



Stifting Elektrysk Farre Fryslan



Principia
WB Alumnivereniging UTwente

Innovatieve e-aandrijving voor pleziervaartuigen

Ir. Gert Colenbrander
Ir. Geert Hidding
Ir. Anne F. van der Meer

Maart 2020

Inleiding

De Stifting ElektryskFarre Fryslan (SEFF, zie www.seff.nu) is een onafhankelijke stichting zonder winstoogmerk, met als doel om het elektrisch varen in Friesland te bevorderen. Daartoe is in samenwerking met Principia-UTwente een innovatieve e-aandrijving voor de pleziervaart ontwikkeld, zie Foto 1.

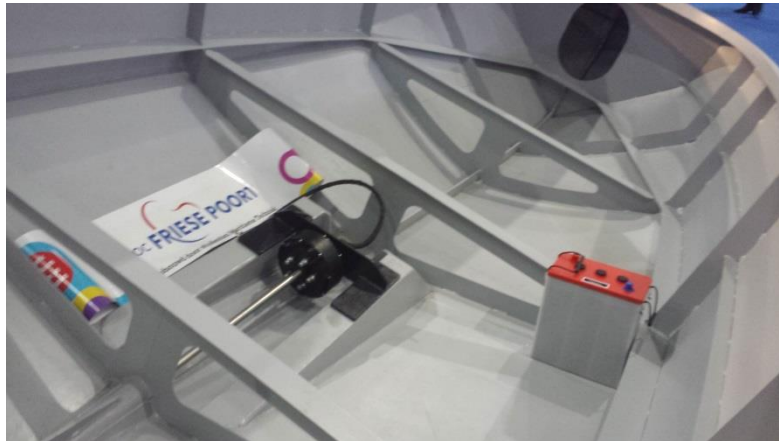


Foto 1. SEFF e-aandrijving voor pleziervaartuigen

Bij het ontwerp van deze SEFF-e-aandrijving is gestreefd naar lage kosten, te bereiken door (a) een eenvoudig en betrouwbaar ontwerp (gebaseerd op robuuste en goedkope onderdelen), en (b) een hoge efficiency, waardoor minder accucapaciteit/goedkoper accupakket) nodig is. Daarmee kan het elektrisch varen prijstechnisch interessanter worden voor het brede middensegment van de gemiddelde “consument” (watersporter).

Samenvatting en conclusies

Samenvatting

Een e-aandrijving kent drie hoofdcomponenten: een accupakket, een elektromotor en een schroef. Als referentie is gekozen voor een e-aandrijving voor de SEFF-MienSkip-sloep. Om een efficiënte en goedkope e-aandrijving te ontwerpen is als eerste gestart met het zoeken naar een efficiënte schroef. Er is gekozen voor een *16" x 14" 2-blads schroef van het Wageningen B type*. Zie hoofdstuk 1.

Als tweede stap is gezocht naar een bij deze schroef passende, goedkope e-motor (inclusief regelaar). Er is gekozen voor een *QS naafmotor van 3 kW*. Zie hoofdstuk 2.

Als derde stap is deze combinatie van schroef en e-motor als prototype ingebouwd in een stalen MienSkip-sloep, en zijn met dit prototype verschillende tests uitgevoerd. Zie hoofdstuk 3.

Vervolgens is gekeken naar de range, waarin de geselecteerde e-motor leverbaar is. Ook de inkooprijzen zijn aangegeven. Bovendien zijn een aantal argumenten/feiten benoemd, die een prijsreducerende werking hebben, zie hoofdstuk 4.

Resultaten en conclusies.

1. Uit de resultaten blijkt dat de rendementen in lichte mate afhankelijk zijn van de vaarsnelheid. De hierna genoemde waardes zijn van toepassing op een vaarsnelheid tussen 7 en 9 km/uur.
2. De benodigde stuwkracht bij gegeven vaarsnelheid is groter dan de gemeten sleepkracht. De sleeptest resultaten zijn daarom niet bruikbaar voor het bepalen van het totaalrendement. In plaats daarvan zijn de stuwkrachten berekend met het SEFF schroefselectieprogramma. Dat impliceert een **berekend schroefrendement** van circa **66%**.
3. Het **totaal-rendement** van de ontworpen/geteste e-aandrijving is circa **56%**.
4. Het **motorrendement** van de e-motor (incl. controller) is circa **85%**.
Dat is vergelijkbaar met de e-motoren bij gangbare e-aandrijvingen.
5. Het maximum toerental van de QS motor is veel lager dan wat gebruikelijk is in gangbare e-aandrijvingen. Daardoor kan een grotere schroef worden toegepast met als gevolg een hoger rendement van de aandrijving. Meer testwerk is vereist om dit te kwantificeren.
6. Deze SEFF e-aandrijving kan **gunstig geprijsd** zijn ten opzichte van bestaande e-aandrijvingen.

Hoofdstuk 1. Selectie schroef.

Voor de stalen MienSkip-sloep (lengte op de waterlijn 6 m, 2200 kg waterverplaatsing) komen in eerste instantie schroeven met een diameter van 12", van 14" en van 16" in aanmerking. Met het SEFF schroefselectie programma hebben we vastgesteld, dat een schroef met een grotere diameter een hoger schroefrendement heeft. Ook is vastgesteld dat een 2-blads schroef een hoger rendement heeft dan een 3-blads schroef. Daarom is in eerste instantie gekozen voor een **16" x 14" 2-blads schroef met een Wageningen B profiel**.

Hoofdstuk 2 Selectie e-motor.

2.1 Motortype

Voor de selectie van een passend e-motortype is uitgegaan van onderstaande criteria.

CRITERIUM	OPTIES		
	Standaard <u>e-motor</u>	speciaal ontwikkelde <u>e-motor</u>	<u>naafmotor</u>
Direct drive/Laag toerental	NEE	?	JA
Gemakkelijk in te bouwen	?	?	JA
Hoge produktieaantallen	JA	NEE	JA

Conclusie: Een **naafmotor** lijkt een goede passende keuze. Hij is geconstrueerd voor hoge koppels bij een laag toerental, en het maximum motorvermogen is leverbaar over een breed toerenbereik. De motor kan daardoor een langzaam draaiende schroef van passende grootte zonder toerentalreductie aandrijven. De motor is laag geprijsd omdat hij in grote aantallen wordt geproduceerd voor een wereldmarkt van e-aangedreven bromfietsen, scooters, motorfietsen, golfkarretjes, etc., etc.,. De motor is robuust geconstrueerd, en heeft een zeer robuuste lager (scooters zijn bestand tegen heftige schokken tijdens het rijden) , zodat een apart stuwdruklager in de schroefas niet meer nodig is (prijsreductie!). Bovendien is de naafmotor compact en gemakkelijk in te bouwen.

2.2 Specifieke motor

Gezocht is naar de beschikbaarheid van laagtoerige naaf-motoren omdat we de uit kosten- en rendementsoverwegingen een toerentalreductie wilden vermijden. De keuze is gevallen op de in China geproduceerde naafmotor **48V 3 kW QS gelijkstroommotor**. Zie foto 2.



Foto 2 – Ingebouwde naafmotor-met accupakket

HOOFDSTUK 3 - Vaartest met 16" x 14" schroef

3.1 MienSkip-sloep

De innovatieve SEFF e-aandrijving is in de zomer van 2019 door de studenten van de Friese Poort ingebouwd in de stalen MienSkip-sloep. Zie foto 3. Deze stalen MienSkip heeft een lengte op de waterlijn van 6 meter en een waterverplaatsing van 2200 kg. De rompvorm is speciaal voor e-varen geconcentreerd (lage vaarweerstand). De rompsnelheid is 11,1 km/uur.

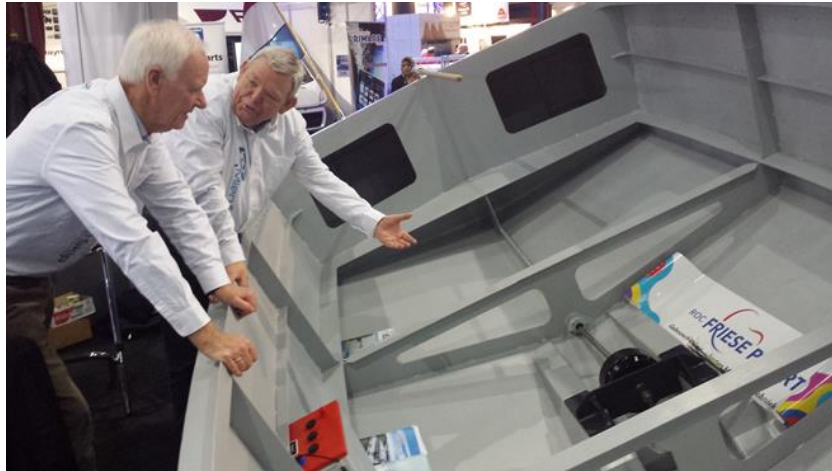
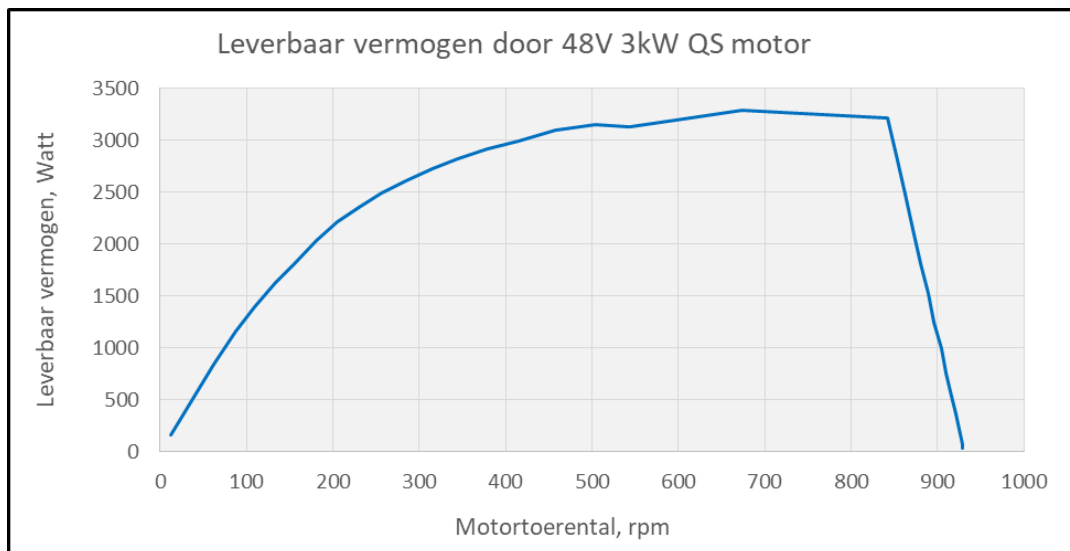


Foto 3 – Ingebouwde naafmotor-aandrijving te zien op Boot Holland 2019

Op 30 oktober en 18 december 2019 zijn op de Houkesloot en De Pollen bij Sneek vaartests uitgevoerd met een stalen MienSkip, eigendom van SEFFF. De boot is voorzien van een 48V 3 kW QS motor. Deze in China geproduceerde motor wordt toegepast als naafmotor in elektrische scooters. Deze motor is voor toepassing in het MienSkip geselecteerd vanwege zijn lage maximum toerental en het feit dat het maximum vermogen door de motor kan worden geleverd over een groot toerenbereik, zoals weergegeven in Figuur 1. Doordat de motor “enkelzijdig” bevestigd is aan het frame/de romp, kan ondanks het feit dat de buitenzijde draait, eenvoudig de koppeling naar de schroefas gerealiseerd worden.



Figuur 1 – Leverbaar motorvermogen

3.2 Schroefkeuze

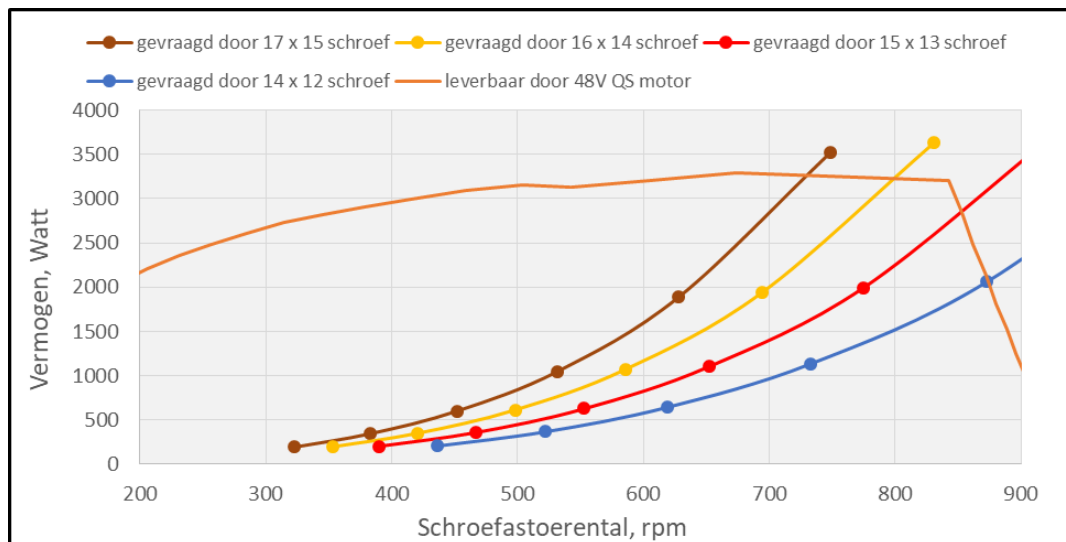
Met het SEFF schroefselectieprogramma kan worden berekend welk vermogen door een gegeven schroef wordt gevraagd bij gegeven toerental en vaarsnelheid en welke stuwkracht wordt geleverd bij die condities. Zie Figuur 2. Deze rekenmethode geeft de resultaten weer van uitgebreide proeven die bij het Marin zijn gedaan met schroeven van het “Wageningen B” type in een watergoot zonder de aanwezigheid van een scheepsromp. De rekenresultaten zijn daarom van toepassing op zogenaamde open water condities en wijken af van de resultaten die gehaald worden met een schroef die een boot aandrijft.

Open water rendement Wageningen B-Serie schroeven		
Schroef diameter D	16	inch = 0.41 m
Spoed P	14	inch = 0.36 m
Blad oppervlakte verhouding B.A.R.	0.3	(0.30 - 1.05)
Aantal schroefbladen z	2	(2 - 7)
Spoed-diameter verhouding P/D	0.88	(0.5 - 1.4)
Vaarsnelheid U_A	8	km/u = 2.2 m/s
Schroefastoterental	610	rpm = 10.2 rps
Advance coefficient $J = U_A / (nD)$	0.538	(< 1.4 SI eenheden)
Stuwkracht coefficient K_T	0.154	
Koppel coefficient K_Q	0.020	
Stuwkracht T	434	N
Koppel Q	22.7	Nm
Opgenomen vermogen	1451	W
Schroefrendement η	66.5%	
Ref: KT, KQ and Efficiency Curves for the Wageningen B-Series Propellers		
Report # 237 Dept. of Naval Architecture and Marine Engineering, The University of Michigan, 1981		
Data invoer alleen mogelijk in geel gemarkeerde cellen		

Figuur 2 - Rekenresultaten 16" x 14" 2-blads schroef (SEFF schroefselectieprogramma)

Figuur 3 geeft resultaten weer van berekeningen aan drie verschillende schroeven. Deze Figuur geeft ook het maximum vermogen weer dat geleverd kan worden door de toegepaste 48V 3kW QS motor. Deze motor kan een maximum vermogen van 3.2 kW leveren bij een toerental tussen 500 en 850 rpm. Figuur 3 laat zien dat bij het maximum motortoterental van iets meer dan 800 rpm de schroeven met een diameter van 14" en 15" het door deze schroeven gevraagde vermogen veel lager is dan het vermogen dat door de motor te leveren is. Er is daarom gekozen voor een schroef met een diameter van 16".

De keuze voor een 2-blads schroef is gemaakt vanwege het feit dat uit de MARIN tests is gebleken dat de 2-blads Wageningen B schroeven een hoger rendement hebben dan de 3-blads schroeven met dezelfde diameter.

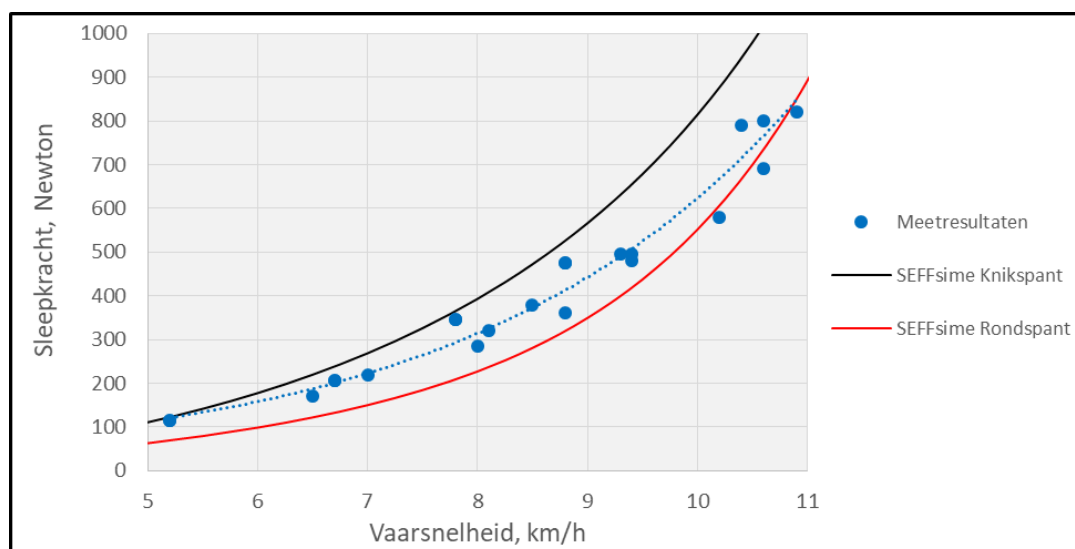


Figuur 3 – Gevraagd vermogen voor verschillende schroeven

Uit berekeningen met het schroevenselectieprogramma blijkt dat een spoed van 14" in combinatie met een schroef diameter van 16" het hoogste schroefrendement levert bij de gekozen kruissnelheid van 8 km/h (70% van de rompsnelheid) van het MienSkip. De 16" x 14" 2-blads schroef van het stalen MienSkip is van het Wageningen B type, heeft een B.A.R. (Blade Area Ratio) van 30% en is geleverd door Exalto.

3.3 Sleetest resultaten

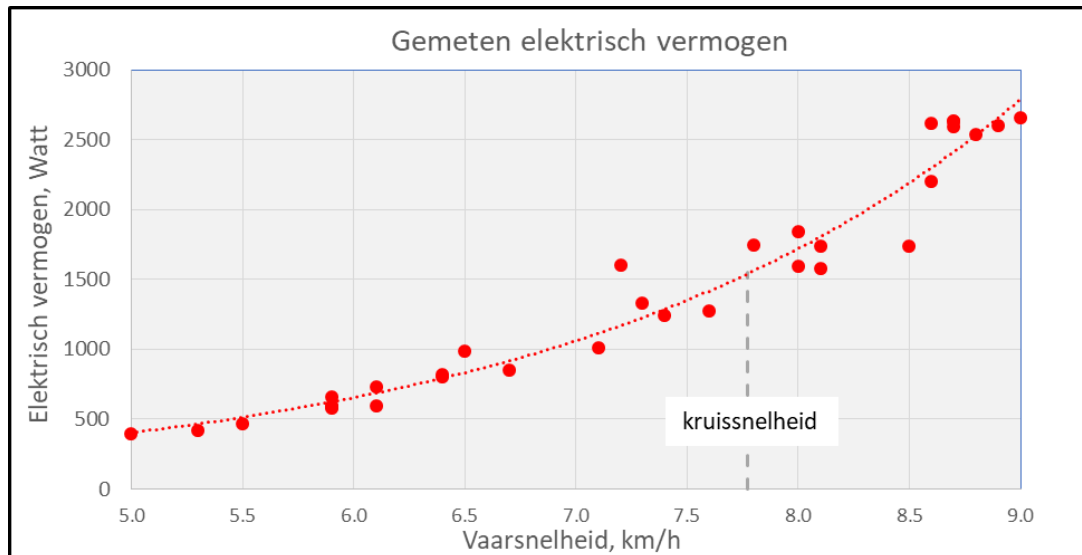
Voordat de vaartests op 30 oktober zijn uitgevoerd is de schroef van het MienSkip verwijderd. De sleeptests zijn uitgevoerd bij een lage windsnelheid zodat de gemeten sleepkracht niet significant afhankelijk is van de windhoek met de vaarrichting. Figuur 4 geeft de gemeten sleepkracht weer als functie van de (met GPS gemeten) vaarsnelheid. Figuur 4 toont ook de resultaten van berekeningen met SEFFsim voor een vaarklare waterverplaatsing van 2600 kg. De meetresultaten liggen tussen de berekende resultaten voor de knikspant en de rondspant romp.



Figuur 4 - Sleepkrachtmetingen

3.4 Resultaten vermogensmetingen

Tijdens de testvaart op 18 december is bij verschillende vaarsnelheden het schroefastoterental gemeten evenals de accuspanning en de door de accu geleverde stroom. Het product van spanning en stroom geeft het door de accu geleverde elektrische vermogen. In Figuur 5 is het gemeten elektrische vermogen weergegeven als functie van de vaarsnelheid.



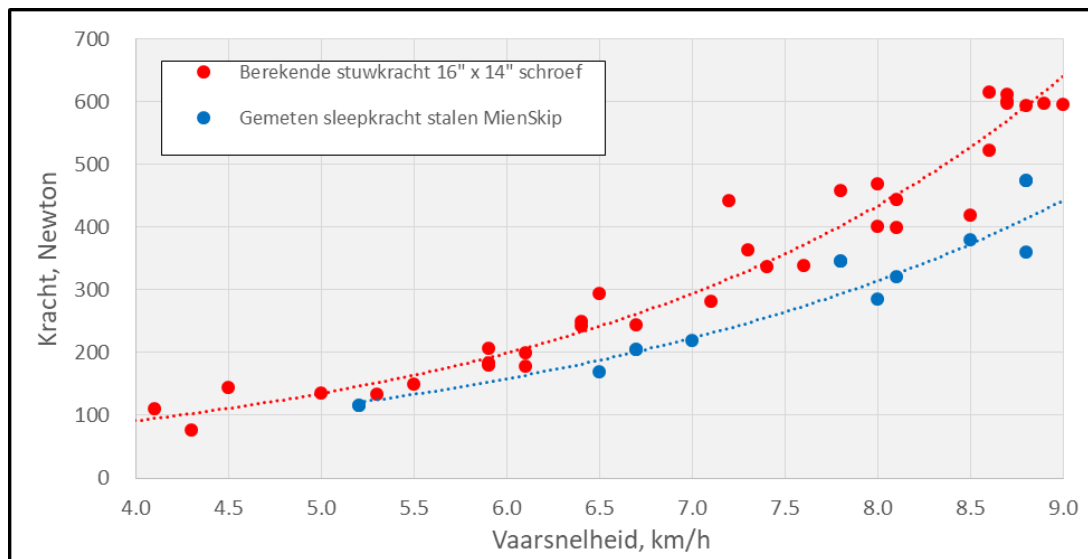
Figuur 5 – Door de accu geleverd elektrisch vermogen

3.5 Rendementen van de componenten van de aandrijflijn

Voor batterij-elektrisch aangedreven boten is het van groot belang dat de aandrijving een hoog rendement heeft. Bij een hoog totaalrendement kan er lang en ver op de beschikbare accucapaciteit worden gevaren. Het totaalrendement is het product van het motorrendement en het schroefrendement. Het schroefrendement wordt berekend door het netto aandrijfvermogen (het product van de vaarweerstand en de vaarsnelheid) te delen door het vermogen dat aan de schroefas wordt geleverd (het asvermogen: product van koppel en toerental).

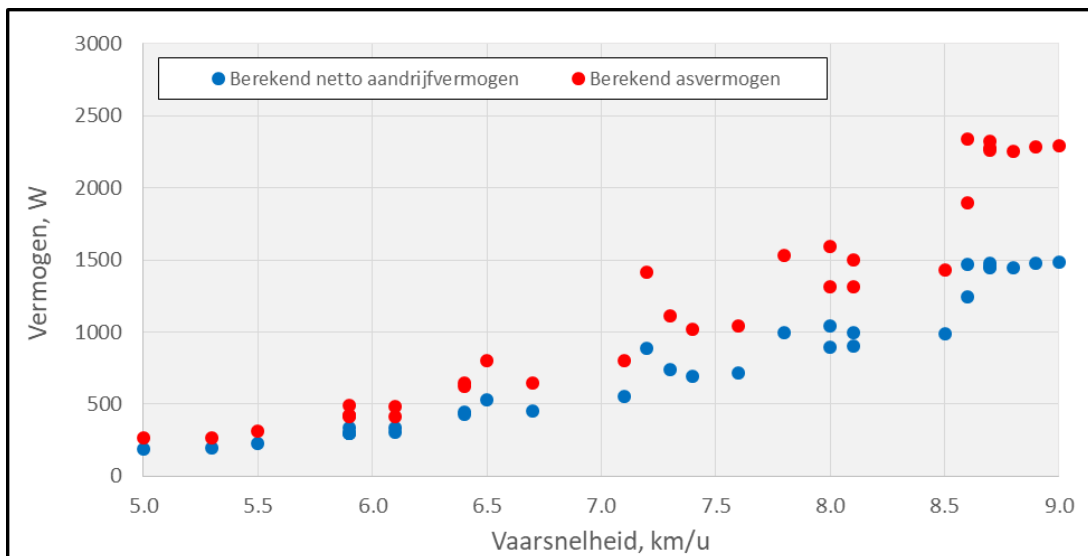
De vakliteratuur vermeldt dat de vaarweerstand van een door een schroef aangedreven romp groter is dan die van een kale romp. Dat betekent dat het gebruik van de gemeten sleepkracht (zie Figuur 4) resulteert in te lage waarden van het netto aandrijfvermogen. Om het netto aandrijfvermogen op de juiste wijze te kunnen bepalen is het noodzakelijk om de stuwkracht van de schroef rechtstreeks te meten tijdens de vaart. SEFFF is op het moment van het schrijven van dit rapport voorbereidingen aan het treffen om dit voor het stalen MienSkip te realiseren.

Omdat gemeten stuwkrachtwaarden niet beschikbaar zijn wordt in het navolgende de stuwkracht berekend met het SEFFF schroefenselectieprogramma (zie Figuur 2). Daarnaast wordt ook het asvermogen met dit programma berekend. De gemeten vaarsnelheid en het gemeten schroefastoterental zijn de invoergegevens voor deze berekeningen. Figuur 6 toont de op deze wijze berekende stuwkracht naast de gemeten sleepkracht. De berekende stuwkracht waarden zijn aanzienlijk hoger dan de gemeten waarden van de sleepkracht. Na het beschikbaar komen van de resultaten van directe stuwkracht metingen zullen de berekeningen gevalideerd kunnen worden.



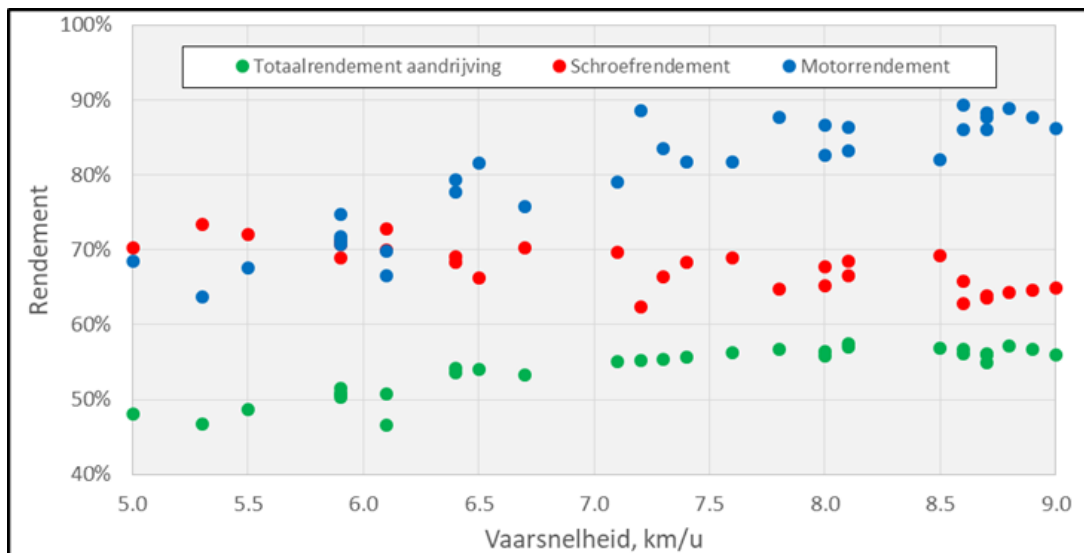
Figuur 6 – Berekende stuwkracht en gemeten sleepkracht

Met het SEFFF schroefselectieprogramma zijn het netto aandrijfvermogen en het asvermogen berekend. De gemeten vaarsnelheid en schroefastoterental zijn hiervoor de invoergegevens. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 7.



Figuur 7 – Berekend asvermogen en netto aandrijfvermogen

Het totaalrendement wordt berekend door het netto aandrijfvermogen te delen door het elektrisch vermogen, het schroefrendement wordt berekend door het netto aandrijfvermogen te delen door het asvermogen en het motorrendement wordt berekend door het totaalrendement te delen door het schroefrendement. De aldus berekende rendementen zijn weergegeven in Figuur 8.



Figuur 8 – Rendementen SEFF e-aandrijving

Figuur 8 laat zien dat bij vaarsnelheden boven 7 km/uur een totaalrendement van circa 56% is gevonden, een schroefrendement van circa 67% en een motorrendement van circa 85%. Dit motorrendement komt overeen met het maximum door de fabrikant opgegeven motorrendement van 84% bij 500 rpm, en 88% bij 700 rpm. Het maximum motorrendement bedraagt volgens de fabrikant 90% bij een motortoerental van 850 rpm.

De in de pleziervaart toegepaste e-motoren opereren over het algemeen op aanzienlijk hogere toerentallen dan het maximum van 850 rpm van de hier toegepaste QS naafmotor. Deze laagtoerige motor maakt het mogelijk om een grote schroef toe te passen, waardoor het rendement van de schroef en daarmee het rendement van de aandrijving toeneemt. Op basis hiervan is de aanname gerechtvaardigd dat deze aandrijving efficiënter is dan die van de meeste momenteel toegepaste aandrijvingen. Directe stuwkrachtmetingen en vergelijkende metingen met schroeven van verschillend ontwerp moeten deze conclusie verder onderbouwen.

3.6 Accupakket

Figuur 5 laat zien dat bij een kruissnelheid van 7,8 km/uur het elektrisch vermogen 1500 W bedraagt. Om 8 uur op kruissnelheid te kunnen varen moet de beschikbare accucapaciteit dus 12 kWh bedragen. Voor loodaccu's betekent dit een C20 capaciteit van 18 kWh. De minimum consumentenprijs voor een tractieaccu pakket met deze capaciteit bedraagt ongeveer € 2200. Voor een Li-ion pakket met een beschikbare capaciteit van 12 kWh moet met een vanaf-prijs van € 8500 gerekend worden.

Hoofdstuk 4. RANGE en PRIJZEN

In dit rapport zijn de onderzoeksresultaten gepresenteerd van een efficiënte e-aandrijflijn voor een stalen MienSkip-sloop. Onderdeel van deze aandrijflijn is een QS naafmotor van 3 kW in combinatie met een Kelly Controller KLS 72130S. Voor grotere boten zal een grotere motor nodig zijn. De QS hubmotor is verkrijgbaar in de vermogens van 1 kW t/m 14 kW. De prijzen zijn als weergegeven in onderstaande tabel.

RANGE en PRIJZEN									
Vermogen kW	QSmotor			Kelly Controller			Motor+Controller		Opm
	typenr	prijs *)		typenr	prijs *)		prijs *)		
		US \$	euro		US \$	euro	US \$	euro	
1	??	103	93	??	??	??	??	??	a
3	QS 205 50H 3000W 48 V	310	279	KLS 7213S	148	133	458	412	a, b
5	QS 260 V4	381	343	KLS 7250H	350	315	731	658	a, b
12	QS 273 12 kW	1.415	1.274	KLS 96601 8080H	600	540	2.015	1.814	a, b
14	??	1.700	1.530	??	??	??	??	??	
*) excl verzendkosten, excl Btw									

Opmerkingen:

a: zie <https://nl.aliexpress.com/item/33053193597.html?spm=a2g0z.12010612.8148356.5.37ef1f4dGDVDlq>

b: zie

https://nl.aliexpress.com/item/33050820665.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.47a91be9XrwZie&algo_pvid=5c3f7bc8-ccca-4ddc-8dde-05682c36c410&algo_expid=5c3f7bc8-ccca-4ddc-8dde-05682c36c410

SEFF/Principia verwacht, dat de SEFF e-aandrijving in vergelijking met andere e-bootaandrijvingen gunstig geprijsd kan zijn.

- Bovenstaande **inkoopprijzen** kunnen als zeer concurrerend worden beschouwd. We hebben het hier over stuksprizen via Ali-X-press, en we gaan ervan uit dat bij grotere aantallen, rechtstreeks geleverd door de fabrikant, de prijzen aanzienlijk lager zullen liggen. Wij denken dat de 3kW e-motor/controller-combinatie dan ca € 350,- gaat kosten (excl btw, invoerrechten en verzendkosten).
- Een apart stuwdrukklager is niet nodig. Het hoofdlager van de naafmotor dient als **stuwdrukklager**
- De naafmotor is ontworpen voor lage toerentallen. Voor de aandrijving van een efficiënte, langzaam draaiende schroef is **geen toerentalreductie** nodig.
- De naafmotor is zeer robuust gebouwd voor toepassing in een auto- of scooterwiel, voor gebruik in weer en wind, en ook op hobbelige en stoffige wegen. Vaartests met de 3kW-motor hebben uitgewezen dat **waterkoeling niet nodig** is.
- De **inbouwkosten** zullen gezien de eenvoud van de oplossing relatief laag zijn.
- Doordat de efficiency van het totale systeem hoog ligt zal de prijs van het accupakket relatief laag zijn (Het accupakket kost al gauw een bedrag met 3 nullen).

Bijlage 1 – Begrippenlijst

Asvermogen	Watt	het vermogen dat de motor aan de schroefas levert
Elektrisch Vermogen	Watt	het door de accu geleverde vermogen
Gevraagd vermogen	Watt	het vermogen dat door de schroef wordt gevraagd om de boot door het water voort te stuw
Leverbaar vermogen	Watt	het vermogen dat de motor kan leveren
Motorrendement	%	het rendement van de e-motor
Netto aandrijfvermogen	Watt	het vermogen, nodig om de boot door het water voort te stuw
Schroefrendement	%	het rendement van de schroef
Sleepkracht	Newton	de kracht die nodig is om de boot door het water te slepen
Stuwkracht	Newton	de kracht die nodig is om de boot door het water voort te stuw
Toerental	rpm	aantal omwentelingen per minuut (motor, schroef)
Totaal rendement	%	het rendement van de complete aandrijving
Vaarsnelheid	km/uur	de vaarsnelheid van de boot

Bijlage 2 – Motortest (testbank)

Voordat de definitieve motorkeuze was gemaakt, zijn tests op een testbank uitgevoerd met een eerste 3 kW QS naafmotor, 72 Volt. Doel was, om een eerste indruk te krijgen van de prestaties van deze naafmotor. Mede naar aanleiding van deze tests is daarop voor inbouw in de MienSkip (prototype) voor dezelfde motor, maar dan voor 48V

- Deze tests zijn gedaan met behulp van Posthuma Batteries in IJlst.
- Tijdens de test bleek dat het maximale toerental van deze 72V motor onder de 600 rpm lag, terwijl de fabrikant 900 rpm had opgegeven
- Er is getest met een geïmproviseerde testopstelling, waarbij de motor werd geremd door een zelf ontworpen bandrem met een leren riem.
- Door slecht functioneren van de bandrem konden geen betrouwbare meetgegevens worden verkregen. Wel kon als eerste indruk worden geconcludeerd, dat de efficiency van motor + regelaar in het werkgebied ca 80% bedraagt.
- Opvallend was de terugval van de voedingsspanning (tot 10%) bij hogere belasting, ook met een accupakket (natte cel) met een overmaat aan accucapaciteit (zoals beschikbaar gesteld door Posthuma Batteries).