarom natuurlijk de ideale partner voor een waterstofboot project. De overige kosten zijn betaald uit het fonds van het Solar Team omdat het producten betrof die ook voor de komende teams gebruikt kunnen worden.

3.7.3 Balans

Onder de streep heeft de ombouw van de zonneboot tot waterstofboot Scholen aan Zee niets gekost. Sterker nog, er is nog genoeg sponsorgeld over om alle uitgaven van het volgend team te financieren en de school heeft veel positieve media-aandacht gekregen door dit project. Het project was financieel gezien succesvol.

3.8 CONCLUSIE

Hoe bouw je een zonneboot om tot waterstofboot?

Het nadeel van een zonneboot is dat er zonlicht nodig is om te varen en de motor vaak meer energie verbruikt dan de zonnepanelen opwekken. Er zijn hierom accu's aan boord, maar deze zijn erg zwaar en hebben een lange laadtijd. De oplossing werd gevonden in waterstof. Om kennis op te doen zijn wij bij Team Ecorunner Delft en Deoboat in Rotterdam langsgegaan. Er werd besloten een waterstoftank en brandstofcel in te bouwen, waardoor de actieradius groter is geworden. Het bleek financieel niet haalbaar om de boot 100% op waterstof te laten varen, maar voor dit profielwerkstuk was een hybride systeem een goede oplossing. Het hele project is gefinancierd door Port of Den Helder en andere sponsors.



4. DE PRAKTIJK VERSUS DE THEORIE

Wat is het effect van toevoeging van een brandstofcel in vergelijking met de verwachte verbetering?

4.1 VERWACHTE VERBETERING

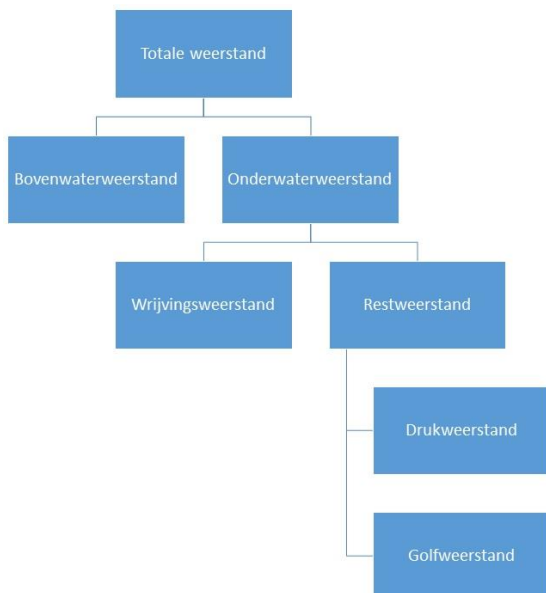
Wat is het verwachte effect van de verbetering?

4.1.1 Het doel

Het doel van de toevoeging van een brandstofcel en waterstoftank is het vergroten van de actieradius en het reduceren van de laadtijd. Dit wordt bereikt doordat de brandstofcel met één volle waterstoftank naar schatting 35 uur op vol vermogen energie kan leveren. Het zal dus niet nodig zijn om de waterstoftank te vervangen tijdens een vaartocht en het wordt haalbaar om lange afstanden af te leggen. De waterstoftank heeft 14 kWh potentiële energie, waarvan de brandstofcel met een rendement van 50% ongeveer 7 kWh elektriciteit kan leveren. In combinatie met de accu's en zonnepanelen zou er een redelijke snelheid van 8 tot 10 km/u gevaren moeten kunnen worden tijdens een dagtocht.

4.1.2 Theorie waterweerstand

De weerstand van een boot bestaat uit onder- en bovenwaterweerstand. De bovenwaterweerstand wordt veroorzaakt door luchtweerstand en neemt toe bij een hogere snelheid. De onderwaterweerstand bestaat uit wrijvings- en restweerstand (drukweerstand en golfweerstand).⁴⁵ Als de oppervlakte van de boot dat contact maakt met het water groter wordt, zal de weerstand ook toenemen. Extra gewicht zorgt dat de boot dieper in water ligt en dus meer onderwaterweerstand heeft. Het is dus erg belangrijk om de boot zo licht mogelijk te maken en het natte oppervlak te minimaliseren. Ook heeft de gladheid van de boot invloed op de weerstand in de vorm van wrijvingsweerstand.



⁴⁵ (Bosma, 2017)

4.1.3 Optimale en maximale snelheid

Bij het ombouwen van de boot tot waterstofboot zijn verschillende componenten toegevoegd, waardoor de boot zwaarder is en dieper in het water ligt. Doordat de boot dieper in het water ligt zal de weerstand die de boot ondervindt van het water toenemen. Door de extra weerstand zal de topsnelheid van de boot lager liggen.

Met de optimale snelheid wordt bedoeld bij welke snelheid de boot zo ver mogelijk kan varen. Bij een erg hoge snelheid zal de boot meer waterweerstand ondervinden, waardoor er relatief gezien meer watt wordt gebruikt om een bepaalde snelheid vast te houden. Bij een erg lage snelheid zal de schroef zo langzaam draaien dat de stuwkracht relatief laag is vergeleken met het aantal watt.

De extra energie van de waterstof heeft hier geen effect op aangezien de motor nog steeds hetzelfde is. Het gewicht van de brandstofcel en waterstoftank heeft hier wel effect op. Door het extra gewicht is er voor elke snelheid meer energie nodig. Hierdoor zal de optimumsnelheid lager liggen ten opzichte van de zonneboot.

4.1.4 Actieradius

Door de toevoeging van waterstof is er meer energie beschikbaar en zal de actieradius dus enorm vergroot worden. Met zonnepanelen is de actieradius theoretisch onbeperkt, mits de zon schijnt en er bij een zeer lage snelheid wordt gevaren. Daarom zijn deze hier buiten beschouwing gelaten. Het gaat hier dus over de actieradius van de boot met volle accu's en een volle waterstoftank.

Wanneer de accu's volledig opgeladen zijn bevatten deze 1,3 kWh aan energie. De waterstoftank bevat 424 gram waterstof, wat gelijk staat aan nog eens 7 kWh. Dat geeft dus een totaal van 8,3 kWh. Van de race met de zonneboot weten we dat de maximumsnelheid van de boot rond de 16,5 Km/h ligt. Bij deze snelheid gebruikt de motor 2000 watt⁴⁶, terwijl de brandstofcel slechts 200 watt levert. Hierdoor zal er niet heel lang op maximale snelheid gevaren kunnen worden, in theorie maximaal driekwartier. De brandstofcel zorgt ervoor dat er een paar minuten langer op maximale snelheid gevaren kan worden.

Echter, het doel van de brandstofcel is niet om langer op de topsnelheid te kunnen varen. De brandstofcel is bedoeld om lange vaartochten mogelijk te maken. Tijdens een vaartocht van 5 uur zal de brandstofcel bijvoorbeeld 1,0 kWh produceren. In combinatie met de accu's is er tijdens de vaartocht 2,3 kWh beschikbaar, in plaats van 1,3 kWh in de oude situatie. Dit zorgt ervoor dat de motor in plaats van 260 watt, 460 watt continu kan verbruiken en een aanzienlijk hogere snelheid heeft. Om te weten wat de snelheid is bij verschillende vermogens, werd het tijd voor een testvaart.



⁴⁶ (Torqeedo GmbH, 2021)

4.2 TESTVAART 6 DECEMBER 2020

Hoe verliep de testvaart op 6 december 2020 en wat waren de resultaten?

4.2.1 Verloop van dag

Op zondag 6 december 2020 was het tijd voor de testvaart op waterstof. Het was buiten ijskoud en gelukkig vrijwel windstil. In de ochtend werden alle spullen in de auto geladen en de boot op de trailer geladen. Bij Fort Westoever in Den Helder werden de accu's, waterstof tank, zonnepanelen en motor aangesloten. Toen alles gecheckt was werd de boot door meneer Berendsen voorzichtig het water in gereden en kon Jonas aan boord stappen.

Via de begeleidingsboot die helaas nog niet op waterstof vaart, werd de testvaart gevolgd. In stappen van 50 watt werd het vermogen opgevoerd en de snelheid doorgegeven aan de begeleidingsboot. Deze werden genoteerd in een tabel zodat de bestuurder dit niet hoefde te doen tijdens het varen. Aanvankelijk zou ook de opgewekte stroom en spanning worden doorgegeven, maar dit bleek erg lastig om af te lezen. De stroom is niet afhankelijk van de snelheid, deze wordt enkel behaald door het ontladingspercentage van de accu's. Dit bleek ook tijdens het testen van het systeem in de werkplaats, de accu's waren 100% gevuld en er kon hierdoor geen stroom worden geleverd.

Tijdens de testvaart van Jonas begon de motor bij 1000 watt erg te trillen, hierdoor stopt zijn meting hier. Op de Flaneerkade trakteerde mevrouw Marees iedereen op een beker warme chocolademelk en wisselde Jasper met Jonas. De testvaart van Jasper duurde korter omdat de boot voor de zonsondergang het water uit moest. Hierdoor is er gekozen om in grotere stappen het vermogen op te voeren. Na de testvaart werd het elektrisch systeem ontkoppeld en de boot weer terug naar school gebracht. De tabellen met de resultaten van de testvaart zijn te vinden in bijlage D.

4.2.2 Bevindingen

“In het begin was het even wennen met het sturen en gasgeven en was ik erg bang ergens tegenaan te varen en zo al ons harde werk teniet te doen. Na een paar minuten raakte ik beter aan de boot gewend en begon ik meer van de tocht te genieten. Het meten was nogal moeilijk aangezien bij een klein tikje tegen de gashendel het aantal watt zo met 200 omhoog schoot.”

Jonas Rensmaag

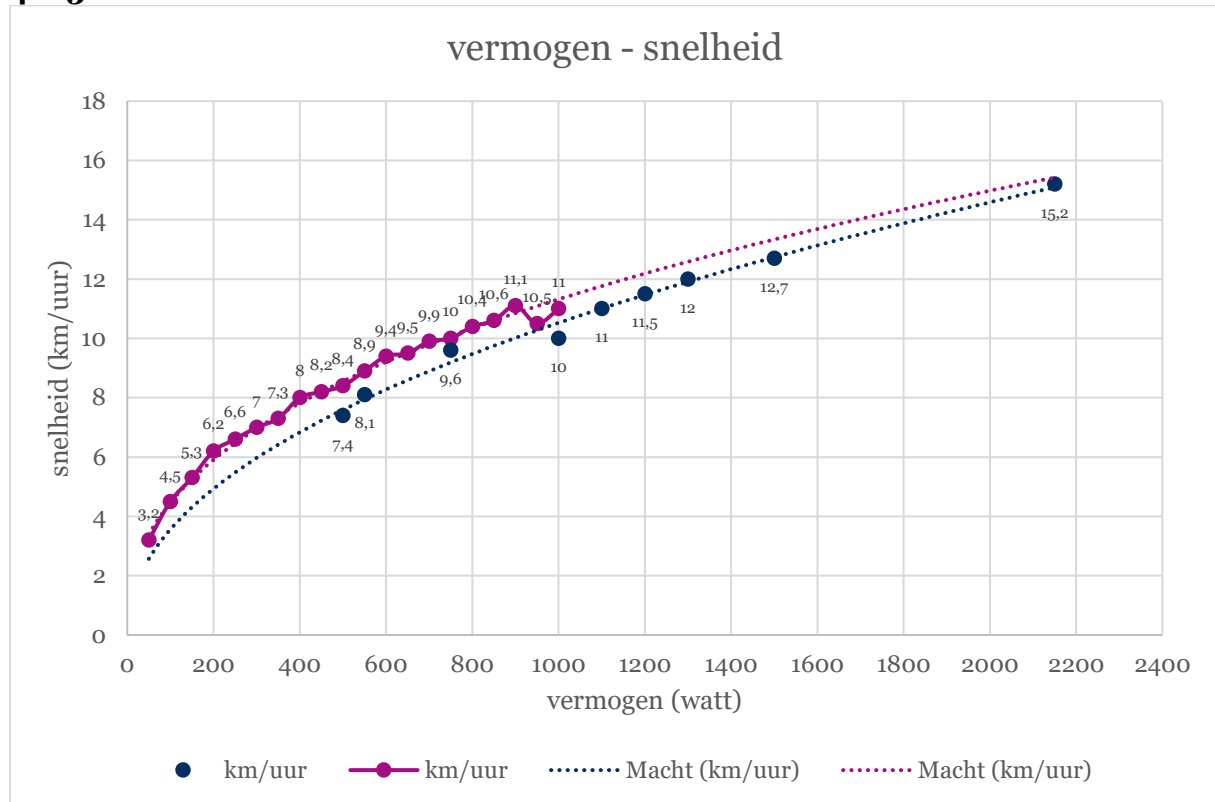
“Het varen in de V5 boot op waterstof is een fantastische ervaring. Met de gedachte in het achterhoofd dat ik vaar in de eerste boot op waterstof in Den Helder is het heel gaaf. Het mooiste was dat al het werk wat in de boot op waterstof is gestopt nu tot zijn recht komt en goed functioneert.”

Jesper Pijnacker

“De waterstofboot lag tijdens de testvaart keurig in het water en het was goed te volgen vanuit de begeleidingsboot. Toen Jonas aangaf dat de motor trilde was dit vanuit de boot goed te zien. Bij Jasper viel het op dat de boot dieper in het water lag, waardoor er meer golven over de boeg kwamen. Ook leek de boot rustiger in het water te liggen, waarschijnlijk door de grotere diepgang. De communicatie verliep prettig dankzij twee portofoons.”

Mathijn Brink

4.2.3 Resultaten

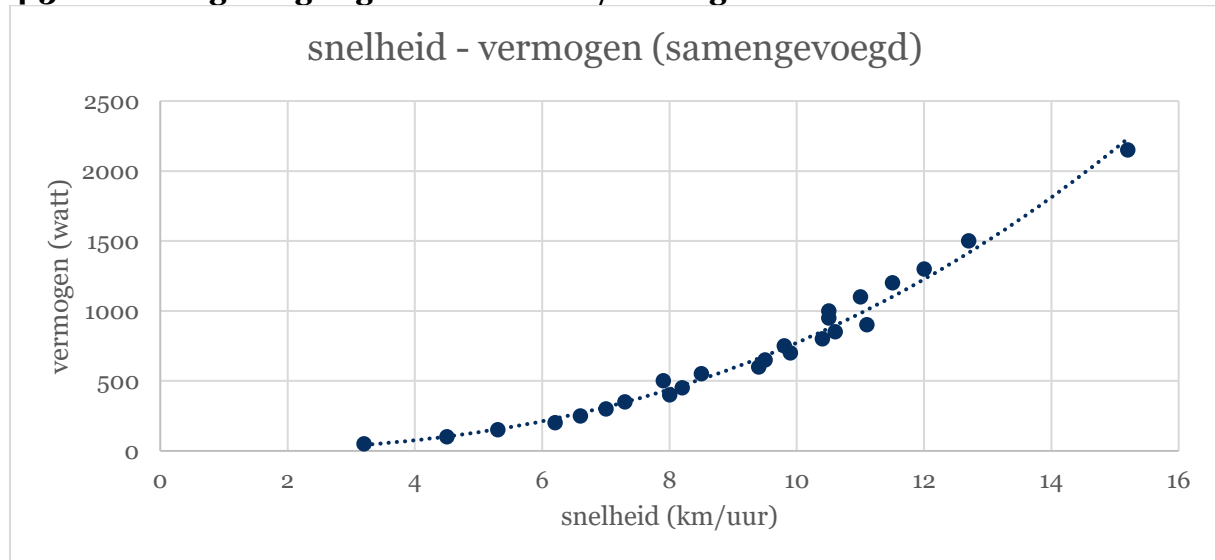


In deze tabel staan de metingen die gedaan zijn op de testdag: de snelheid van de boot vergeleken met het verbruik van de motor in watt. De paarse lijn zijn metingen gedaan door Jonas en de Blauwe lijn zijn metingen gedaan door Jesper. In de bijlagen staat een tabel van deze gegevens. De lijn van Jesper loopt onder die van Jonas doordat Jesper zwaarder weegt, maar volgt wel dezelfde richting. De metingen van Jonas gaan maar tot 1000 watt vanwege problemen met de motor, de metingen van Jesper gaan verder maar liggen verder uit elkaar vanwege tijdnoed.

4.3 VERWERKING VAN RESULTATEN

Welke conclusies kunnen worden getrokken uit de resultaten van de testvaart?

4.3.1 Samengevoegde grafiek snelheid/vermogen



Zou het mogelijk zijn om één algemeen geldende vergelijking te maken voor het energieverbruik bij verschillende snelheden? Om deze formule op te stellen worden de gegevens van zowel Jasper als Jonas gebruikt. Er ontstaat hierdoor een redelijk algemeen beeld, geldend voor Jasper, Jonas, Mathijn en andere scholieren met een gewicht van 60-75 kg. Jonas weegt ongeveer 55 kg en Jasper circa 80 kg. Door de punten in het assenstelsel wordt een kwadratische trendlijn gegenereerd door Excel. Ook de bijbehorende formule wordt gegeven:

$$y = 2,2741x^{2,5314}$$

met $R^2 = 0,9903$ (determinatiecoëfficiënt)

De formule geeft een indicatie en zal altijd een foutmarge hebben vanwege bijvoorbeeld de weersomstandigheden en het exacte gewicht van de schipper. Meer hierover in de foutendiscussie (4.4).

4.3.2 Uitkomst verwachtingen

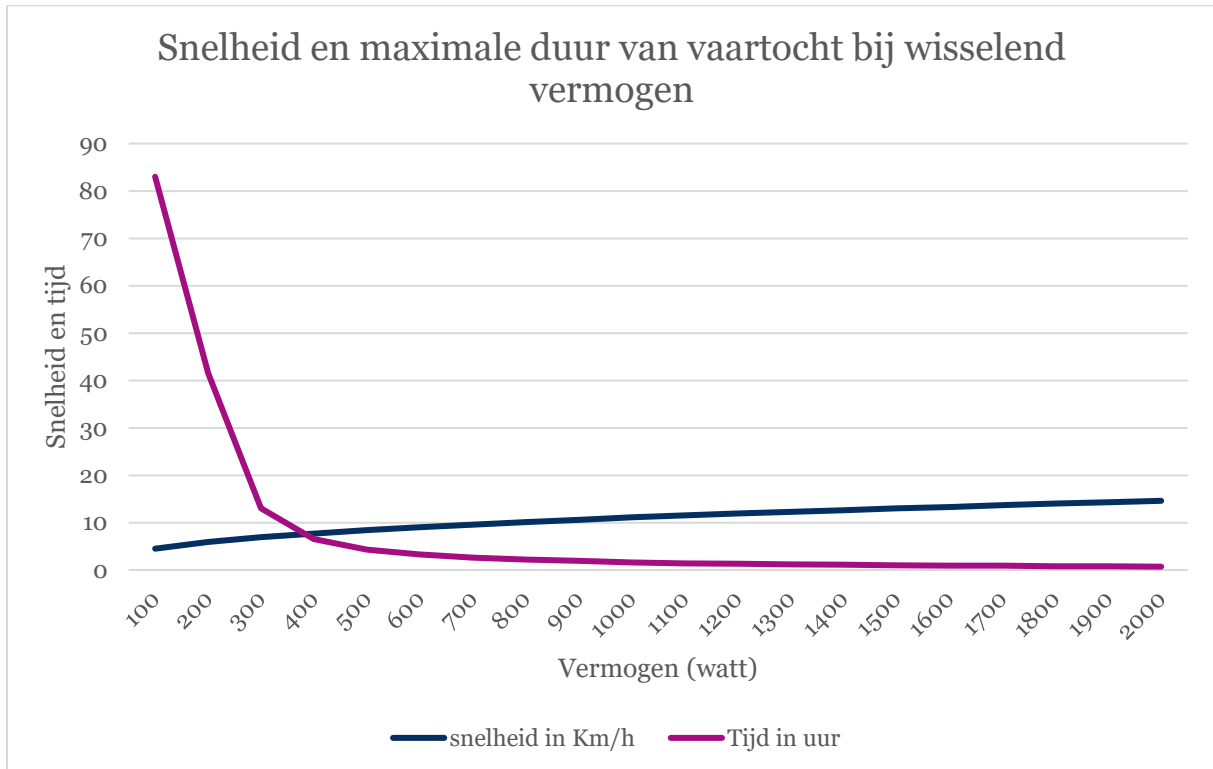
De verwachting was dat door de toevoeging van waterstof en alle bijbehorende stappen het volgende zou veranderen:

- De actieradius zal vergroten.
- De maximumsnelheid zal dalen
- De optimumsnelheid zal dalen

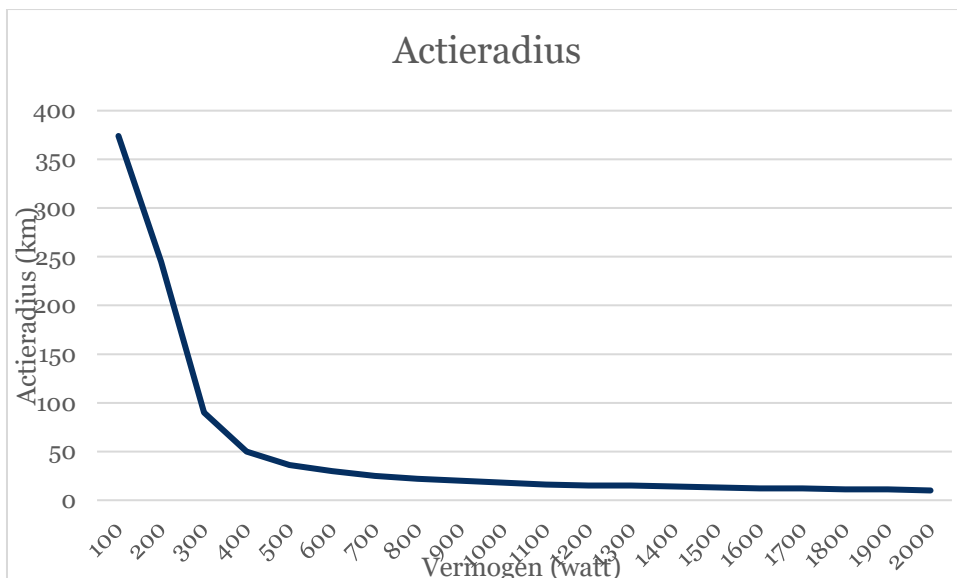
De actieradius is zeker groter geworden. Door de extra 7 KWh in de waterstoftank heeft de boot 6,38 keer meer energie ter beschikking dan voor de ombouw tot waterstofboot. Van 1,3 KWh naar 8,3 KWh. De enige beperking is dat de brandstofcel slechts 200 watt kan leveren, waardoor er niet lang op hoge snelheid kan worden gevaren. Als je zo snel mogelijk wilt varen en aan het einde van de reis de accu en de waterstoftank op hetzelfde moment leeg wilt hebben kan je dus met iets meer dan 200 watt varen.

Stel: je gaat varen met een snelheid die gelijk staat aan 200 watt, dit is volgens de metingen ongeveer 6,2 Km/h. De waterstoftank bevat 7 KWh, de brandstofcel produceert 200 watt hieruit. Dus kost het de brandstofcel 35 uur om alle waterstof om te zetten tot energie. Dan kan je nog eens 6,5 uur varen op de lading van de accu's (1,3 Kwh). Zo kun je dus 41,5 uur varen

met 6,2 Km/h. Dit komt neer op een actieradius van 257.3 Km. Dit is echter niet heel realistisch aangezien niemand zin heeft om 41,5 uur met 6,2 Km/h te varen.



De snelheid van de boot en de tijd die hij kan varen op een bepaald vermogen. De tijd in uren, de snelheid in kilometer per uur en het vermogen in watt.



De actieradius van de boot bij een bepaald vermogen. Actieradius in kilometer en vermogen in watt.

Bij een energieverbruik van boven de 200 watt daalt de actieradius aanzienlijk doordat de brandstofcel slechts 200 watt kan leveren. Hierdoor is de accu al leeg voordat alle beschikbare energie in de waterstoftank gebruikt is.

De maximumsnelheid van de boot is gemeten op ongeveer 15,2 Km/h, dit is 1,3 Km/h lager dan de 16,5 Km/h die tijdens de race met de zonneboot werd gemeten. De maximumsnelheid is dus inderdaad omlaaggegaan. Dit komt voornamelijk door de toename van gewicht.

Het maximale vermogen is hetzelfde gebleven, aangezien gewicht daar geen invloed op heeft. De optimumsnelheid is echter wel gedaald omdat het gewicht van de boot is toegenomen. Daardoor gaat de boot bij een bepaald aantal vermogen minder snel.

4.3.3 Toepassingen van gegevens

De gegevens van de testvaart zijn uiteraard erg interessant voor dit onderzoeksverslag. Ook zijn er meerdere praktische toepassingen waarbij deze gegevens essentieel zijn of een grote bijdrage kunnen leveren. Voor een vaartocht van Alkmaar naar Den Helder is het belangrijk om te weten op welke snelheid er optimaal gevaren kan worden. Dit wil zeggen, de hoogste snelheid waarop 40 tot 50 (afhankelijk van start- en finishlocatie) kilometer in een dag kan worden afgelegd. Als er bijvoorbeeld 8 km/uur gevaren wordt, is het verbruik ongeveer 440 watt volgens de vergelijking.

Voor het Solar Team Lyceum aan Zee 2021 zijn deze gegevens ook bruikbaar voor de racevoorbereidingen voor de Young Solar Challenge 2021. Dit team vaart in dezelfde soort boot, maar heeft geen extra gewicht van de waterstofinstallatie aan boord. Doordat de waterweerstand kleiner zal zijn, zal de vergelijking anders zijn. Deze vergelijking geeft in ieder geval een goede indicatie.

4.4 FOUTENDISCUSSIE

Hoe kunnen onnauwkeurigheden in de metingen zijn ontstaan en wat voor invloed hebben deze factoren de resultaten?

Zoals bij elk experiment is er ook bij deze metingen een zekere foutmarge, dit kan veroorzaakt zijn door de volgende punten:

4.4.1 Windrichting

Tijdens de metingen werd er in verschillende windrichtingen gevaren. Wanneer de boot met de wind meevoer ging hij relatief harder dan wanneer hij tegen de wind in voer. Hierdoor is het mogelijk dat de snelheidsgegevens niet helemaal overeenkomen. Bij tegenwind of wind in de rug zal rekening moeten gehouden worden met een hogere of lagere snelheid.

4.4.2 Verschil in gewicht tussen Jesper en Jonas

Tijdens de testvaart zijn er metingen gedaan door zowel Jonas als Jesper. Jesper weegt zo'n 25 kilo zwaarder dan Jonas, waardoor de boot dieper in het water zal liggen en langzamer zal varen bij elke hoeveelheid watt. Dit is duidelijk te zien in de grafiek van de resultaten in hoofdstuk 4.2.3. De boot leek wel stabiel in het water te liggen bij Jesper.

4.4.3 Aantal metingen

Vanwege tijdnoed bij Jesper en motorproblemen bij Jonas is het aantal metingen niet zo groot als de bedoeling was. Hierdoor is het mogelijk dat de grafiek afwijkt van de werkelijkheid. Echter, er zijn toch een behoorlijk aantal metingen gedaan en zeker in het gedeelte van 0 tot 1000 watt zijn het er meer dan genoeg. In het gedeelte van 1000 tot 2000 watt zou de afwijking iets groter kunnen zijn.

4.4.4 Onnauwkeurigheid in aantal watt

Bij de metingen was het moeilijk om de motor op een bepaald aantal watt te laten draaien. Deze waarde schommelde namelijk continu en een kleine tik tegen de gashendel kon makkelijk 100 watt schelen. Hierdoor zijn het metingen van ongeveer de juiste waardes. De waardes lagen steeds in de buurt en in de grafiek worden deze waardes uitgemiddeld, zodat de uitschieters verdwijnen.

4.5 CONCLUSIE

Wat is het effect van toevoeging van een brandstofcel in vergelijking met de verwachte verbetering?

Het doel van dit profielwerkstuk was om de actieradius van de boot door middel van een brandstofcel en waterstoftank sterk te vergroten en aan te tonen dat het mogelijk is om op waterstof te varen. Tijdens de testvaart op 6 december 2020 is dit bewezen en zijn er metingen gedaan. Met deze gegevens is het gelukt om een formule te maken waarmee het energieverbruik in watt (y) op basis van de snelheid in kilometer per uur (x) kan worden bepaald. Deze formule is essentieel voor het plannen van lange vaartochten. Er zit mogelijk een kleine afwijking in deze formule, veroorzaakt door factoren als de windrichting en het gewicht van de bestuurder. Hoewel de maximale snelheid is gedaald door het extra gewicht van de waterstoftank, is aangetoond dat de actieradius is vergroot. Het doel is dus bereikt.

$y = 2,2741x^{2,5314}$ (y= energieverbruik in watt x= snelheid in Km/h)



5. DUURZAME PLEZIERVAART IN NEDERLAND

Hoe kan waterstof worden gebruikt om de Nederlandse pleziervaart te verduurzamen?

Met dit profielwerkstuk is slechts één boot verduurzaamd, dit heeft relatief weinig invloed op het klimaat. Wat gebeurt er als we de pleziervaart in een heel Nederland verduurzamen? En hoe doen we dat?

5.1 SITUATIE OP DIT MOMENT

Hoe duurzaam is de huidige pleziervaart?

Nederland kent met al zijn kanalen, sloten en havens zeer veel pleziervaart. Onder de pleziervaart vallen alle boten die recreatief worden gebruikt, pleziervaart is dus de tegenhanger van de beroepsvaart. Het totale aantal pleziervaartuigen in Nederland is moeilijk vast te stellen, aangezien boten in particulier bezit vaak niet geregistreerd worden. Het totale aantal recreatievaartuigen is dan ook lange tijd niet meer geteld.

De meest recente gegevens⁴⁷, afkomstig uit 2015, geven een totaal van ongeveer 154.000 exemplaren in jachthavens en 43.500 exemplaren in slootjes en kanalen bij particulieren. Hier komen ook nog 210.300 boten bij die op de wal liggen en met nog enige regelmaat worden gebruikt. Dit komt neer op een geschat totaal van 407.800 pleziervaartuigen. Boten die wel geregistreerd staan maar niet meer worden gebruikt zijn hierin niet opgenomen.

Er wordt verwacht dat het aantal boten in het water de komende jaren zal afnemen: van 197.500 in 2015 naar 145.200 in 2050.⁴⁸ Dit komt doordat jongeren de tijd en het geld niet meer hebben voor een boot en een groot deel van de botenbezitters een relatief hoge leeftijd heeft.

5.1.1 Dieselmotoren en uitstoot

Het overgrote deel van de Nederlandse pleziervaart gebruikt motoren aangedreven door diesel. Dit is begrijpelijk, maar ook erg vervuilend aangezien bij de verbranding van diesel verschillende broeikasgassen uit worden gestoten. Ook maken dieselmotoren vaak veel lawaai en verontreinigend voor de (lokale) luchtkwaliteit. Er wordt daarom geprobeerd het gebruik van diesel en andere fossiele brandstoffen (in de pleziervaart) terug te dringen.

5.1.2 Huidige duurzame initiatieven

Duurzame initiatieven gericht op de voortstuwing van pleziervaartuigen zijn er op dit moment niet zoveel. Toch zijn er projecten gaande, om het gebruik van elektrisch aangedreven boten te stimuleren. Zo probeert de gemeente Amsterdam vanaf 2025 alle vaartuigen in het centrum van de stad emissievrij te laten varen op elektriciteit⁴⁹ en hebben verschillende steden oplaadpunten in de havens. Deze elektrisch aangedreven motoren hebben dan wel geen uitstoot, de elektriciteit is lang niet altijd duurzaam opgewekt. Veel botenbezitters hebben tegenwoordig een zonnepaneel of kleine windturbine aan boord geplaatst en de accu's op te laden.

⁴⁷ (Waterrecreatie Advies BV, 2015)

⁴⁸ (Waterrecreatie advies BV, 2016)

⁴⁹ (Freriks, 2019)



De grotere echt duurzame oplossingen zijn gericht op zonnepanelen en waterstof. Er zijn verschillende initiatieven met zonnepanelen, waaronder de Young Solar Challenge. Dit project stond aan de basis van ons profielwerkstuk. Projecten met waterstof zijn nog erg schaars. Een paar voorbeelden zijn een rondvaartboot op waterstof in Amsterdam en de 'Energy Observer'. Dit is een Frans project waarbij een boot volledig op waterstof en zonne-energie vaart.⁵⁰

5.2 DUURZAME ALTERNATIEVEN VOOR DIESEL

Welke duurzame alternatieven zijn er voor diesel in de pleziervaart?

Waterstof is niet de enige duurzame manier om een boot aan te drijven, waarom is het dan precies de beste optie? Hieronder een overzicht van verschillende 'duurzame' manieren om een boot aan te drijven. Deze staan op volgorde van duurzaamheid. Niet alle duurzame energievormen staan hiertussen, aangezien je niet zomaar een windturbine of kerncentrale op een pleziervaartuig plaatst.

5.2.1 LPG

LPG (Liquid Petroleum Gas) is een bijproduct van de winning van aardgas en aardolie. Het is een mengsel van propaan en butaan, onder hoge druk wordt dit vloeibaar en kan het in een brandstoftank worden gebruikt. LPG is schoner dan andere vormen van fossiele brandstoffen. De verbranding ervan produceert minder CO₂ en minder stikstofoxiden.

LPG heeft een goede reputatie als duurzame oplossing en in de haven van Rotterdam is in 2015 de eerste raffinaderij voor 'Bio' LPG gebouwd. 'Bio' LPG is een variant op LPG waarbij de rest van de afvalstoffen van de gaswinning eerst zijn weg gefilterd, waardoor het weer net iets duurzamer is dan reguliere LPG. De goede reputatie van LPG valt te verklaren met het feit dat er relatief weinig hoeft te veranderen met een vaartuig om het op LPG te kunnen laten varen. Zo zijn de bestuurders duurzamer bezig zonder dat het hen veel moeite of geld kost.

Echter, LPG blijft een soort fossiele brandstof en de verbranding ervan stoot broeikasgassen uit. LPG is dus niet bepaald duurzaam.⁵¹

⁵⁰ (Energy Observer, 2021)

⁵¹ (Vaartland, 2020)

5.2.2 Biobrandstof

Biobrandstoffen zijn brandstoffen op basis van plantaardig materiaal. Ze worden geproduceerd uit afvalstoffen van de landbouw en soms zelfs voedsel. Om de benodigde grondstoffen hiervoor te leveren wordt helaas vaak bos gekapt en niet terug geplant, geheel milieuvriendelijk is het dus niet. Toch wordt het op steeds grotere schaal toegepast en heeft het een goed imago. De enige reden dat het duurzamer is dan lpg is dat het geen fossiele brandstof is en dus niet zal opraken.⁵²

5.2.3 Accu's

Accu's kunnen veel energie opslaan en deze weer leveren, ook kunnen ze opnieuw opgeladen worden. Dit maakt accu's erg geschikt voor in vaartuigen. Een ander pluspunt is dat accu's geen uitstoot hebben en dus niet bijdragen aan klimaatverandering. Bij accu's is de manier waarop de elektriciteit is opgewekt belangrijk voor de duurzaamheid. Ook de bouwstoffen van de accu bepalen de duurzaamheid.

Accu's worden geproduceerd uit verschillende stoffen waarvan het productieproces niet geheel duurzaam is. Zo wordt de productie van kobalt in Congo voor een gedeelte gedaan met behulp van kinderarbeid en de productie van lithium is ook problematisch. 90% van de wereldvoorraad lithium ligt in de 'lithium driehoek', deze ligt in Chili, Bolivia en Argentinië. Om lithium te winnen is enorm veel water nodig, wat in dat gebied al schaars genoeg is.⁵³

Tenslotte zijn de accu's die buiten gebruik raken een probleem, volgens onderzoek van Recycling Netwerk Benelux⁵⁴ wordt slechts 32% van de batterijen gerecycled. In hoofdstuk 2 is dieper ingegaan op het gebruik van accu's.

5.2.4 Zonnepanelen

Zonnepanelen worden algemeen gezien als een zeer duurzame oplossing voor de toekomst, vrijwel eindeloze energieopwekking en in grote getalen uit te voeren. Voor vaartuigen is dit minder effectief. Doordat de energielevering van zonnepanelen erg onstabiel is kunnen vaartuigen geen constante snelheid vasthouden. Wanneer de zon niet schijnt kom je zelfs helemaal niet vooruit, daarom worden zonnepanelen vaak gecombineerd met accu's. Het resultaat is een duurzame boot die zijn eigen energie opwekt maar in tijden van minder zonuren toch nog werkzaam is.

Zonnepanelen zijn zeer duurzaam maar zijn alleen effectief in de pleziervaart wanneer ze met meerdere accu's worden gecombineerd. Aangezien accu's zoals hiervoor besproken niet geheel duurzaam zijn kunnen zonnepanelen in de pleziervaart toch niet helemaal duurzaam worden toegepast.

5.2.5 Waterstof

Waterstof (H_2) bevat zeer veel energie en is erg licht. Dus is het zeer geschikt om vaartuigen aan te drijven. De reactie waarbij uit waterstof energie ontstaat heeft bovendien geen enkele uitstoot, het enige reactieproduct is water. Waterstof moet echter eerst nog geproduceerd worden, hier is energie voor nodig. Dus dan is het probleem, is de gebruikte energie wel duurzaam? Hiervoor onderscheiden we 3 soorten waterstof: grijze, blauwe en groene. Hiervan is groene waterstof het duurzaamst en grijze waterstof het minst.

Doordat er geen accu's nodig zijn om een boot efficiënt aan te drijven en er geen vereisten zijn voor omstandigheden is waterstof duurzamer dan zonnepanelen. Ook kan een waterstoftank een stuk sneller worden gevuld dan een accu kan worden opgeladen. De laadtijd van een waterstofboot zal dus nauwelijks verschillen met een normale dieselboot.

⁵² (Greenpeace, 2015)

⁵³ (voor de wereld van morgen, 2019)

⁵⁴ (Recycling netwerk Benelux, sd)

5.2.6 Zeilen

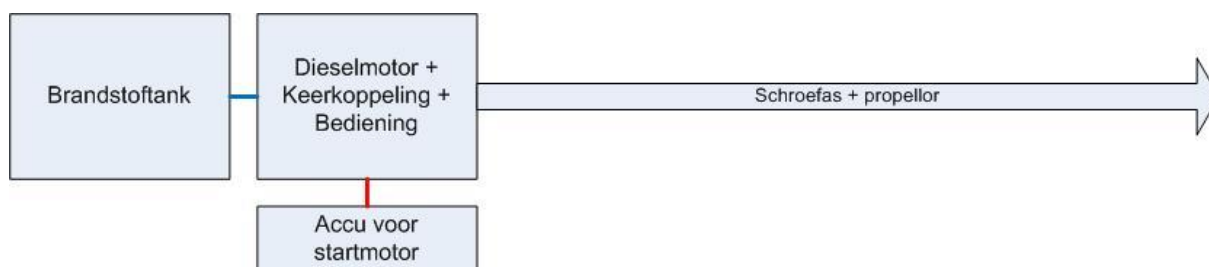
Zeilen is natuurlijk de meest duurzame manier om een boot aan te drijven, er is geen brandstof nodig, geen uitstoot en geen lawaai van de motor. Het overduidelijke nadeel van zeilen is dat een zeilboot zonder wind stil ligt. Daarom gebruiken veel zeilboten een dieselmotor om bij windstille of in de haven toch vooruit te komen. Voor deze functie zou een combinatie van zeil en waterstof ideaal zijn, gezien de korte gebruiksduur per zeildag.

5.3 BOTEN OMBOUWEN

Is het mogelijk om al bestaande boten om te bouwen tot waterstofboten? En zo ja, wat betekent dit?

Het is zeker dat de uitstoot van broeikasgassen van de pleziervaart de komende jaren omlaag moet om de klimaatveranderingen tegen te gaan. De oplossing zou kunnen liggen in pleziervaartboten met een elektromotor, brandstofcel en waterstoftank. De kans is aanwezig dat er over een aantal jaar alleen duurzame boten gebouwd mogen worden of er in bepaalde gebieden alleen elektrisch gevaren mag worden zoals in de Amsterdamse grachtengordel in 2025 (zie 3.1). In dat geval moeten óf alle huidige boten naar de sloop óf worden verduurzaamd.

Voor een groot deel van de botenbezitters zou het ombouwen van hun boot verreweg de beste optie zijn. Tijdens een ombouw wordt de dieselmotor en brandstoftank verwijderd, waardoor er veel ruimte vrijkomt. De motor wordt vervangen door een elektromotor, die over het algemeen zeer compact is en weinig onderhoud vereist door het geringe aantal onderdelen. In de vrijgekomen ruimte worden één of meerdere waterstoftanks (waarschijnlijk 350 of 700 bar) geplaatst. Deze tanks zullen de meeste ruimte in beslag nemen. Ook wordt een brandstofcel geplaatst, waarvan het vermogen afhangt van de motor. Tenslotte worden er accu's geplaatst om piekvermogens op te vangen.



In de figuur is boven een versimpelde voorstelling van een pleziervaartboot met dieselmotor⁵⁵ te zien. Onder is een verduurzaamde boot te zien. Hieronder worden vier categorieën pleziervaatuigen besproken hoe de verduurzaming er uit zal zien.

⁵⁵ (Manley & Holmes, 2011)

5.3.1 Zeilboten

Een zeilboot heeft meestal een kleine motor aan boord die slechts af en toe gebruikt wordt, bijvoorbeeld bij windstilte of in havens. Het vervangen van een op diesel aangedreven buitenboordmotor wordt steeds goedkoper en is momenteel voor de meeste zeilbooteigenaren betaalbaar. Er is vervolgens slechts een kleine brandstofcel, waterstoftank en accu vereist. De brandstofcel laadt een accu op die dan gebruikt wordt voor het aandrijven van de elektromotor. Wanneer de motor niet gebruikt wordt, wordt de accu langzaam opgeladen. Doordat er geen grote brandstofcel of waterstoftank vereist is de benodigde ruimte gering en zijn de kosten relatief laag. Zeilboten kunnen op dit moment dus al worden verduurzaamt met waterstof op een betaalbare manier.

5.3.2 Kleine motorboten

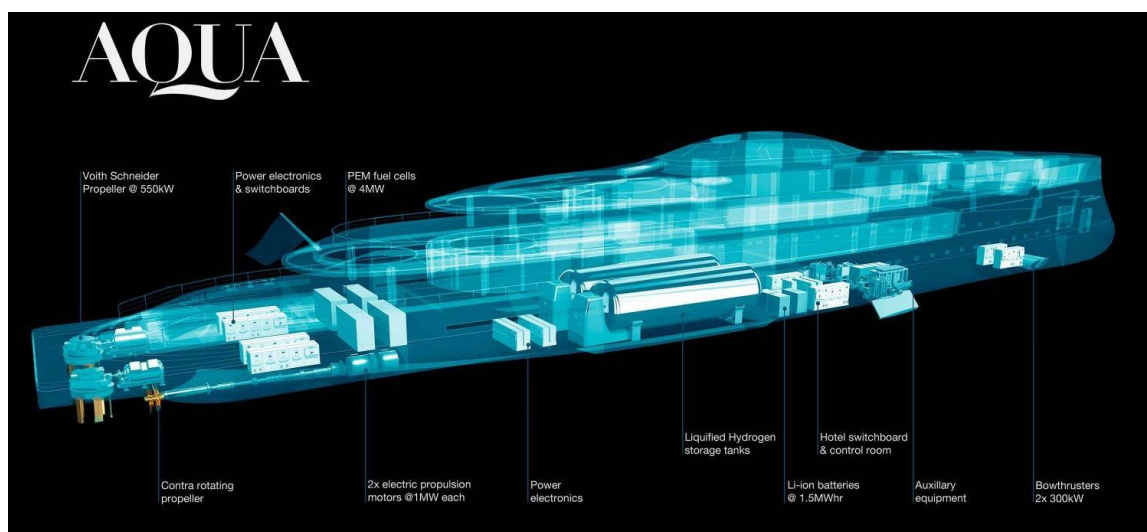
Onder kleine motorboten vallen boten en sloepen met een buitenboordmotor. Deze motoren hebben weinig vermogen nodig maar worden in tegenstelling tot de motoren bij zeilboten wel regelmatig voor een paar uur achter elkaar gebruikt. Een kleine brandstofcel zal nog steeds voldoen, wel moeten de accu en waterstoftank groter worden om het langere gebruik te compenseren. Door de tank en brandstofcel wordt de vrije ruimte aan boord kleiner.

5.3.3 Middelgrote motorboten

Onder middelgrote motorboten vallen boten met een ingebouwde motor. Deze motoren vragen meer vermogen en worden regelmatig voor meerdere uren gebruikt. Hiervoor is een grote accu, grotere brandstofcel en grote waterstoftank vereist. De grotere brandstofcel is nodig om langere tijd te kunnen varen zonder dat de accu leeg raakt. Met het weghalen van de dieselmotor ontstaat er ruimte voor de waterstoftank, accu en brandstofcel.

5.3.4 Grote motorboten (topsegment)

Onder grote motorboten vallen de luxe privéjachten. Dit is een categorie met relatief weinig boten – die alleen voor de allerrijksten te betalen zijn – en per boot een gigantische uitstoot veroorzaken. Deze boten varen vaak dagen achtereen waardoor een grote actieradius is vereist. Er moet een grote hoeveelheid waterstof en een krachtige brandstofcel aan boord zijn. Met alleen accu's zal een jacht niet dagenlang kunnen varen en kan er niet snel getankt worden. Het zal erg duur zijn om een groot privéjacht op waterstof te laten varen, maar de prijs van een 'gewoon privéjacht' is over het algemeen ook niet laag. De eerste miljardair is inmiddels al gevonden, Business Insider meldt dat Bill Gates een waterstofjacht van 112 meter lang heeft besteld bij Sinot Yacht Architecture & Design uit Eemnes⁵⁶. De kans bestaat dat juist deze categorie in een rap tempo verduurzaamt doordat de eigenaren erg vermogend zijn.



⁵⁶ (Borden, 2020)

5.4 WATERSTOFNETWERK IN NEDERLAND

Wat zijn de mogelijkheden voor een pleziervaart op waterstof in Nederland?

5.4.1 Ideale oplossing

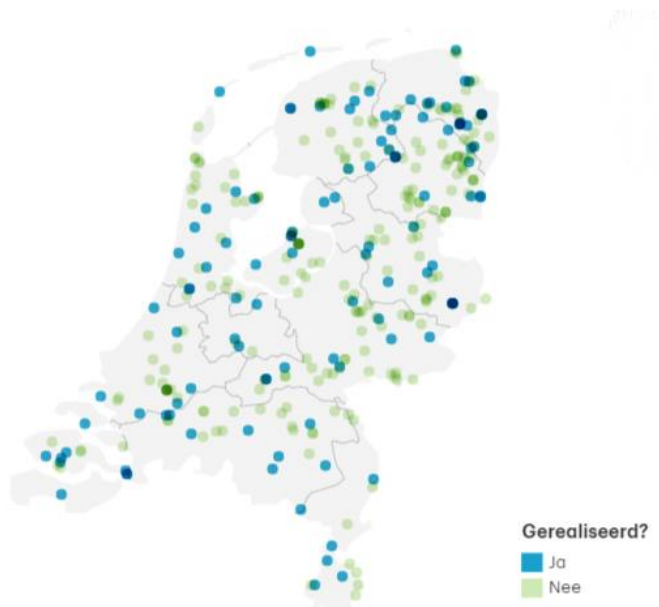
Hoe dichtter alle stappen van het proces zich bij elkaar bevinden, hoe makkelijker en sneller het gehele proces. Een ideale locatie hiervoor is bijvoorbeeld in de buurt van een zonne- of windpark. Daar kan energie wat op dat moment niet in het stroomnet nodig is worden gebruikt om waterstof te produceren. Zo heb je de energielevering, de productie van waterstof en het afhaalpunt allemaal op dezelfde plek.

Dit is de beste optie omdat op deze manier zo min mogelijk energie verloren gaat. Wanneer de elektrolyser en de plek waar de energie wordt opgewekt ver van elkaar liggen moet de energie eerst met kabels vervoerd worden, hierbij gaat door de weerstand van de draad energie verloren.

Ideaal is als deze zonneparken op efficiënte locaties staan, denk hierbij aan de Sahara of andere extreem zonnige gebieden. Wanneer waterstof daar geproduceerd wordt en daarna wordt getransporteerd naar Nederland gaat er weinig energie verloren. Maar voor dit moment is dat nog niet het geval. Hoe kunnen we in Nederland zelf waterstof produceren?

5.4.2 Productie

Voor de productie van waterstof zijn slechts drie dingen nodig: water, energie en een elektrolyser. In een land als Nederland is water geen probleem en is energie ook volop aanwezig. Echter, een belangrijke vereiste is wel dat deze energie duurzaam is opgewekt en dat is in het grootste deel van de Nederlandse energiemix nog niet het geval. Om een redelijke productie van groene waterstof te realiseren zijn grote hoeveelheden duurzame energie nodig en voor Nederland zijn zonne- en windenergie op dit moment de best opties. In de toekomst zouden ook energievormen als kernenergie⁵⁷, golfslagenergie⁵⁸ of getijdenenergie een rol kunnen gaan spelen. De zonnepanelen worden voornamelijk op land (daken) geplaatst en een groot deel van de windmolenparken zal in de Noordzee geplaatst worden.



locaties van zonneparken in Nederland⁵⁹

⁵⁷ Waarschijnlijk als oplossing gedurende de energietransitie totdat er voldoende duurzame energie beschikbaar is.

⁵⁸ (Brink & Rensmaag, 2018)

⁵⁹ (Dijke, 2020)

Om grote hoeveelheden waterstof te produceren zijn grote elektrolyzers nodig. Bij zonne- en windmolenparken op het land kunnen deze elektrolyzers vlakbij de energiebron geplaatst worden. Op zee zouden hiervoor oude boorplatformen die zich nog in de Noordzee bevinden gebruikt kunnen worden. Deze hebben alle fossiele brandstoffen onder hen al verkregen en hebben nu geen nut meer. Na een verbouwing kunnen deze platformen dienen als standplaats voor elektrolyzers. Scheveningen heeft hierbij de primeur, voor de kust komt namelijk, op een oud boorplatform, de eerste offshore groene waterstofinstallatie ter wereld.⁶⁰

5.4.3 Vervoer

Waterstofgas is niet moeilijk te vervoeren, het is erg licht en makkelijk op te slaan. Echter, waterstof is brandbaar en verschillende ongelukken hebben de reputatie ervan geen goed gedaan. Daardoor zijn de veiligheidseisen⁶¹ voor waterstof bizar hoog, wat opslag en daardoor ook vervoer vermoeilijkt. Toch zijn er mogelijkheden.

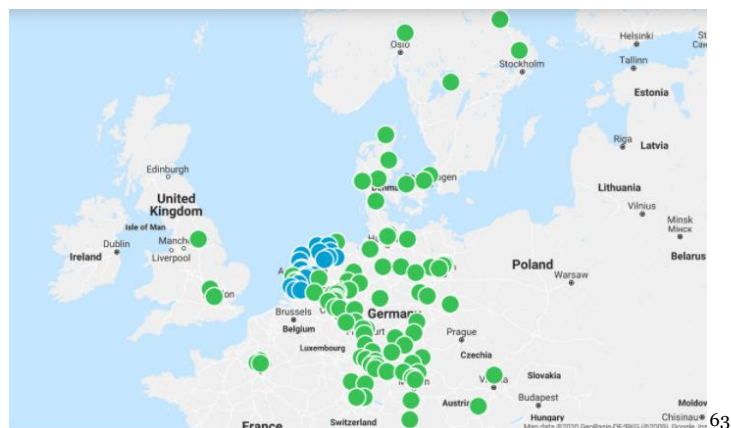
Er zijn verschillende manieren om waterstof te kunnen vervoeren, bijvoorbeeld door middel van gasleidingen. Gasleidingen hebben namelijk slechts enkele aanpassingen nodig om geschikt te zijn voor het vervoeren van waterstof. Als Nederland toch van het gas af wil, waarom zouden we al die prima infrastructuur weggooien? De grotere gasleidingen kunnen prima gebruikt worden om waterstof te vervoeren.

Veel van deze gasleidingen komen uit in de stad Den Helder, wat dit een ideale locatie maakt om waterstof te distribueren. Den Helder lijkt deze rol nu al te omarmen aangezien er ook plannen zijn om een blauwe waterstoffabriek te realiseren. Blauwe waterstof is nog niet volledig klimaatneutraal, maar is zeker een stap in de juiste richting en zal functioneren als transitiebrandstof. Port of Den Helder is druk bezig om deze transitie te stimuleren.⁶²

Echter, er liggen niet overal gasleidingen en op sommige plekken is de aanleg ervan niet mogelijk of gewoon te duur. Dus moet het ook via tankers en boten vervoerd kunnen worden. Hier zijn zelfs al enkele voorbeelden van, zo ging in 2018 in Japan de eerste waterstofanker ter wereld te water om waterstof vanuit Australië naar Japan te vervoeren. Deze tanker vaart helaas nog op diesel en is dus niet bepaald duurzaam.

5.4.4 Waterstoftankstations

Het eindstation van deze gasleidingen en of tankers is een waterstoftankstation, in dit geval, een waterstoftankstation in een jachthaven. Waterstoftankstations voor boten bestaan nog niet, voor auto's zijn ze er al wel. Echter, in Nederland zijn er maar 5. Deze staan in Delfzijl, Arnhem, Rhon, Den Haag en Helmond. Duitsland is momenteel het meest vooruitstrevend.



⁶⁰ (H2platform, 2019)

⁶¹ Zie hoofdstuk 2.2.3

⁶² (Port of Den Helder, sd)

⁶³ (Zerauto, 2020)

Locaties van waterstoftankstations in West-Europa (groen is gerealiseerd, blauw is gepland)

De reden dat er nog maar zo weinig waterstoftankstations gerealiseerd zijn is het feit dat waterstof een enorm lage dichtheid heeft. Efficiënte opslag kan alleen onder hoge druk, het vergroten van deze tanks is enorm duur en vaak zelfs niet mogelijk aangezien we geen machines hebben die de benodigde grootte koolstofvezel kan produceren. Nog een probleem is dat elke keer als er wordt getankt zal de druk in de waterstoftank afnemen. Voordat er nog een keer getankt kan worden moet deze weer worden opgevoerd, wat veel tijd en energie kost.

Maar dit profielwerkstuk draait om pleziervaart, niet om wegverkeer. Dus hoe moet het daar gebeuren? Op dit moment zijn er twee opties om diesel te tanken in plezierhavens: bij een tankstation en door te bunkeren (tanken) bij een bunkerboot. Waterstoftankstations zijn duur en daardoor eigenlijk alleen rendabel in de grotere havens. Volgens het CBS waren er in 2018 50 jachthavens met een ligcapaciteit van meer dan 350.⁶⁴ In de wat kleinere havens zouden alleen bunkerboten met waterstof aan boord voldoende zijn. In de kleinsten van de kleinsten zullen dezen ook niet aanwezig zijn en moeten de eigenaars van de boten zelf voor waterstof zorgen. Hiervoor moet waterstof particulier te verkrijgen zijn.

Jachthavens	Totaal jachthavens (aantal)
Totaal jachthavens	405
Jachthavens met 50 ligplaatsen of minder	140
Jachthavens met 51-100 ligplaatsen	85
Jachthavens met 101-200 ligplaatsen	80
Jachthavens met 201-350 ligplaatsen	45
Jachthavens met 351-500 ligplaatsen	30
Jachthavens met 501 ligplaatsen of meer	20

Bron: CBS.

Jachthavens in Nederland 2018

⁶⁴ (CBS, 2020)

5.5 CONCLUSIE

Hoe kan waterstof worden gebruikt om de Nederlandse pleziervaart te verduurzamen?

Nederland heeft een zeer grote pleziervaart, in 2015 waren er ongeveer 407.800 pleziervaartuigen die met enige regelmaat gebruikt werden. Hiervan voer de overgrote meerderheid op diesel, met de uitstoot van broeikasgassen tot gevolg. Waterstof zou een oplossing kunnen bieden aangezien het gemakkelijk te tanken is en een hoge energiedichtheid heeft. Om dit te bereiken zullen bestaande boten moeten worden omgebouwd, hierbij worden de dieselmotor en brandstoftank vervangen door een elektromotor, brandstofcel, accu en waterstoftank. De waterstoftankstations zullen op gunstige locaties geplaatst moeten worden, dus eerst in de grote jachthavens.



CONCLUSIE

De hoofdvraag was:

“Hoe kan een zonneboot worden omgebouwd tot waterstofboot en kan waterstof gebruikt worden om de pleziervaart in Nederland te verduurzamen?”

Onze hypothese was:

Wij denken dat het mogelijk is om onze zonneboot om te bouwen tot waterstofboot. Dit wordt bereikt door een brandstofcel en een waterstoftank toe te voegen aan het systeem. Door deze aanpassing zal de actieradius van de boot toenemen. Waterstof kan worden gebruikt om de Nederlandse pleziervaart te verduurzamen door schepen om te bouwen tot waterstofboot en een waterstofnetwerk aan te leggen dat de waterstof vervoert van de productielocaties naar de boten.

Onze conclusie is dat:

Een zonneboot bouw je vooral door met een team veel te experimenteren. Niemand in het team had ooit een boot gebouwd, sponsors gezocht of een elektrisch systeem in elkaar gezet. Er werd hout bewerkt, epoxy gebruikt, met glasvezel gewerkt en een elektrisch systeem gemaakt. Voor het project werden veel sponsors gezocht en promotie gemaakt. De schoolsluiting tijdens de coronacrisis leverde uitdagingen op voor het bouwproces. Uiteindelijk eindigde het Solar Team Lyceum aan Zee op de vijfde plek tijdens de Young Solar Challenge 2020. Het was een geweldig project!

Waterstof kan op verschillende manieren geproduceerd worden, de duurzaamste manier is elektrolyse met duurzaam opgewekte elektriciteit. Hierbij wordt water gesplitst in waterstof en zuurstof, waarna de waterstof onder hoge druk (tot 700 bar) in een tank wordt opgeslagen. Vervolgens kan de waterstof door een brandstofcel worden omgezet in elektrische energie, die gebruikt kan worden voor een elektromotor. Het voordeel van waterstof is dat het licht is, makkelijk getransporteerd en snel getankt kan worden.

Het nadeel van een zonneboot is dat er zonlicht nodig is om te varen en de motor vaak meer energie verbruikt dan de zonnepanelen opwekken. Er zijn hierom accu's aan boord, maar deze zijn erg zwaar en hebben een lange laadtijd. De oplossing werd gevonden in waterstof. Om kennis op te doen zijn wij bij Team Ecorunner Delft en Deoboat in Rotterdam langsgegaan. Er werd besloten een waterstoftank en brandstofcel in te bouwen, waardoor de actieradius groter is geworden. Het bleek financieel niet haalbaar om de boot 100% op waterstof te laten varen, maar voor dit profielwerkstuk was een hybride systeem een goede oplossing. Het hele project is gefinancierd door Port of Den Helder en andere sponsors.

Het doel van dit profielwerkstuk was om de actieradius van de boot door middel van een brandstofcel en waterstoftank sterk te vergroten en aan te tonen dat het mogelijk is om op waterstof te varen. Tijdens de testvaart op 6 december 2020 is dit bewezen en zijn er metingen gedaan. Met deze gegevens is het gelukt om een formule te maken waarmee het energieverbruik in watt (y) op basis van de snelheid in kilometer per uur (x) kan worden bepaald. Deze formule is essentieel voor het plannen van lange vaartochten. Er zit mogelijk een kleine afwijking in deze formule, veroorzaakt door factoren als de windrichting en het gewicht van de bestuurder. Hoewel de maximale snelheid is gedaald door het extra gewicht van de waterstoftank, is aangetoond dat de actieradius is vergroot. Het doel is dus bereikt.

$y = 2,2741x^{2,5314}$ (y= energieverbruik in watt x= snelheid in Km/h)

Nederland heeft een zeer grote pleziervaart, in 2015 waren er ongeveer 407.800 pleziervaartuigen die met enige regelmaat gebruikt werden. Hiervan voer de overgrote meerderheid op diesel, met de uitstoot van broeikasgassen tot gevolg. Waterstof zou een oplossing kunnen bieden aangezien het gemakkelijk te tanken is en een hoge energiedichtheid heeft. Om dit te bereiken zullen bestaande boten moeten worden omgebouwd, hierbij worden de dieselmotor en brandstoftank vervangen door een elektromotor, brandstofcel, accu en waterstoftank. De waterstoftankstations zullen op gunstige locaties geplaatst moeten worden, dus eerst in de grote jachthavens.

Hiermee is onze hypothese bewezen.



REFLECTIE

Over het algemeen is dit project enorm goed verlopen. De samenwerking ging erg goed, bij het ombouwen van de boot is er niks fout gegaan en zijn er zelfs extra verbeteringen in de boot toegepast die niet noodzakelijk waren voor dit profielwerkstuk. De door ons gestelde deadline van 6 december is gehaald en de testvaart was succesvol. Het schrijven van het document ging erg soepel door een goede taakverdeling. Telkens als wij bij elkaar kwamen spraken we van een aantal kopjes af wie ze zou schrijven met de afspraak deze bij de volgende bijeenkomst af te hebben. Hoewel dit niet altijd lukte werkte het systeem goed en heeft iedereen uiteindelijk zijn deel gedaan.

Natuurlijk zat het profielwerkstuk niet helemaal zonder problemen. De laatste paar dagen voor de inleverdatum werkte het word document door de grootte ervan en het feit dat er drie mensen tegelijkertijd in aan het schrijven waren niet erg mee. Het is diverse keren nodig geweest om het document naar een eerdere versie terug te zetten omdat de inhoudsopgave alle kanten op ging en typen ging al helemaal langzaam. Verder werkte corona natuurlijk niet mee, hierdoor kon de vaartocht Den Helder-Alkmaar niet op de geplande datum doorgaan.



WOORD VAN DANK

Dit project zou zonder een aantal personen en bedrijven zou dit project nooit mogelijk zijn geweest. Allereerst speciale dank voor Stephan Berendsen, bedankt dat u onze begeleider bent en altijd klaar stond om ons te helpen. Dank aan meneer Vermaas, meneer Twigt en mevrouw Kloppers voor jullie hulp met het bouwen van de boot en de elektronica. Hans van Beekum, Hielke ter Veld, Jeroen Roggeveen, Reinier de Voogd, meneer Rienstra en meneer Mulder bedankt voor jullie steun in ons project.

Natuurlijk willen wij een aantal bedrijven bedanken: Gemeente Den Helder (Peter de Vrij), Bootbokken.nl (Joep v.d. Wielen), Helderse Uitdaging (Cyril Kraak), De Wandelcoach (Jasper Tolhuijs), Directie Materiële Instandhouding (DMI), Prommenz (Robert Bak), Oosterhuis Techniek (Pieter Staats), Bais Tegelwerken, Govers BV (Michel Kruik en Bart Brinkman), Spuiterij Westelaken (Albert v.d. Westelaken), Slot Reclame (Bob Slot) en SolarTurn. Zonder jullie had onze boot nooit gevaren!

Voor de ombouw van de boot tot waterstofboot speciale dank naar de directrice Jacoba Bolderheij en adjunct-directeur Kees Turnhout van Port of Den Helder. Ook dank naar Marcus Rolloos van Deoboat voor alle adviezen en de korting op de materiaalhuur. Bedankt Team Ecorunner Delft dat wij langs mochten komen en in jullie waterstofauto mochten rijden.

We willen de andere leden van het Solar Team Lyceum aan Zee natuurlijk bedanken voor het mooie jaar. Bedankt Finn Braat, Vidhusan Kandiah, Sonny Kloosterman, Olivia Lenselink, Jayde Navis en Thom de Porto! Ook Samuël Witte en Jeroen v.d. Meijden bedankt voor jullie parttime hulp. Wij wensen het nieuwe team veel succes en hopen natuurlijk op een eerste plek tijdens de Young Solar Challenge 2021!

Tenslotte willen wij onze ouders bedanken voor hun mentale support!

Mathijn Brink, Jesper Pijnacker en Jonas Rensmaag



BIBLIOGRAFIE

- Berk, H. V. (2019, Januari 31). *De heilige graal van groen waterstof*. Opgehaald van Milieucafé Tilburg: <https://www.milieucafe.nl/index.php?page=waterstofgas>
- Borden, T. (2020, Februari 10). *Bouwer van Nederlandse waterstofjacht ontkent verkoop aan Bill Gates – zo ziet de conceptversie eruit*. Opgehaald van Business Insider: <https://www.businessinsider.nl/bill-gates-superjacht-waterstof-sinot-show-monaco/>
- Bosma, L. (2017, April 8). *Scheepsweerstand: taaie kost?* Opgehaald van Zeilen - Voor Zeilers, Door Zeilers: <https://www.zeilen.nl/aan-boord/vaartips/voortstuwing/scheepsweerstand/>
- Brink, M., & Rensmaag, J. (2018). *Golfslagenenergie*. Junior College , Natuurkunde. Den Helder: Scholen aan Zee.
- Buisman, J., & Rozendalab, R. (2006, september 12). *Principle and perspectives of hydrogen production through biocatalyzed electrolysis*. Opgehaald van Principle and perspectives of hydrogen production through biocatalyzed electrolysis: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319905003903?casa_token=CflsoIboPwoAAAAA:CfzcFV11nHdqgcfhDxigZK1-wlUBLT7glBsO_yR952XAJZzokjDox8_GplThrTe8bueyurQkf14
- CBS. (2020, februari 24). *Particuliere jachthavens; capaciteit en nevenactiviteiten*. Opgehaald van cbs.nl: <https://www.cbs.nl/nl-nl/cijfers/detail/84133NED?q=jachthavens>
- Deoboot. (N.v.t., N.v.t. N.v.t). *Fuel Cells*. Opgehaald van deoboot.nl: <https://www.deoboot.nl/product-categorie/fuel-cells/>
- Dijke, W. v. (2020, maart 4). *Honderden nieuwe zonneparken: hier komen ze te staan*. Opgehaald van rtlnieuws.nl: <https://www.rtlnieuws.nl/nieuws/nederland/artikel/5044026/zonneparken-energie-groene-stroom-kaart-waar>
- Duin, C. (2019, Mei 29). Schoolleiding in Den Helder grijpt hard in, nu Lyceum aan Zee is teruggevallen naar het predicaat 'zeer zwak'. *Helderse Courant (Noordhollands Dagblad)*. Opgehaald van https://www.noordhollandsdagblad.nl/cnt/dmf20190529_10673164
- Energy Observer. (2021). *Energy Observer*. Opgehaald van <https://www.energy-observer.org/>
- Freriks, K. (2019, Mei 8). Ook alleen nog maar elektrische bootjes in de grachten: 'Voor de elite'. *NRC Handelsblad*. Opgehaald van <https://www.nrc.nl/nieuws/2019/05/08/ook-alleen-nog-maar-elektrische-bootjes-in-de-grachten-voor-de-elite-a3959544>
- Godula-Jopek, A., Jehle, W., & Wellnitz, J. (2012). *Hydrogen Storage Technologies - New Materials, Transport, and Infrastructures*. Deutsche Nationalbibliothek. Weinheim: Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA. Opgehaald van [http://www.iqytechnicalcollege.com/Hydrogen Storage Technologies.pdf](http://www.iqytechnicalcollege.com/Hydrogen%20Storage%20Technologies.pdf)
- Greenpeace. (2015, Juni 3). *transparantie verbetert duurzaamheid biobrandstoffen*. Opgehaald van greenpeace.nl: <https://www.greenpeace.org/nl/klimaatverandering/5515/transparantie-verbetert-duurzaamheid->

biobrandstoffen/?gclid=CjoKCQiAhs79BRDoARIsAC6XpaXIIt_FdjJmNMUOZjPFP173Icf148_SSCghGUm76lqsONGXAslmhCPcaAm4sEALw_wcB

Grundmann, E. (2013, 4 29). *De loodaccu*. Opgehaald van De loodaccu.: <http://www.accuwarenhuis.nl/content/6-de-loodaccu>

H2platform. (2019, November 4). *In beeld: platform bij Scheveningen voor groene waterstof*. Opgehaald van opwegmetwaterstof.nl: <https://opwegmetwaterstof.nl/in-beeld-boorplatform-scheveningen-voor-groene-waterstof/>

Haseli, Y. (2018, 4 7). *Maximum conversion efficiency of hydrogen*. Opgehaald van Maximum conversion efficiency of hydrogen: <https://www.humsterlandenergie.nl/resources/Links-duurzaam/Linkpagina/Maximum-conversion-efficiency-of-hydrogen-fuel-cells.pdf>

Hermann, J. (2012, 4 25). *Why Your Gadgets' Batteries Degrade Over Time*. Opgehaald van Why Your Gadgets' Batteries Degrade Over Time: <https://www.popularmechanics.com/technology/gadgets/how-to/a7432/why-your-gadgets-batteries-degrade-over-time-6705747/>

Huizhi Wanga, J. X. (2017, 5 18). *A review on unitized regenerative fuel cell technologies, part B: unitized*. Opgehaald van A review on unitized regenerative fuel cell technologies, part B: unitized: https://pureapps2.hw.ac.uk/ws/portalfiles/portal/14396216/Manuscript_part_B.pdf

Jager, M. d. (2019, September 30). Voldoende docenten en vertrouwen in elkaar: Scholen aan Zee pakt het anders aan. (H. Faber, Red.) *Helderse Courant (Noordhollands Dagblad)*. Opgehaald van https://www.noordhollandsdagblad.nl/cnt/dmf20190929_107061

Janson, N. (2019, 6 7). *Lees hier alles wat je moet weten over rijden met een waterstofauto*. Opgehaald van Lees hier alles wat je moet weten over rijden met een waterstofauto: <https://zerauto.nl/alles-over-rijden-op-waterstof/#:~:text=Wat%20zijn%20de%20voordelen%20van,te%20worden%20zoals%20een%20laadsessie.>

Kennislink, N. (2013, 3 27). *Kennislink Nemo*. Opgehaald van kennislink Nemo: <https://www.nemokennislink.nl/publicaties/leids-onderzoek-biedt-nieuw-inzicht-in-elektrolyse-van-water/>

Landa, I., & Schouten, J. (2020). *Nova scheikunde 5 VWO*. Den Bosch: Malmberg.

Legius, M. (2018, december 14). *waterstof vraagt kleine aanpassing aardgasnet*. Opgehaald van gawalo.nl: <https://www.gawalo.nl/energie/artikel/2018/12/waterstof-vraagt-kleine-aanpassing-aardgasnet-1016923>

Lenselink, O., & Brink, M. (2020, Maart 31). Solarteam Lyceum aan Zee bouwt verder aan zonneboot. (L. Alma, Interviewer, & R. Boutkan, Redacteur) Den Helder, Nederland. Opgehaald van <https://www.regionoordkop.nl/31/03/2020/solarteam-lyceum-aan-zee-bouwt-verder-aan-zonneboot/>

Lenselink, O., Porto, T. d., Pijnacker, J., & Brink, M. (2019, December 18). Lyceum aan Zee doet mee aan Young Solar Challenge. (T. Faas-Soumeru, Interviewer) Regio Noordkop. LOS Den Helder, Den Helder. Opgehaald van <https://www.regionoordkop.nl/18/12/2019/lyceum-aan-zee-doet-mee-aan-young-solar-challenge/>

- Linde. (2020, 11 25). Brandstofcel . *linde brandstofcel solarteam lyceum aan zee*. lyceum aan zee, Noord-Holland, Nederland.
- Lutsey, N. (2015, 8 14). *The ever-improving efficiency of the diesel engine*. Opgehaald van The ever-improving efficiency of the diesel engine: <https://theicct.org/blogs/staff/ever-improving-efficiency-diesel-engine#:~:text=Modern%20compression%20Dignition%20diesel%20engines,on%202013%E2%80%932014%20certified%20engines>.
- Macdonald, A., & Berry, M. (2000). *Serie: Physics through Hydrogen - Clean Energy for the Future (I), Chemistry through Hydrogen - Clean Energy for the Future (II), Science through Hydrogen - Clean Energy for the Future (III) & Energy through Hydrogen - Research Notes (IV)* (2e (2002) ed., Vol. I, II, III en IV). (B. Cook, Red.) Berlijn, Duitsland: Heliocentris Energiesysteme GmbH & Die Deutsche Bibliothek.
- Manley, P., & Holmes, R. (2011). *Bijbel voor bootonderhoud - Vernieuw, verbeter en repareer je boot met adviezen van experts*. Alkmaar, Noord-Holland, Nederland: De Alk & Heijnen watersport.
- Minh, N. Q. (200, 6 3). *Solid oxide fuel cell technology—features and applications*. Opgehaald van Solid oxide fuel cell technology—features and applications: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/49287940/j.ssi.2004.07.04220161002-18576-ibavti.pdf?1475406990=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DSolid_oxide_fuel_cell_technology_feature.pdf&Expires=1606662220&Signature=TXIQWiyabgR3DwHjFRc~so8IRJ1qp
- Nilesh Ade, B. W. (2019, 12 3). *Intensifying vehicular proton exchange membrane*. Opgehaald van Intensifying vehicular proton exchange membrane.
- NVON-commissie. (2013). *BINAS havo/vwo Informatieboek voor het onderwijs in de natuurwetenschappen* (6e ed.). Groningen, Nederland: Noordhoff Uitgevers bv.
- Optima Batteries. (N.v.t., N.v.t. N.v.t.). *Yellowtop batteries*. Opgehaald van [optimabatteries.com](https://www.optimabatteries.com): <https://www.optimabatteries.com/products/yellowtop>
- Parker, T., & Obeng, L. a. (2020, Juli 1). *Fire Hazard Assessment of Lead-Acid Batteries*. Opgehaald van Fire Hazard Assessment of Lead-Acid Batteries: <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Data-research-and-tools/Hazardous-Materials/Fire-Hazard-Assessment-of-Lead-Acid-Batteries>
- Port of Den Helder. (sd). *Den Helder een ideaal startpunt voor duurzame waterstofproductie*. Opgehaald van portofdenhelder.nl: <https://portofdenhelder.nl/news/den-helder-een-ideaal-startpunt-voor-grootschalige-waterstof-productie>
- Ramsden, T. (2013, 4 1). *An Evaluation of the Total Cost*. Opgehaald van An Evaluation of the Total Cost: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56408.pdf>
- Recycling netwerk Benelux. (sd). *Batterijen*. Opgehaald van recyclingnetwerk.org: <https://recyclingnetwerk.org/visie/batterijen/#vraag3>
- Rolloos, M. (2020, 11 1). *500 Watt Fuel Cell Stack Integrated*. Opgehaald van [Deodrive](https://www.deodrive.nl): <https://www.deodrive.nl/product/500-watt-fuel-cell-stack-integrated/>
- Rolloos, M. (2020, September 17). Gesprek met Marcus Rolloos, de directeur-eigenaar van Deoboot, over waterstof. (M. Brink, J. Rensmaag, & J. Pijnacker, Interviewers) Rotterdam, Nederland.

- Rolloos, M. (2020, 11 1). *Hydrogen Genie*. Opgehaald van Deodrive :
<https://www.deodrive.nl/product/hydrogen-genie/>
- Rolloos, M. (2020, 11 1). *Hymera 200*. Opgehaald van Deodrive:
<https://www.deodrive.nl/product/hymera-200/>
- Rolloos, M. (2020, 11 1). *myH2 900*. Opgehaald van Deodrive:
<https://www.deodrive.nl/product/myh2-900/>
- S. Panero, B. S. (1999, 3 9). *A laboratory-scale lithium battery recycling process*. Opgehaald van A laboratory-scale lithium battery recycling process:
https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/41249281/A_laboratory-scale_lithium_battery_recyc20160114-3111-1xe3i6q.pdf20160115-19908-1gzz7b6.pdf?1452900165=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DA_laboratory_scale_lithium_battery_recyc.pdf&Expires=1
- Slikkendam watersport. (N.v.t., N.v.t. N.v.t.). *Torqueedo Cruise 2.0 RS*. Opgehaald van Slikkendam.nl:
<https://www.slikkendam.nl/product/motoren/torqueedo/cruise/torqueedo-cruise-2-0-rs/>
- T. Niet, S. P.-R. (2002, 1 1). *An assessment of alkaline fuel cell technology*. Opgehaald van An assessment of alkaline fuel cell technology:
https://www.engr.uvic.ca/~ndjilali/Papers/IJHE_McLean%20et%20al_2002.pdf
- Thomas, D. (2019, Juli 26). *5 vragen over waterstof tanken*. Opgehaald van H2platform:
<https://opwegmetwaterstof.nl/wiki/5-vragen-over-waterstof-tanken/#:~:text=Waar%20kan%20ik%20waterstof%20tanken,Schiphol%2C%20Rottterdam%20Airport%20en%20Utrecht.>
- Torqueedo GmbH. (2021). *Cruise 2.0 RS*. Opgehaald van Torqueedo.com:
<https://www.torqueedo.com/en/products/outboards/cruise/cruise-2.0-r/M-1230-00.html>
- Vaartland. (2020, augustus 18). *Wat is lpg (liquified petroleum gas)?* Opgehaald van vaartland.nl: <https://www.vaartland.nl/blog/wat-is-lpg>
- van der Ent, L. (2019, 7 15). *ptindustrieelmanagement* . Opgehaald van www.ptindustrieelmanagement.nl:
https://www.ptindustrieelmanagement.nl/hse/artikel/2019/07/waterstof-grijs-blauw-of-groen-wat-is-het-verschil-1012424?_ga=2.51078505.150790407.1605617867-641019947.1586803393
- Viessmann Belgium. (Onbekend). *Gebruikt in de ruimtevaart en nu in je eigen huis: de geschiedenis van de brandstofcel*. Opgeroepen op Januari 3, 2021, van Alles Over De Brandstofcel:
<https://www.allesoverdebrandstofcel.be/brandstofcel/nieuws/gebruikt-in-de-ruimtevaart-en-nu-in-je-eigen-huis-de-geschiedenis-van-de-brandstofcel>
- voor de wereld van morgen. (2019, augustus 29). *Hoe onduurzaam zijn batterijen?* Opgehaald van voordewereldvanmorgen.nl:
<https://www.voordewereldvanmorgen.nl/artikelen/hoe-onduurzaam-zijn-batterijen#:~:text=Het%20probleem%20met%20de%20winning%20van%20lithium&text=Lithium%20wordt%20gewonnen%20door%20mineraalrijk,afgevoerd%2C%20houd%20je%20lithium%20over.>

- Walle, E. V. (2020, Januari 11). De wereld kan op waterstof rekenen. *NRC Handelsblad*. Opgehaald van <https://www.nrc.nl/nieuws/2020/01/10/de-wereld-kan-op-waterstof-rekenen-a3986468>
- Waterrecreatie Advies BV. (2015). *Actualisatie aantal recreatievaartuigen in Nederland 2005 - 2014*.
- Waterrecreatie advies BV. (2016). *Prognose ontwikkeling recreatievaart in 2030, 2040 en 2050*. Lelystad.
- WaterstofNet Nederland. (sd). *Over waterstof - Wat is waterstof*. Opgehaald van WaterstofNet Nederland: <https://www.waterstofnet.eu/nl/waterstof/wat-is-waterstof>
- Wee, J.-H. (2006, 1 19). *Applications of proton exchange membrane fuel*. Opgehaald van Applications of proton exchange membrane fuel: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.520.6565&rep=rep1&type=pdf>
- Wen-Hong Kao, P. P. (1997, 5 6). *Formation Enhancement of a Lead/Acid Battery Positive Plate*. Opgehaald van Formation Enhancement of a Lead/Acid Battery Positive Plate: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.899.8769&rep=rep1&type=pdf>
- Wijk, A. v., & Hellinga, C. (2018). *Waterstof – de sleutel voor de energietransitie*. TU Delft. Delft: TU Delft Open.
- Young Solar Challenge. (sd). *Young Solar Challenge*. Opgeroepen op November 19, 2020, van Wat is de Young Solar Challenge?: <https://www.youngsolarchallenge.nl/young-solar/over-young-solar>
- Young Solar Challenge, NK Groenleven Zonnebootrace, Solar Sport One en Solar & Energy Boat Challenge. (2019). *Technical Regulations 2019*. Stichting Young Solar. Grou: Young Solar Challenge. Retrieved from <https://www.youngsolarchallenge.nl/site/download/fXaGAaKU8LPu?type=open>
- Zerauto. (2020, april 10). *Waterstof tanken in 2020: zo staat het er wereldwijd voor*. Opgehaald van Zerauto.nl: <https://zerauto.nl/waterstof-tanken-in-2020-zo-staat-het-er-wereldwijd-voor/>

BIJLAGEN

A. LOGBOEK

Datum	Mathijn	Jesper	Jonas	Locatie	Verrichte werkzaamheden	Opmerkingen	Afspraken
9-4-2020	1 uur	1 uur	1 uur	Skype	Onderwerp bedenken.	Zowel via Skype als telefonisch.	Onderwerp voorleggen aan begeleider.
11-4-2020	1 uur	-	-	Thuis	Onderwerp en werkplan indienen bij dhr. Hoogenbosch, Berendsen en Van Beekum.	Goedgekeurd door L. Hoogenbosch op 11 april 2020.	Plan verder uitwerken met hulp van meneer Berendsen.
Zomer-vakantie	5 uur	5 uur	5 uur	Thuis	Inlezen in onderwerp.		
19-8-2020	1,5 uur	1,5 uur	1,5 uur	Mathijn's huis	Demonstratie brandstofcel en brainstormsessie.		
31-8-2020	2 uur	2 uur	2 uur	School	Werkmiddag		
14-9-2020	2 uur	2 uur	2 uur	School	Werkmiddag		
17-09-2020	9 uur	9 uur	9 uur	Rotterdam en Delft	Bezoek aan Marcus Rolloos van Deodrive en Team Ecorunner.	Inclusief 5 uur reistijd waarin werd overlegd over PWS.	Boot afbouwen en daarna contact met Deodrive.
9-11-2020	2 uur	2 uur	n.v.t.	School	Werkmiddag	Jonas zat in quarantaine en kon niet helpen.	
16-11-2020	3 uur	3 uur	2,5 uur	School	Taakverdeling gemaakt en de onderkoppens van de deelvragen gemaakt. Begonnen met schrijven deelvraag 2 en 6.		Morgen verder werken.
17-11-2020	4 uur	4 uur	4 uur	School	Doorgegaan met schrijven deelvraag 2 en 6. Begonnen met schrijven deelvraag 1.		Morgen beginnen elektronica inbouwen.
18-11-2020	0,5 uur	0,5 uur	-	School	Gesprek met Kees Turnhout van Port of Den Helder over sponsoring.	Volgende week vervolgspraak.	Bestanden opsturen.

Profielwerkstuk De Waterstofboot

18-11-2020	3,5 uur	3,5 uur	3,5 uur	School	Schematische tekening gemaakt van elektronisch pakket tot nu toe. Plannen gemaakt voor de combinatie met waterstof.		Brandstofcel en H ₂ -tank komen 25 november.
19-11-2020	2 uur	1 uur	2 uur	School	Werken aan deelvragen 1 en 6. Camera opgehaald		
20-11-2020	-	45 minuten	-	Thuis	Gewerkt aan deelvraag 2.		
21-11-2020	1 uur	-	2 uur	Thuis	Gewerkt aan deelvraag 1 en 6.		
23-11-2020	1,5 uur	-	1,5 uur	School	Werkplaats op orde gebracht.		
24-11-2020		2 uur		Thuis	Gewerkt aan deelvraag 2		
25-11-2020	3 uur	3 uur	3 uur	school	Brandstofcel en waterstoftank ontvangen van Marcus Rolloos. Gewerkt aan boot en deelvragen.		
26-11-2020	2,5 uur	1 uur	2,5 uur	school	Hout gesneden om de brandstofcel stabiel in de boot te laten passen en aan de deelvraag gewerkt. Ook gewerkt aan elektrisch systeem en motorsteun.		
27-11-2020	3,5 uur	3,5 uur	3,5 uur	School	Gewerkt aan elektrisch systeem, sponsoring geregeld met Govers en regenjassen besteld.	Vrijstelling voor LO gekregen. Vidhusan heeft de hele middag meegeholpen.	Regenjassen worden bezorgt op school. Accu's dinsdag ophalen bij Elektrostar
29-11-2020		3,5 uur		Thuis	Gewerkt aan deelvraag 2.		
30-11-2020	2,5 uur	3 uur	3,5 uur	School	Bezig geweest met de installatie van het elektronische systeem.		
1-12-2020	2,5 uur	2,5 uur	2,5 uur	School	In ontvangst nemen van de trailer en inleveren van de		

Profielwerkstuk De Waterstofboot

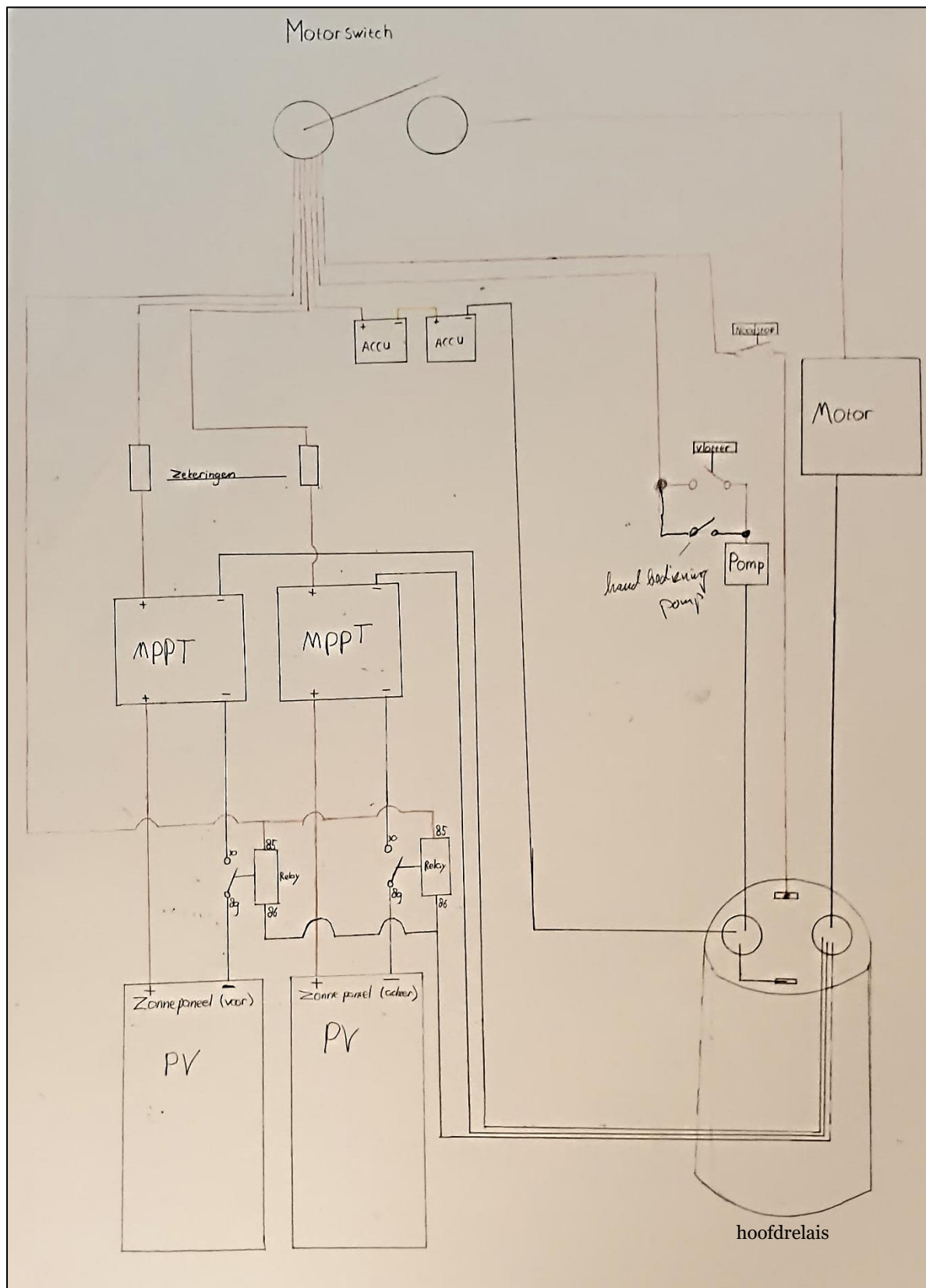
					conceptversie van het pws.		
2-12-2020	2,5 uur	2,5 uur	2,5 uur	School	Installeren elektronisch systeem		
3-12-2020	2,5 uur	2,5 uur	2,5 uur	School	Installeren elektronisch systeem		
4-12-2020	5 uur	6 uur	6 uur	School	Voorbereidingen treffen voor testvaart	Vrijstelling vanaf 10:15.	
6-12-2020	5 uur	5 uur	5 uur	Fort westoever/ Binnenhaven	Testvaren	Marnix Vader's begeleidingsboot	
7-12-2020	1 uur	-	1 uur	School	Werkplaats opruimen		
8-12-2020	1,5 uur	-	1,5 uur	School	Werkplaats opruimen		
9-12-2020	1 uur	2 uur	1 uur	School	Demonstratie voor Jacoba Bolderheij van port of den Helder.		Mevr. Bolderheij PODH-boat begeleiding
15-12-2020	3 uur	3 uur	3 uur	School	Boot kitten, plan maken voor vaartocht en werkplaats opruimen.	Vanaf morgen Harde Lockdown.	
16-12-2020	4 uur	4 uur	4 uur	Bij Mathijn thuis	Geschreven aan profielwerkstuk	Deelvraag 2 en 3 ingedeeld.	
20-12-2020		2,5 uur		Thuis	Puntjes op de i zetten van deelvraag 2.		
20-12-2020	2,5 uur		2,5 uur	Bij Mathijn thuis	Controleren en schrijven aan deelvraag 1 en 5.	Deelvraag 1 en 5 afmaken.	Mathijn maakt opzet deelvraag 3 en 4.
27-12-2020	2 uur			Thuis	Structuur maken deelvraag 3 en 4.		
30-12-2020	3 uur			Thuis	Deelvraag 1 afmaken.		Aankomend weekend schrijfmarathon.
1-1-2021	3 uur	3 uur	3 uur	Bij Mathijn thuis	Schrijfmarathon		
2-1-2021	2 uur	2 uur	2 uur	Thuis	Schrijven		
3-1-2021	6 uur	6 uur	6 uur	Bij Mathijn thuis	Schrijfmarathon		
4-1-2021	10 uur	10 uur	10 uur	Bij Mathijn thuis	Schrijfmarathon	Inleveren	Morgen printen
31-1-2021	5 uur	5 uur	5 uur	Fort Westoever	Testvaart 2 – na inleveren PWS		

Profielwerkstuk De Waterstofboot

Feb. 2021	10 uur	10 uur	10 uur	Thuis en bij Mathijn huis	Herschrijven	Voor pws wedstrijd	
Totaal	122	117,25	116				

Opmerking: de uren die besteedt zijn aan het bouwen van de zonneboot zijn niet meegerekend en niet alle uren zijn bijgehouden.

B. ELEKTRISCH SYSTEEM VAN ZONNEBOOT



65

⁶⁵ Tekening van elektrisch systeem door J.J. Rensmaag (2020) op basis van conceptversie van dhr. Twigt, V. Kandiah, S. Kloosterman e.a. Afbeelding bewerkt en bijgesneden.

⁶⁶ Schema van verbeterd systeem van waterstofboot door M.L.A. Brink, V. Kandiah, J.B. Pijnacker en J.J. Rensmaag, 2021. Het is een versimpelde versie van de werkelijkheid, de zonnepanelen zijn bijvoorbeeld weggelaten.



D. FORMULIER TECHNISCHE KEURING

Name and number of the team:.....

Safety equipment

Is the following safety equipment present, well in reach, available in sufficient numbers and functional:

- | | |
|---|--------|
| 1. towing cable
(minimum length 5 m, minimum diameter 8 mm,
no steel or hard to cut material, storage ready to use) | yes/no |
| 2. orange or red warning flag (minimum size 30 x 30 cm) | yes/no |
| 3. audible means of warning (e.g. horn) | yes/no |
| 4. paddle (minimum blade width 13 cm, minimum length 60 cm) | yes/no |
| 5. boat hook
(min. length 1 m, non-metallic hook, may not be combined with the paddle) | yes/no |
| 6. fire extinguisher (suited for category A fires, min. 1 kg, up to date check) | yes/no |
| 7. marking buoy (present and connected to the vessel) | yes/no |
| 8. automatic bilge pump(s) present and functional | yes/no |
| 9. life jacket (approved and fitting) | yes/no |
| 10. helmet | yes/no |

Pilot

- | | |
|---|---------|
| 1. 16 years of age or older | yes/no |
| 2. able to swim | yes/no |
| 3. mass of the captain |kg |
| 4. if mass of the captain < 60 kg ballast present (in or near the seat) | yes/no |

The boat

- | | |
|--|--------|
| 1. no more than 2 standard solar panels | yes/no |
| 2. no more than 2 12 V Yellow-Top 55Ah batteries | yes/no |
| 3. no other sources of energy onboard the boat | yes/no |
| 4. no modifications to the hull | yes/no |
| 5. standard 2 kW electric outboard motor installed
(no changes to the software of the motor installed, see second page) | yes/no |

Jury member:.....

Signature:..... ⁶⁷

⁶⁷ Origineel ondertekend en verstuurd naar Young Solar Challenge op 3 oktober 2020 door jurylid dhr. Berendsen. Aan alle vereisten was door het Solar Team Lyceum aan Zee 2020 voldaan.

E. RESULTATEN TESTVAART 6 DECEMBER 2020**Jesper:**

Naam schipper:

Jesper

Naam invuller:

Vedhuran

Begin meting:

Einde meting:

Streef vermogen (W)	Gemeten Vermogen (W)	Snelheid (km/h)	Stroom fuelcell (A)	Spanning fuelcell (V)
50				
100				
150				
200				
250			7,8	
300				
350				
400				
450				
500		7,4		
550		8,1	7,9	
600				
650				
700				
750		8,6	8,2	
800				
850				
900				
950				
1000		10	8,2	
1050				
1100		11	8,3	
1150				
1200		11,5	8,2	
1250				
1300		12	7,9	
1350				
1400				
1450				
1500		12,7	8,7	
1550				
1600				
1650				
1700				
1750				
1800				
1850				
1900				
1950				
2000				

2150

15,8

8,7

Opmerkingen:

De spanning fuelcell → 26-28 V
daarom niet ingevuld in tabel

6 december 2020
Fort Westoever - Willemsoord
Den Helder, The Netherlands

Profielwerkstuk De Waterstofboot

Jonas:

Naam schipper: *Jonas*

Naam invuller: *Jesper*

Begin meting:

Einde meting:

Streef vermogen (W)	Gemeten Vermogen (W)	Snelheid (km/h)	Stroom fuelcell (A)	Spanning fuelcell (V)
50	<i>45/55</i>	<i>4,2 3,2</i>		
100	<i>95/105</i>	<i>4,5</i>		
150	<i>146/153</i>	<i>5,3</i>		
200	<i>195/210</i>	<i>6,2</i>		
250	<i>232</i>	<i>6,8</i>		
300		<i>7,0</i>		
350		<i>7,3</i>		
400		<i>8,0</i>		
450		<i>8,2</i>		
500		<i>8,4</i>		
550		<i>8,9</i>		
600		<i>9,4</i>		
650		<i>9,5</i>		
700		<i>9,9</i>		
750		<i>10,1</i>		
800		<i>10,4</i>		
850		<i>10,6</i>		
900		<i>11,1</i>		
950		<i>10,5</i>		
1000		<i>11,0</i>		
1050				
1100				
1150				
1200				
1250				
1300				
1350				
1400				
1450				
1500				
1550				
1600				
1650				
1700				
1750				
1800				
1850				
1900				
1950				
2000				

Opmerkingen:

6 december 2020
Fort Westoever - Willemsoord
Den Helder, The Netherlands

F. KRANTENARTIKELLEN



VAN DEN BORN AUTO'S
 Bedrijfsweg 1a
 1785 AK Den Helder
 Tel. 0223 - 66 99 92
 info@vandenbornautos.nl

AUTO'S
TE KOOP GEVRAAGD
 www.vandenbornautos.nl

Redactie / Advertenties: Broeker Werf 8 - 1721 PC - Broek op Langedijk - Tel.: 0226 - 33 33 11 - Advertentie: denhelderopzondag@rodi.nl - Redactie: redactie.deh@rodi.nl - www.rodi.nl

‘We gaan voor de eeuwige roem’

DEN HELDER – Een team van negen VWO₅ leerlingen van het Lyceum aan Zee doet mee aan de Young Solar Challenge 2020. Een fantastisch project voor jongeren tussen de 14 en 17 jaar. Het doel is om jongeren op een leuke en interactieve manier enthousiast te maken voor techniek. Dit doen zij door middel van het bouwen van een zonneboot waarmee ze hopen dat jaar zullen strijden tegen andere deelnemende scholen.

VWO-LEERLINGEN BOUWEN ZONNEBOOT

“Na een vergadering van de medezeggenschapsraad van het Lyceum vertelde onze directeur Hans van Beekum mij over een zonneboot. Het beroeps-onderwijs had zich ingeschreven voor de Young Solar Challenge 2019 maar hier nooit iets mee gedaan. Meneer van Beekum bood mij dit project aan, waarna ik een team bij elkaar heb gebracht. Uiteindelijk heeft ons team negen leden, waarvan de ene helft zich met de bouw en de andere helft met PR- en sponsorwerving bezig houdt”, legt leerling Mathijn Brink uit.

Team

“Het team bestaat naast mij uit Olivia Lenselink, Jayde Navis, Finn Braat,



De leerlingen van het Solar Team Lyceum aan Zee. (FOTO: AANGELEVERD)

Vidhusan Kandiah, Sonny Kloosterman, Jonas Rensmaag, Jesper Pijnacker en Thom de Porto.”

Voorproefje

Naast een kennismaking met duurzame techniek, is de Young Solar Chal-

lenge een voorproefje van de zonneboottraces op universitair niveau. Mathijn: “Daar doet bijvoorbeeld de TU Delft aan mee. Zij racen zowel in Nederland als in Monaco. Een maand geleden zijn wij bij hen op bezoek geweest om ervaringen uit te wisselen en een kijkje te nemen op de campus.”

selen en een kijkje te nemen op de campus.”

Bouwpakketten

Voor het maken van de boot hebben de leerlingen bouwpakketten gekregen. Deze bouwpakketten zijn ontworpen en worden geleverd door verschillende partners van Young Solar.

Lees verder pagina 20.

Vista Star
 Polderweg 92 • Den Helder
 06 - 519 409 41

Scheffer
 WITGOEDSPECIALIST
 WWW.SCHEFFERWITGOED.NL

GRANDO KEUKENS & BAD
 TWEEDE PAASDAG OPEN
 VAN 11.00 TOT 17.00 U.

VILLA STAR
 www.villastar.nl

Wandelen?

DEN HELDER – Vermijd tijdens de coronacrisis de (paas)drukke. Kies een wandeling waar niet iedereen heen gaat. De druktemeter geeft (per provincie) tien wandelingen die de afgelopen vijf dagen het meest zijn gedownload.

Hiermee hebben wandelaars een indicatie waar ze veel wandelaars kunnen treffen. Ze kunnen dan een andere wandeling of ander wandelgebied kiezen. Zo houden het allemaal langer uit te houden in deze moeilijke tijd. De druktemeter is gebaseerd op meer dan 1 miljoen downloads per jaar, verspreid over heel Nederland en geeft daarmee een betrouwbare indicatie. Dit is één van de tips voor wandelen in tijden van corona. Zie. www.wandelzoekpagina.nl

Promoot uw actie of evenement via Rodi Media
www.rodimedia.nl

Trots van de Koorleider
Runderschnitzels
 4 stuks **795**
 Kijk voor het recept op pagina 9.

ONDERWIJS Leerlingen Lyceum aan Zee varen op waterstof naar de werf en weer terug

Solarboot op waterstof

Het is project waar ze al een jaar lang vol mee aan de slag zijn. Zondagmiddag voegde het Solarteam van Lyceum aan Zee een nieuw hoofdstuk toe aan hun succesverhaal. Hun bootje vaart inmiddels niet alleen op zonne-energie, maar ook op waterstof.



Hans Brandsma
h.brandsma@modulak.nl

Den Helder ■ De boot ging rond half drie te water bij Westoever en voer door de haven langs de flaneerkade naar Willemsoord om vervolgens ongeschonden weer terug te keren bij Westoever.

Mathijn Brink, teamcaptain, projectleider en leerling van 6VWO van het Lyceum aan Zee, noemt het een nieuwe mijlpaal. „Waterstof is de energiebron voor de toekomst en dan vind ik het best wel cool dat een paar leerlingen uit Den Helder het goede voorbeeld kunnen geven en aantonen dat je op waterstof ook kan varen. Hoe makkelijk kan het zijn?”

Het vergde wel de nodige voorbereidingen om de boot om te bouwen.

Brink: „We moesten rekening houden met een hele rits aan veiligheidsmaatregelen met het oog op brandveiligheid, explosiegevaar en de ventilatie van waterstof.”

De vaartocht verliep volgens



De Solarboot glijdt via een geïmproviseerde scheepshelling het water in

FOTO PETER VAN AALST

Brink redelijk soepel. „We zijn in ieder geval wat wijzer geworden en door metingen weten we ook wat we nog kunnen verbeteren. Bij een snelheid van elf kilometer per uur begon de boot te trillen. Dat is natuurlijk niet de bedoeling en dan gaan we proberen aan te passen.” Een ander aspect dat werd beoordeeld was de energieproductie. „We hebben gekeken bij welke snelheden er hoeveel waterstof werd omgezet”, verduidelijkt Brink.

“Best cool dat leerlingen het voorbeeld geven

„Ook dat is voor ons informatie die nuttig is voor de toekomst. En we weten ook wat de topsnelheid momenteel is. Die ligt ergens tussen de vijftien en zestien kilometer per uur.”

Het Solarteam stapte aan de Binnenhaven nog even aan wal. „Een van onze docenten woont daar en hij had warme chocolademelk voor ons gemaakt. Dat was met deze koude weersomstandigheden wel iets waar we even aan toe waren”, aldus Brink,

die samen met zijn ploeggenoten een nieuw toekomstplan zal smeden. Het team van Lyceum aan Zee deed twee maanden geleden met de zelfde boot mee aan de Young Solar Challenge, een landelijke wedstrijd. De scholieren uit Den Helder eindigden op de vijfde plaats.

De opdracht was toen om met een zelf gebouwde boot op zonne-energie een zo groot mogelijke afstand af te leggen.

Eigen boottrailer voor Solar Team dankzij Prommenz



FOTO: HERTIE WILHELM

Het Solar Team van Lyceum aan Zee had een hele concrete vraag aan de Helderse Uitdaging. Ze waren dringend op zoek naar een boottrailer voor hun zonneboot. En daar was ineens Prommenz die te hulp schoot.

"Echt jammer dat de Beursvloer niet door kon gaan," schreef Mathijn Brink, team captain Solar Team Lyceum aan Zee in zijn e-mail aan Cyril Kraak, manager van de Helderse Uitdaging. "Aan gezien de Beursvloer op het Lyceum zou plaatsvinden, zou het voor ons een thuiswedstrijd zijn geweest. Wel tof dat

er toch een matchmaand wordt georganiseerd en dat wij hieraan mee mogen doen. Toen wij ons inschreven voor de Beursvloer hadden wij nog geen concrete vraag en hoopten wij op de Beursvloer met ondernemers in contact te komen. Je weet tenslotte nooit wat er uit zulke gesprekken komt."

Testvaarten maken met de boot
Inmiddels had het team een hele concrete vraag voor de Helderse Uitdaging. Ze waren namelijk dringend op zoek naar een boottrailer voor hun zonneboot. De komende paar weken bouwen zij deze om tot een waterstofboot en willen daarna een aantal testvaarten en een vaartocht (mogelijk Den Helder - Alkmaar) maken. Hiervoor hadden zij een trailer nodig. Mathijn lichtte de aanvraag nog toe: "Op dit moment zouden wij erg blij zijn als wij een trailer een paar weken mogen lenen, maar het volgende Solar Team is op zoek naar een trailer die permanent kan worden gebruikt volgend jaar. Hopelijk is er iemand in Den Helder die een ongebruikte trailer heeft staan of zijn trailer niet gebruikt omdat het vaarseizoen inmiddels voorbij is."

Passie voor techniek

De aanvraag van het Solar Team werd door de Helderse Uitdaging via hun social media kanalen gedeeld. Robert Bak van Prommenz zag de oproep voorbij komen en appie gelijk met Martijn



Nanninga, eigenaar van Prommenz, die de vraag ook net had gezien. Robert: "We zeiden meteen tegen elkaar, hier moeten wij wat mee! We hadden nog een trailer in de loods staan waar we niets meer deden, dus ik heb meteen gemaild dat Prommenz die graag wilde geven aan het Solar Team. Als ingenieursbureau vinden we het te gek om te zien dat de jeugd zich bezig houdt met dit soort projecten. Van Mathijn en zijn teamgenoten kregen we nog een rondleiding in de werkplaats en het is fantastisch om te horen dat ze met zoveel passie en enthousiasme over dit project vertellen. Ik heb ook tegen ze gezegd dat ze altijd contact mogen opnemen met Prommenz als er vragen zijn. We hebben veel kennis in huis en een groot netwerk."

Ook geïnteresseerd in dit super leuke project dat in 2021 weer door een nieuw team opgepakt wordt? De Helderse Uitdaging brengt je graag in contact met de jongeren. Ze vinden het hartstikke leuk om in de werkplaats op het Lyceum aan Zee de boot en de werkplaats te bekijken en over hun project te vertellen!