



Stifting Elektrysk
en Fossylfrij Farre Fryslân



Principia
WB Alumnivereniging UTwente



Innovatieve e-aandrijving voor pleziervaartuigen

Vaartestresultaten en de daaruit bepaalde rendementen

Eindverslag - Augustus 2021

Principia – Senior Expert Support

Ir. Gert Colenbrander

Ir. Geert Hidding

Ir. Anne F. van der Meer

Ir. Rene Scheltes

Samenvatting

Om het rendement vast te stellen van de door SEFFF/Principia ontwikkelde innovatieve e-aandrijving voor pleziervaartuigen is in augustus 2019 een begin gemaakt met vaartests met het SEFFF stalen MienSkip, waar deze innovatieve e-aandrijving was ingebouwd.

Sleepkracht. De eerste tests bestonden uit *sleeptests*. Daarbij werd de benodigde *sleepkracht* gemeten bij verschillende vaarsnelheden. Die tests werden gevolgd door metingen van het gevraagde *elektrische vermogen*, ook tijdens testvaarten met hetzelfde stalen MienSkip. Uit de meetresultaten werd het totaalrendement van de aandrijving berekend. Die meetresultaten bleken ongeloofwaardig laag te zijn, en wierpen de vraag op of de *sleepkracht* wel voor de rendementsbepaling gebruikt kan worden. Immers... wat je eigenlijk wilt weten is de kracht die nodig is om de boot door het water stuwen, de *stuwkracht*.

Stuwkracht. Om die *stuwkracht* te kunnen meten moest de ophanging van de naafmotor worden gewijzigd en is meetapparatuur geïnstalleerd waarmee zowel de *stuwkracht* als ook het *motorkoppel* tijdens de testvaart kan worden gemeten. Daardoor werd het mogelijk om deze grootheden te vergelijken met de eerder gemeten sleepkrachtwaarden, en ook met op internet te vinden waarden uit MARIN metingen aan Wageningen B schroeven.

Resultaat:

Uit de meetresultaten van de vaartests bleek dat ...

- de vereiste *sleepkracht* voor een gegeven vaarsnelheid aanzienlijk lager ligt dan de vereiste *stuwkracht*. Dit wordt ook vermeld in de vakliteratuur.
- de gemeten *stuwkracht* lager is dan de specificaties van de schroef, die betrekking heeft op “open water” condities. Verklaring: Dit verschil wordt veroorzaakt door een verstoorde waterstroom van het zog van het Mienskip, het zogenaamde “wake-effect” dat verschillend is voor de verschillende romp/schroef combinaties. Dit “wake-effect” wordt vermeld in de vakliteratuur.

Verder bleek dat bij een aanbevolen economische kruissnelheid van 7,8 km/uur het uit de meetresultaten berekende...

- schroefrendement ca 60% bedraagt. Dit is lager dan de 68% volgens de MARIN-specificaties van de Wageningen B schroef. Het verschil wordt toegeschreven aan het “wake-effect”.
- rendement motor plus regelaar ca 80% bedraagt. Dit is in overeenstemming met de motor specificaties
- totaalrendement ca 49% bedraagt

1. Inleiding/voorgeschiedenis

Aanleiding. In opdracht van de “Stifting Elektrysk en Fossylfrij Farre Fryslân” (SEFFF) heeft Principia/SeniorExpertSupport een innovatieve e-aandrijving voor de pleziervaart ontwikkeld. Doelstelling was om een e-aandrijving te ontwikkelen die (a) goedkoper, en (b) efficiënter is dan op de markt verkrijgbare producten. Dit heeft geleid tot de bouw van het zogenaamde “naafmotor”-ontwerp, dat als prototype door studenten van de Friese Poort is ingebouwd in het stalen MienSkip.

Sleeptests. Vervolgens is geprobeerd om door middel van sleeptests en vermogensmetingen vast te stellen in hoeverre de efficiency-doelen in de praktijk haalbaar zijn, zie rapport “Innovatieve e-aandrijving pleziervaartuigen”, maart 2020. Bij deze sleeptests werd geconstateerd dat de kracht waarmee de boot (zonder schroef) door het water wordt gesleept (*sleeppkracht*) kleiner is dan de vereiste *stuwkracht*, berekend met het SEFFF schroevenselectieprogramma. Dit is in overeenstemming met de vermelding in de vakliteratuur 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 *sleeppkracht* 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.*

Stuwkracht-metingen. Principia/SES heeft in de zomer van 2020 meetapparatuur geïnstalleerd om de *stuwkracht* te meten en daarnaast ook het door de motor op de schroefas uitgeoefende *koppel*. Eind 2020 zijn tijdens vaartests metingen uitgevoerd met deze instrumentatie, waarbij ook het door de accu geleverde *elektrische vermogen* werd gemeten. De resultaten zijn gerapporteerd in rapport “Innovatieve e-aandrijving pleziervaartuigen; (2^e) Tussenrapportage dec 2020/jan 2021”. De bij deze vaartests gemeten *stuwkracht* bleek aanzienlijk lager te liggen dan de resultaten van berekeningen met het SEFFF schroevenselectieprogramma. Het vermoeden bestond dat dit veroorzaakt werd door een combinatie van *stuwkracht verlies door het “wake-effect” en een beschadiging van de schroef*. Deze beschadiging werd inderdaad geconstateerd nadat het MienSkip uit het water was gehaald. In het voorjaar van 2021 is de schroef gerepareerd, het onderwaterschip ontdaan van aangroei en zijn de metingen herhaald. Dit rapport bevat de resultaten van de metingen tijdens een vaartest op 2 juni 2021.

2. Meetprogramma en meetapparatuur.

De specificaties van het stalen MienSkip met de innovatieve e-aandrijving zijn hieronder weergegeven.

Bouw: Watersport Twee Provinciën Leeuwarden
Afbouw en inbouw aandrijving: ROC Friese Poort Maritiem Sneek
Lengte over alles: 6,50 m Lengte op de waterlijn: 6 m Waterverplaatsing: ca. 2200 kg
QS naafmotor Maximum output 3287 W bij 673 rpm
Leverbaar vermogen ruim 3 kW tussen 400 en 850 rpm
16" x 14" Wageningen B tweeblads schroef Diameter 406 mm Spoed 356 mm
B.A.R (blade area ratio) 0,3

Tijdens de vaartests zijn *accuspanning*, *stroomsterkte*, *schroefstoerental*, *stuwkracht*, *motorkoppel* en *vaarsnelheid* gemeten *). Om *stuwkracht* en *koppel* te kunnen meten waren aanzienlijke wijzigingen aan de motorophanging noodzakelijk.

Oorspronkelijk was de stilstaande asstomp van de naafmotor ingeklemd in een frame dat bevestigd was aan de romp van het MienSkip. *Koppel* en *stuwkracht* werden opgevangen door dit frame. Daarnaast was een conventioneel, watergesmeerd schroefaslager toegepast.

Om *koppel* en *stuwkracht* te kunnen meten is het frame verwijderd. In plaats daarvan is een vetgesmeerd lager aangebracht op een houten juk, waardoor de schroefas ook op een tweede punt, dicht bij de motor, is gelagerd. Zie Figuur 1. Door deze veranderingen aan de motorophanging kan de schroefas vrijwel wrijvingsloos in axiale richting bewegen bij draaiende motor. De axiale stuwkracht wordt opgevangen door het unster die afgesteund is tegen een dwarsschot van het Mienskip . De *stuwkracht* van de draaiende schroef wordt dus via de schroefas, vervolgens via de motor/asstomp en uiteindelijk via deze unster overgebracht op de boot. Zo kan met deze elektronische unster de *stuwkracht* van de schroef bij draaiende motor worden gemeten.

Door de verwijdering van het ophangframe van de motor gaat het motorhuis meedraaien. Dat wordt tegengegaan door een metalen arm met een klem op de asstomp vast te zetten. De beweging van deze arm wordt voorkomen door een draad (voorzien van een tweede unster) te bevestigen aan het schip. Zie Figuur 1. Deze Figuur toont hoe het *motorkoppel* kan worden bepaald door de kracht, gemeten met een tweede unster, te vermenigvuldigen met de lengte van de metalen arm. (Tijdens de metingen staat de draad haaks op de metalen arm).

De *accuspanning* is gemeten met een multimeter, het *toerental* met een digitale optische toerentalmeter en de *stroomsterkte* met de op het MienSkip geïnstalleerde Samlex X-Pert HV accumonitor. De *vaarsnelheid* is met GPS gemeten.

*) Doordat de motor direct aan de schroefas is gekoppeld, is het motorkoppel gelijk aan het schroefaskoppel.



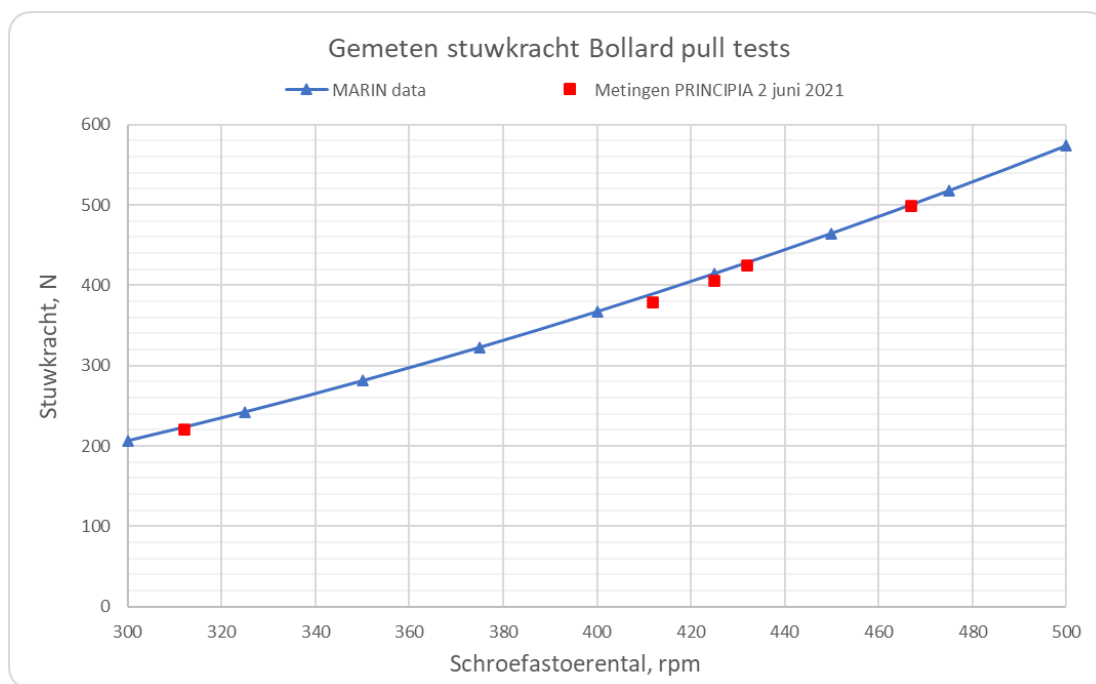
Figuur 1: De innovatieve e-aandrijving in het SEFF stalen MienSkip met de geïnstalleerde meetapparatuur

3. Meetresultaten en de daaruit bepaalde rendementen van de aandrijflijn

Als aanvulling op de vaartests zijn ook metingen uitgevoerd waarbij het MienSkip was vastgelegd aan de wal. Bij deze zogenaamde Bollard pull test worden de stuwkracht en het koppel gemeten bij verschillende toerentallen. Tijdens het varen zijn de stuwkracht en het koppel, naast het toerental, afhankelijk van de vaarsnelheid omdat dit een van de parameters is die het snelheidsveld van het water t.o.v. de schroef beïnvloeden. Bij de Bollard pull tests is dit niet het geval omdat daarbij de vaarsnelheid nul is. Met deze Bollard Pull test wordt daarom de testen van het MARIN zo goed mogelijk benaderd.

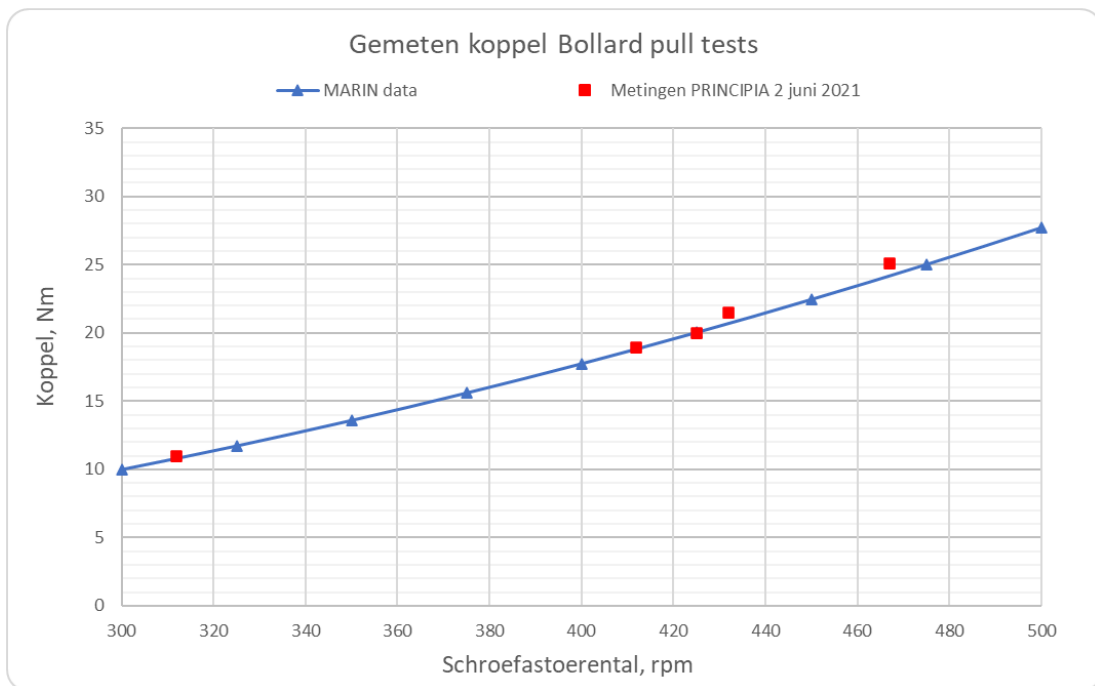
3.1 Bollard pull test resultaten

Figuur 2 geeft de gemeten stuwkracht bij deze Bollard pull test weer, zoals gemeten bij verschillende (schroefas-)toerentallen. Deze Principia meetresultaten komen zeer goed overeen met de MARIN-metresultaten aan een Wageningen B 16"x 14" schroef.



Figuur 2: Bollard Pull – Stuwkracht vs Toerental

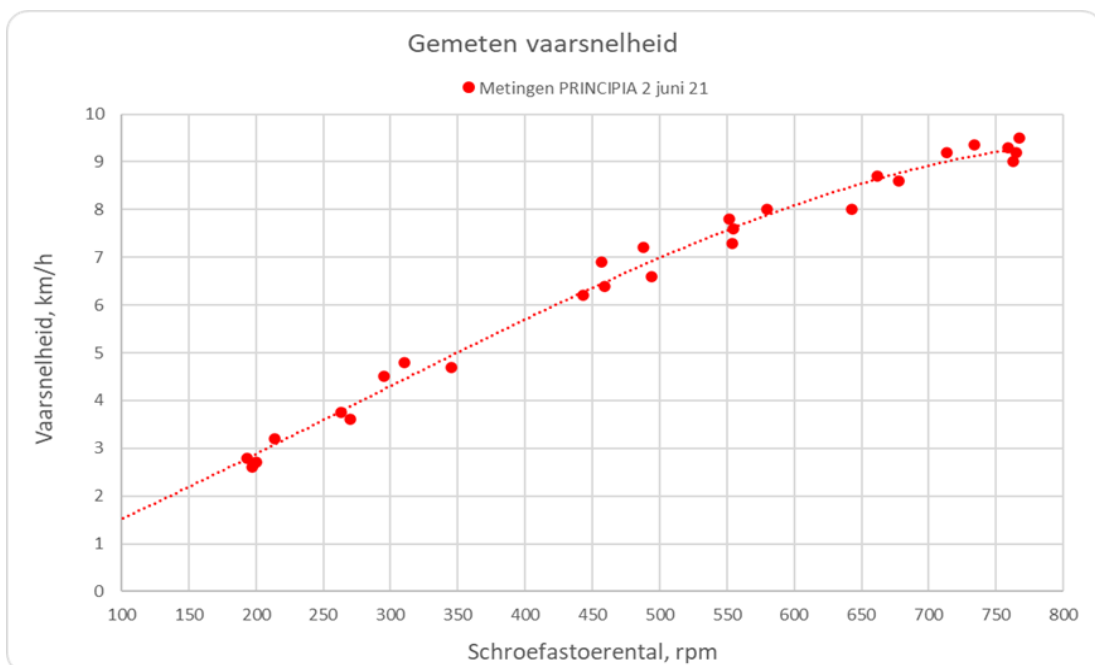
Figuur 3 geeft het gemeten koppel op de schroefas bij deze Bollard-pull test weer. Evenals bij de stuwkracht-metresultaten, komen ook hier de metingen van Principia en MARIN zeer goed overeen. Hieruit mag worden geconcludeerd dat reparatie van de schade aan de schroef van het MienSkip succesvol is uitgevoerd en dat de door ons aangebrachte meetopstelling correct meet.



Figuur 3: Bollard Pull – Koppel vs Toerental

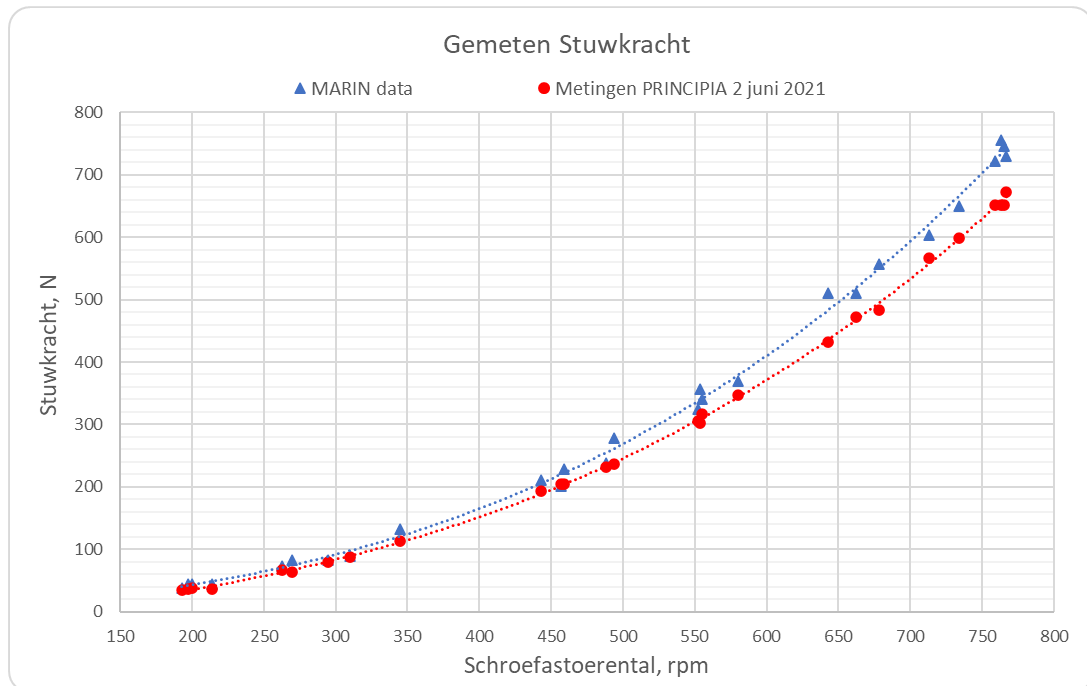
3.2 Vaartest resultaten

Vaarsnelheid. In Figuur 4 is de gemeten vaarsnelheid weergegeven, afhankelijk van het gemeten toerental.



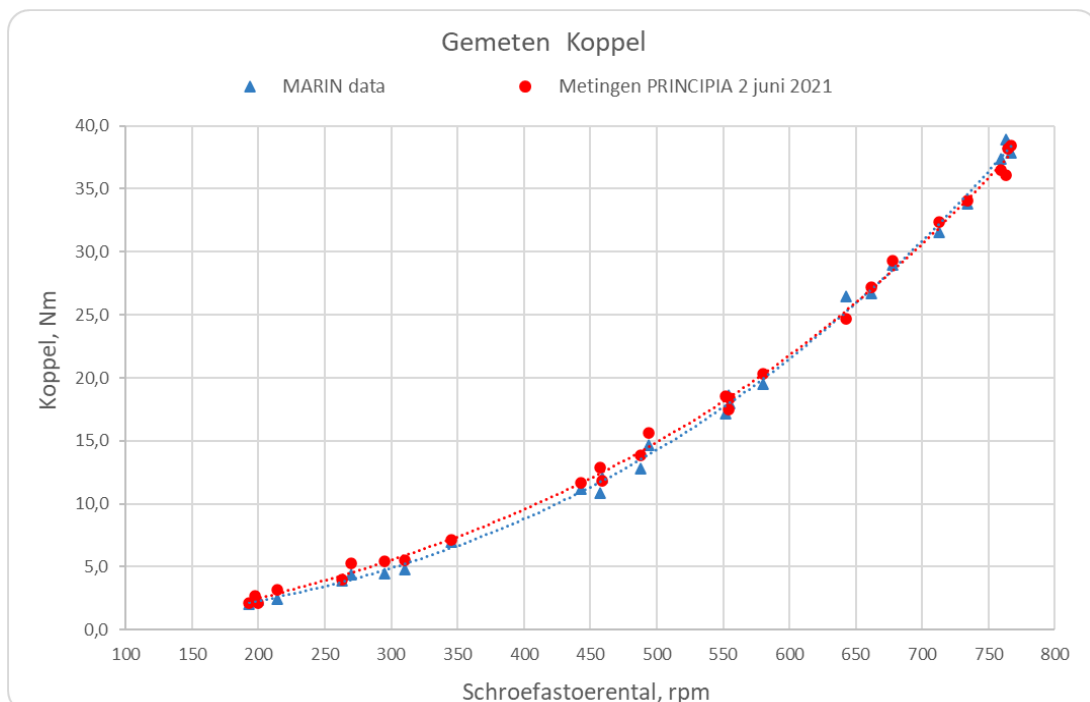
Figuur 4: Vaartest – Vaarsnelheid vs Toerental

Stuwkracht. Figuur 5 geeft de gemeten stuwkracht weer tijdens de vaartest van 2 juni. De met het schroefas-toerental corresponderende vaarsnelheid is weergegeven in Figuur 4. De gemeten stuwkracht waardes zijn ongeveer 10% lager dan gemeten door het MARIN aan de Wageningen B schroef. Het verschil wordt toegeschreven aan het zogenaamde “wake-effect”: de metingen van MARIN zijn relevant voor “open water” condities, terwijl bij de MienSkip vaartest de schroef opereert in het verstoorde water van het zog van het MienSkip.



Figuur 5: Vaartest - Stuwkracht vs Toerental

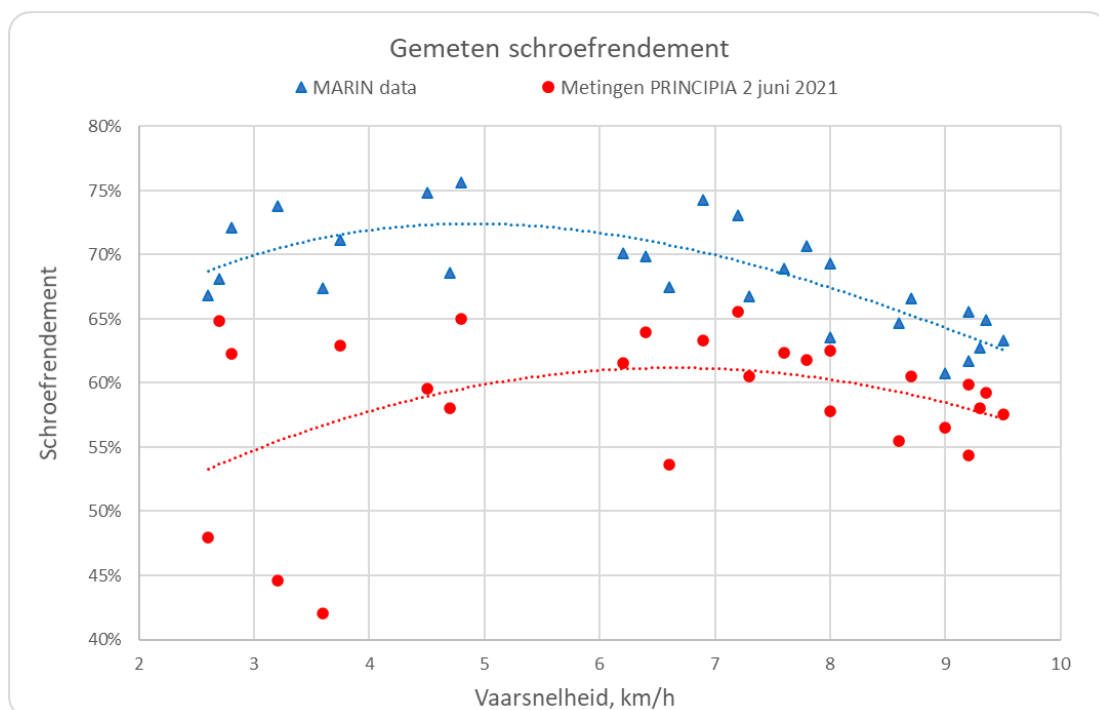
Koppel. Het gemeten koppel is weergegeven in Figuur 6 en komt goed overeen met de MARIN metingen, waaruit geconcludeerd mag worden dat het “wake-effect” geen invloed heeft op het koppel.



Figuur 6: Vaartest – Koppel vs Toerental

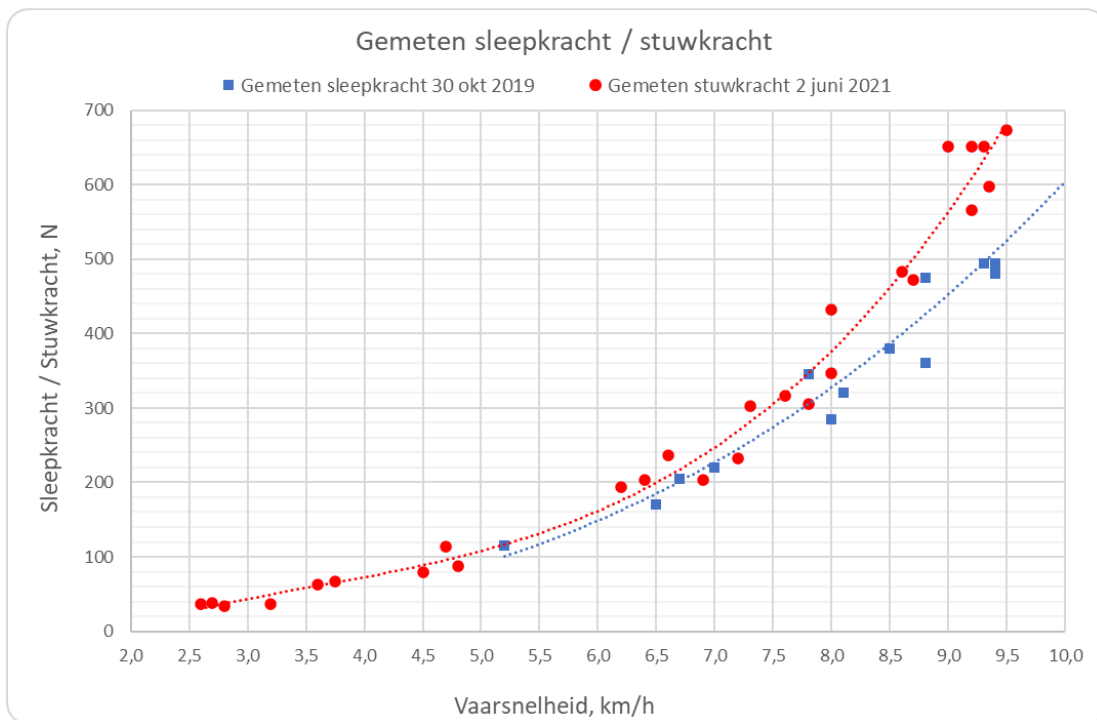
Vermogen. Het aan de schroefas afgegeven vermogen wordt berekend door het gemeten koppel te vermenigvuldigen met de gemeten hoeksnelheid. Dit resulteert in een maximum vermogen aan de schroefas van 3 kW, geheel overeenkomstig de specificatie van de 3000 W QS motor.

Schroefrendement. Het schroefrendement wordt bepaald door het effectieve voortstuwings-vermogen (stuwkracht maal vaarsnelheid) te delen door het aan de schroefas geleverde vermogen (koppel maal hoeksnelheid). De op deze wijze bepaalde schroefrendementen zijn weergegeven in Figuur 7. Bij de aanbevolen kruissnelheid van het MienSkip (7,8 km/h) bedraagt het schroefrendement, berekend uit de Principia metingen, ruim 60%, terwijl dit, op basis van de MARIN metingen, 68% bedraagt. Dit aanzienlijke rendementsverlies schrijven wij toe aan het “wake-effect”, dat een verlies aan stuwkracht veroorzaakt, zoals blijkt uit Figuur 5.



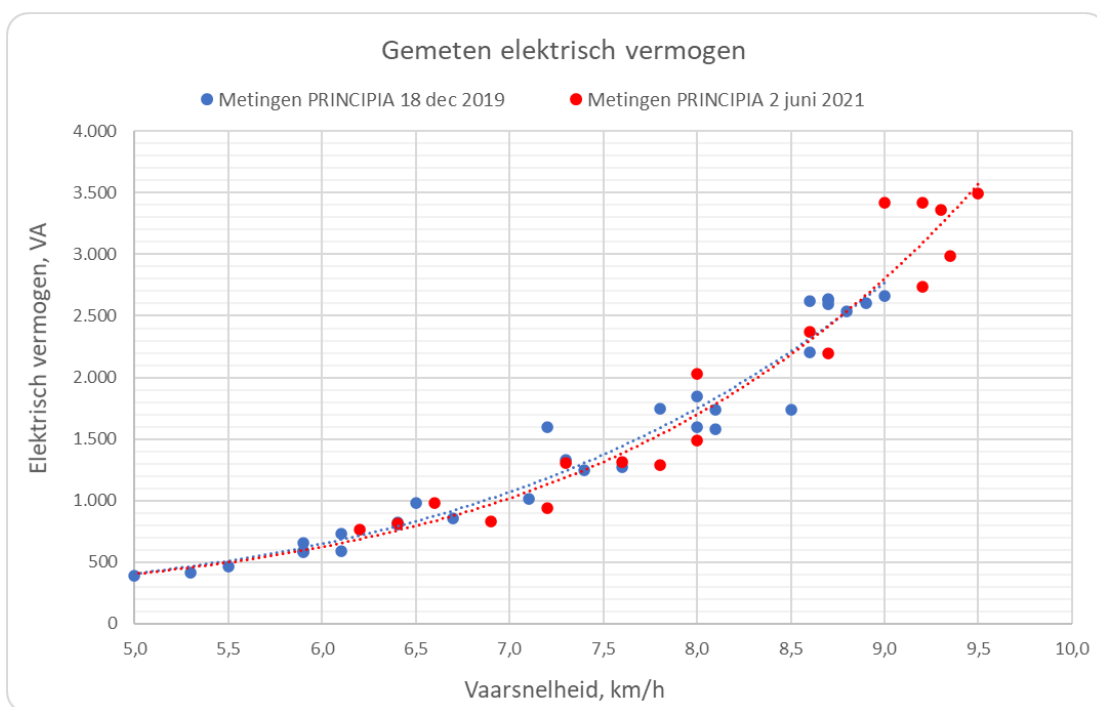
Figuur 7: Vaartest – Schroefrendement vs Vaarsnelheid

Stuwkracht/sleepkracht. De gemeten stuwkracht is in Figuur 8 nogmaals weergegeven, nu naast de sleepkracht die op 30 oktober 2019 is gemeten tijdens sleepproeven met het stalen SEFFF MienSkip. De gemeten stuwkracht waarden zijn aanzienlijk hoger dan de gemeten waarden van de sleepkracht. Dit is in overeenstemming met literatuurgegevens. In het verleden heeft SEFFF schroefrendementen gerapporteerd, gebaseerd op gemeten sleepkrachten, die als gevolg daarvan in te lage waarden van het schroefrendement resulteerden.



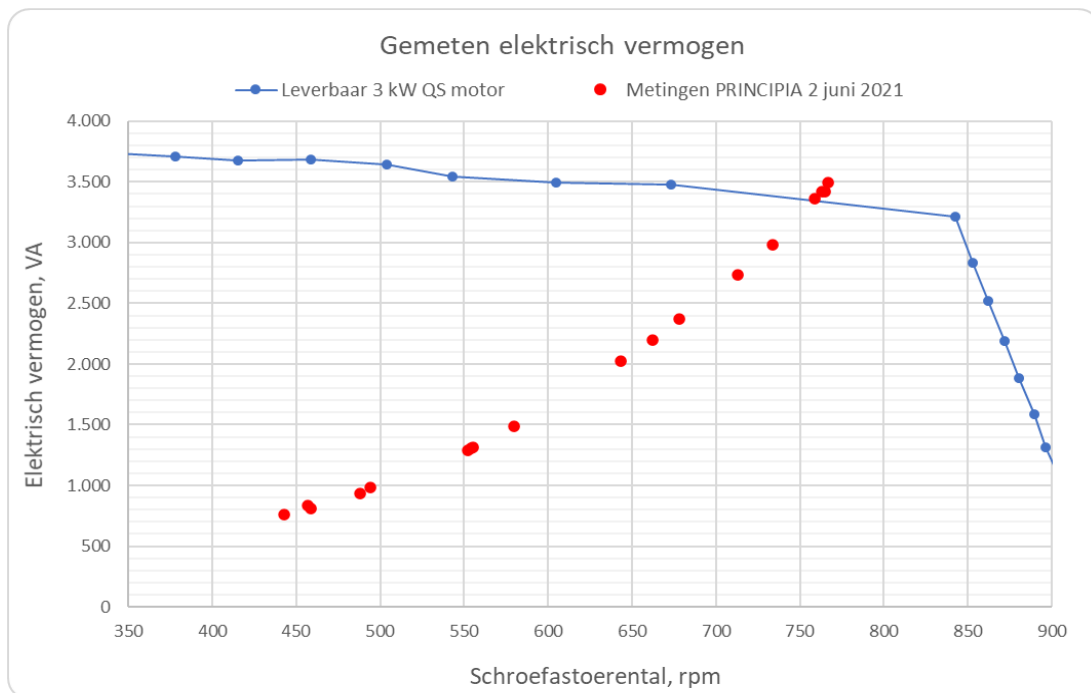
Figuur 8: Vaartest – Sleepkracht en Stuwkracht vs Vaarsnelheid

Elektrisch Vermogen. Figuur 9 toont het gemeten elektrische vermogen bij verschillende vaarsnelheden. Het elektrische vermogen wordt berekend door de gemeten accu spanning te vermenigvuldigen met de gemeten stroomsterkte. Uit Figuur 9 blijkt dat de meetresultaten van 2 juni 2021 (met de gerepareerde schroef) goed overeenkomen met de meetresultaten van 18 december 2019, toen de schroef nog niet beschadigd was. Bij de aanbevolen kruissnelheid van 7,8 km/h voor het MienSkip bedraagt het benodigde elektrische vermogen voor de stalen uitvoering 1600 W.



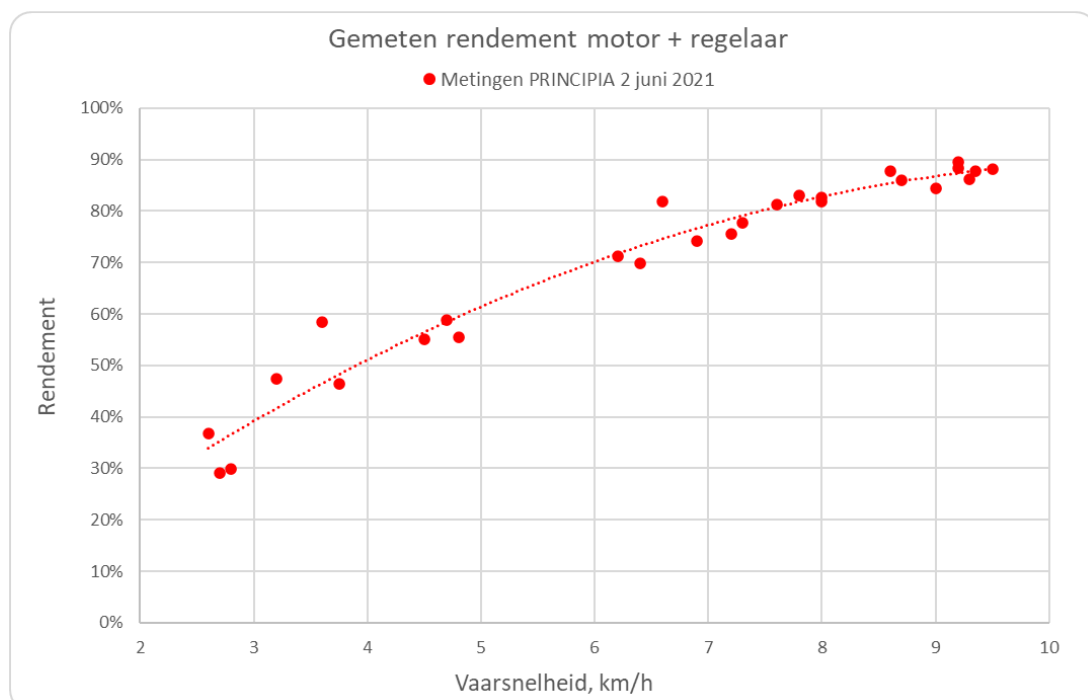
Figuur 9: Vaartest – Elektrisch Vermogen vs Vaarsnelheid

Het gemeten maximum van het elektrische vermogen bedraagt 3500W bij een gemeten maximum vaarsnelheid van 9,5 km/h bij een schroefastoterental van 770 rpm (zie Figuur 4). Dat is geheel in overeenstemming met de motorspecificaties (zie Figuur 10).



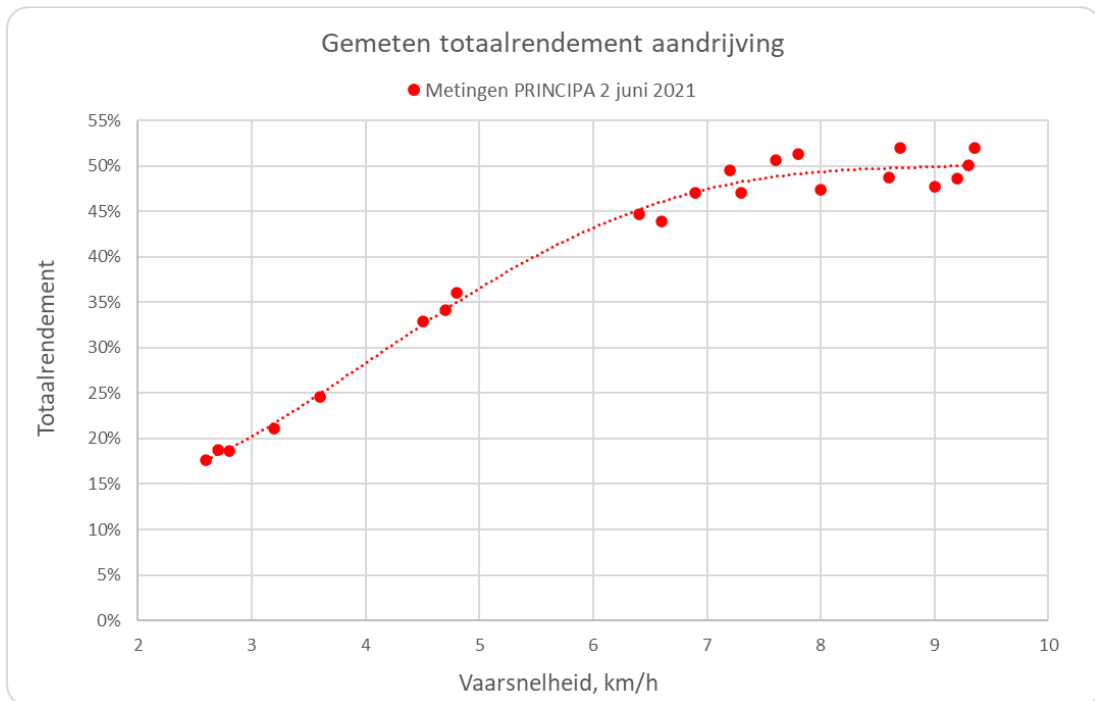
Figuur 10: Vaartest – Elektrisch Vermogen vs Toerental

Rendement motor plus regelaar. Het rendement van motor plus regelaar wordt berekend door het aan de schroef geleverde, gemeten vermogen (koppel maal hoeksnelheid), te delen door het gemeten elektrische vermogen. Het op deze wijze bepaalde rendement van motor plus regelaar is weergegeven in Figuur 11 als functie van de vaarsnelheid. Bij de aanbevolen kruissnelheid van 7,8 km/h bedraagt het gemeten rendement van motor plus regelaar ruim 80%.



Figuur 11: Vaartest – Rendement motor + regelaar vs Vaarsnelheid

Totaalrendement. Het totaalrendement van de aandrijving wordt berekend door het gemeten effectieve voortstuwingsvermogen (stuwkracht maal vaarsnelheid) te delen door het gemeten elektrische vermogen. Figuur 12 toont het resultaat. Bij de aanbevolen kruissnelheid van 7,8 km/h bedraagt het gemeten totaalrendement van de aandrijving 49%.



Figuur 12: Vaartest – Totaal rendement vs vaarsnelheid

4. Conclusies

- De innovatieve e-aandrijving is getest op het SEFFF stalen MienSkip, voorzien van een 3 kW QS naafmotor en een tweeblads 16" x 14" Wageningen B schroef met een B.A.R. (blade area ratio) van 0,3. De gemeten maximum vaarsnelheid bedraagt 9,5 km/h en bij de aanbevolen kruissnelheid van 7,8 km/h bedraagt het aan de accu onttrokken elektrische vermogen 1600 W.
- De gemeten prestaties van de naafmotor zijn geheel in overeenstemming met de specificaties van de fabrikant.
- De gemeten stuwkrachten en koppels tijdens de Bollard pull test zijn geheel in overeenstemming met de MARIN metingen aan Wageningen B schroeven.
- Bij de vaartests blijken de gemeten stuwkracht waardes ca. 10% onder de door MARIN gemeten waardes te liggen. Die laatste zijn gemeten bij "open water" test condities. De reductie in stuwkracht waardes bij de Principia metingen worden toegeschreven aan het zogenaamde "wake-effect".
- Bij de aanbevolen kruissnelheid van het MienSkip (7,8 km/h) bedraagt het schroefrendement, berekend uit de Principia metingen, ruim 60%, terwijl dit 68% bedraagt op basis van de MARIN metingen. Het "wake-effect" (verstoring van het water a.g.v. het zog van het Mienskip) wordt beschouwd als de oorzaak van dit verschil in schroefrendement.
- Bij de aanbevolen kruissnelheid van 7,8 km/h bedraagt het gemeten rendement van motor plus regelaar 80%.
- Bij de aanbevolen kruissnelheid van 7,8 km/h bedraagt het gemeten totaalrendement van de aandrijving 49%.
- Schroefrendementswaardes, berekend uit eerder gedane tests met het stalen MienSkip zijn lager dan de hier gerapporteerde. Reden is dat bij eerdere tests werd aangenomen dat de daarbij gemeten sleepkracht in grootte gelijk is aan de stuwkracht die de schroef moet leveren. De hier gerapporteerde schroefrendementen zijn gebaseerd op directe stuwkrachtmetingen, die laten zien dat de vereiste stuwkracht groter is dan de gemeten sleepkracht. Dit is in overeenstemming met vermeldingen in de vakliteratuur. Sleep-testresultaten kunnen dus niet worden gebruikt om de vereiste stuwkracht van de schroef bij een gegeven vaarsnelheid te bepalen.