

Kwantificeren van agressief vaargedrag

Tristan Aerts

Scriptie voorgedragen tot het behalen
van de graad van
Master in de Nautische Wetenschappen
aan de Hogere Zeevaartschool

Promotor: Deirdre Luyckx
Co-promotor: Olivier Schalm

Academiejaar 2025-2026

Woord vooraf

Ik heb gekozen voor dit onderwerp omdat mijn generatie zich erg bewust is van de huidige problematiek van klimaatopwarming. We weten allemaal dat er onderzoek wordt gedaan naar mogelijke alternatieven voor fossiele brandstoffen, maar ik wou graag weten wat we op dit ogenblik al kunnen doen.

Ik bedank graag mijn papa om mijn teksten na te lezen en de spelfouten eruit te halen, mijn vriendin voor haar steun tijdens sommige lange nachten en voor de hulp met Excel. Ook bedank ik graag mijn promotor en copromotor voor de samenwerking.

Samenvatting

De scheepvaart staat voor de uitdaging om haar energieverbruik en broeikasgasemissies te verminderen. Naast technologische maatregelen kan ook het gedrag van de persoon die het schip bestuurt hierbij een rol spelen. Dit onderzoek analyseert daarom of agressief vaargedrag kwantitatief kan worden beschreven aan de hand van *Aggressive Dynamics Metrics* (ADM's).

Op basis van literatuur uit de autosector werden drie ADM's geselecteerd: *Average Judicative Element* (AJE), *Relatieve Positieve Versnelling* (RPA) en *Characteristic Acceleration* (CA). Deze werden toegepast op seconde-per-secondegegevens van 21 deelnemers uit een simulatorexperiment van het GreenPort-project. Daarnaast werd het traject op basis van snelheids- en versnellingsgegevens onderverdeeld in regulier varen en manoeuvreren.

De ADM's maakten duidelijke verschillen in dynamisch vaargedrag tussen deelnemers zichtbaar. AJE bleek het meest geschikt als hoofdparameter, voornamelijk door de beperkte afhankelijkheid van de gemiddelde snelheid. De rangschikkingen volgens de drie ADM's vertoonden onderling een duidelijke overeenkomst (Kendall's $W = 0,744$), maar minder met de rangschikking volgens brandstofverbruik (Kendall's $W = 0,633$). De resultaten tonen dat agressief vaargedrag kwantificeerbaar is, maar dat ADM's steeds in combinatie met operationele omstandigheden en energieverbruik moeten worden geïnterpreteerd. Daarmee vormen ze een bruikbare basis voor verdere ontwikkeling van data gedreven ecovaren.

Abstract

The shipping industry faces the challenge of reducing its energy consumption and greenhouse gas emissions. In addition to technological measures, the behaviour of the person operating the vessel can also play a role in this. This study therefore analyses whether aggressive sailing behaviour can be quantitatively described using Aggressive Dynamics Metrics (ADMs).

Based on literature from the automotive sector, three ADMs were selected: Average Judicative Element (AJE), Relative Positive Acceleration (RPA) and Characteristic Acceleration (CA). These were applied to second-by-second data from 21 participants in a simulator experiment conducted as part of the GreenPort project. In addition, the route was divided into regular sailing and manoeuvring based on speed and acceleration data.

The ADMs revealed clear differences in dynamic sailing behaviour between participants. AJE proved to be the most suitable as the main parameter, primarily due to its limited dependence on average speed. The rankings according to the three ADMs showed a clear correlation with one another (Kendall's $W = 0.744$), but less so with the ranking based on fuel consumption (Kendall's $W = 0.633$). The results show that aggressive sailing behaviour is quantifiable, but that ADMs must always be interpreted in conjunction with operational conditions and energy consumption. As such, they form a useful basis for the further development of data-driven eco-sailing.

Inhoudsopgave

Lijst van figuren.....	vi
Lijst van tabellen	viii
Lijst van symbolen	ix
1 Inleiding	1
2 Methodologie.....	3
3 Kwantificering van agressief rijgedrag en de invloed ervan op brandstofverbruik.....	6
3.1 Beperkingen van eenvoudige statistische parameters	6
3.2 <i>Aggressive Dynamics Metrics</i> als maat voor dynamisch gedrag.....	7
3.2.1 Relatieve positieve versnelling (<i>Relative Positive Acceleration</i>)	7
3.2.2 Karakteristieke versnelling (<i>Characteristic Acceleration</i>)	8
3.2.3 <i>Average Judicative Element</i>	8
3.3 Invloed van de rijcontext op brandstof verbruik	11
4 Toepassing van analyse op schepen.....	14
4.1 Selectie van geschikte ADM's voor de analyse van vaargedrag	14
4.2 Externe factoren	16
4.3 Dataverzameling voor maritieme analyse.....	16
4.3.1 Data verzameling aan boord van schepen.....	16
4.3.2 Data verzameling met behulp van <i>Automatic Identification System</i>	17
4.3.3 Data verzameling aan de hand van simulatorexperiment	20
5 Resultaten.....	21
5.1 RPA.....	21
5.2 CA	22
5.3 AJE.....	22
5.3.1 AJE literatuur	22
5.3.2 AJE via eenheidsvector	23
5.3.3 Verschil formules AJE	24
5.4 Problemen met data	25
5.5 Varen of manoeuvreren.....	29

5.5.1	Parameters voor onderscheid tussen regulier varen en manoeuvreren.....	29
5.5.2	Classificatie regulier varen en manoeuvreren	30
5.6	Vergelijken met autosector	33
5.7	Vergelijkende analyse van ADM-waarden tussen deelnemers.....	35
6	Rangschikking van deelnemers	37
6.1	Grenswaardes	44
6.2	Detail deelnemer vijf	46
6.3	Detail deelnemer achttien	49
6.4	Detail deelnemer vijftien	52
6.5	Vergelijking tussen deelnemers 5, 15 en 18.....	56
7	Discussie en aanbevelingen	60
8	Conclusie.....	64
9	Bibliografie	67
10	Bijlage	69

Lijst van figuren

Figuur 1	Traject aflegt door deelnemers <i>GreenPort</i> experiment	4
Figuur 2	Grafiek met voorbeeld voor RPA & JE (groen = stedelijke context; blauw = agressief rijgedrag)	10
Figuur 3	Verschil tussen formules AJE	25
Figuur 4	rRPA deelnemer 1	26
Figuur 5	rRPA deelnemer 10	27
Figuur 6	rRPA deelnemer 1 zonder eerste seconde	27
Figuur 7	rRPA deelnemer 10 zonder eerste seconde	27
Figuur 8	Verschil RPA met of zonder eerste seconde	28
Figuur 9	JE deelnemer 1 regulier varen	31
Figuur 10	JE deelnemer 1 manoeuvreren	31
Figuur 11	rRPA deelnemer 1 regulier varen	32
Figuur 12	rRPA deelnemer 1 manoeuvreren	32
Figuur 13	ADM-waarden en -bereiken op basis van de EPA-snelheidsschema's. De verticale lijnen geven de ADM-waarden aan bij toepassing van de exacte EPA-snelheidsschema's. De gearceerde gebieden geven het bereik aan van ADM-waarden die zijn verkregen door de EPA-snelheidsschema's aan te passen om verschillende mate van snelheidsschommelingen te verkrijgen, waarbij de EPA-snelheidstoleranties worden gerespecteerd. De ADM-waarden en -bereiken van de FTP, HWY, NYC en US06 zijn respectievelijk weergegeven in rood, geel, groen en blauw.	34
Figuur 14	ADM's geplot voor alle deelnemers	35
Figuur 15	Rangscores van de verschillende ADM's per deelnemer	40
Figuur 16	Rangscores van de verschillende ADM's per deelnemer opgeteld	40
Figuur 17	Vergelijking tussen rangschikking volgens ADM's en verbruik voor alle deelnemers	44
Figuur 18	RPA voor alle deelnemers met classificatie in weinig agressief (groen), normaal (wit) en agressief (rood) vaargedrag	45
Figuur 19	CA voor alle deelnemers met classificatie in weinig agressief (groen), normaal (wit) en agressief (rood) vaargedrag	45
Figuur 20	AJE voor alle deelnemers met classificatie in weinig agressief (groen), normaal (wit) en agressief (rood) vaargedrag	46
Figuur 21	Detail van JE voor deelnemer vijf regulier varen	47
Figuur 22	Detail van JE voor deelnemer vijf manoeuvreren	48
Figuur 23	Vergelijking tussen rCA en rRPA voor deelnemer vijf	48

Figuur 24	Vergelijking tussen alle ADM's voor deelnemer vijf.....	49
Figuur 25	Detail van JE voor deelnemer achttien regulier varen.....	50
Figuur 26	Detail van JE voor deelnemer achttien manoeuvreren	51
Figuur 27	Vergelijking tussen rCA en rRPA voor deelnemer vijf.....	51
Figuur 28	Vergelijking tussen alle ADM's voor deelnemer achttien	52
Figuur 29	Detail van JE voor deelnemer vijftien regulier varen	53
Figuur 30	Detail van JE voor deelnemer achttien manoeuvreren	54
Figuur 31	Vergelijking tussen rCA en rRPA voor deelnemer vijf.....	55
Figuur 32	Vergelijking tussen alle ADM's voor deelnemer vijf.....	56
Figuur 33	vergelijking van JE tussen deelnemers voor regulier varen	57
Figuur 34	vergelijking van JE tussen deelnemers voor manoeuvreren.....	58
Figuur 35	Vergelijking van rCA en rRPA voor verschillende deelnemers.....	59

Lijst van tabellen

Tabel 1	Overzicht van de in dit werk beschreven <i>Aggressive Dynamics Metrics</i>	7
Tabel 2	Klasse A scheepsuitrusting rapportage-intervallen	18
Tabel 3	Klasse B scheepsuitrusting rapportage-intervallen	19
Tabel 4	Rangschikking volgens AJE eenheidsvector	37
Tabel 5	Rangschikking volgens AJE literatuur	37
Tabel 6	Rangschikking volgens RPA	38
Tabel 7	Rangschikking volgens CA	38
Tabel 8	Rangschikking volgens ADM's met standaard afwijking	39
Tabel 9	Rangschikking volgens brandstof verbruik	41
Tabel 10	Vergelijking tussen rangschikking volgens verbruik en ADM	42
Tabel 11	Rangen voor ADM's en verbruik met gemiddelde en standaardafwijking ..	43

Lijst van symbolen

<i>Symbool</i>	<i>Naam</i>	<i>Definitie / omschrijving</i>	<i>SI- eenheid</i>
a	<i>Versnelling</i>	<i>Versnelling van het vaartuig</i>	$m \cdot s^{-2}$
D	<i>Afgelegde afstand</i>	<i>Totale afgelegde afstand van het vaartuig</i>	m
F	<i>Resulterende kracht</i>	<i>Netto kracht die op het voertuig werkt</i>	N
g	<i>Valversnelling</i>	<i>Versnelling door de zwaartekracht nabij het aardoppervlak</i>	$m \cdot s^{-2}$
h_j	<i>Hoogte</i>	<i>Hoogte/elevatie van het vaartuig op meetpunt j</i>	m
H	<i>Hoogteverschil</i>	<i>Verandering in hoogte tijdens de beweging tussen twee meetpunten</i>	m
m	<i>Massa</i>	<i>Massa van het vaartuig</i>	kg
v_f	<i>Eindsnelheid</i>	<i>Snelheid aan het einde van een acceleratiemanoeuve</i>	$m \cdot s^{-1}$
v_i	<i>Beginsnelheid</i>	<i>Snelheid aan het begin van een acceleratiemanoeuve</i>	$m \cdot s^{-1}$
v_j	<i>Snelheid op meetpunt j</i>	<i>Gemeten voertuigsnelheid op tijdstip j</i>	$m \cdot s^{-1}$
θ	<i>Hellingshoek</i>	<i>Hoek tussen de rijrichting en het horizontale vlak</i>	<i>Rad (of $^\circ$)</i>
ΔK	<i>Verandering kinetische energie</i>	<i>Verschil in kinetische energie door snelheidsverandering tussen twee meetpunten</i>	J
Δt	<i>Tijdsinterval</i>	<i>Tijdsverschil tussen twee meetpunten</i>	s
ΔU_g	<i>Verandering in zwaartepotentiële energie</i>	<i>Verschil in potentiële energie door hoogteverandering tussen twee meetpunten</i>	J

1 Inleiding

De opwarming van het klimaat zet zich onverminderd voort. In 2024 lag de gemiddelde wereldtemperatuur ongeveer 1,6 °C boven het pre-industriële niveau (Torfs, 2025), een duidelijke aanwijzing dat de ruimte om internationale klimaatdoelstellingen te halen steeds kleiner wordt. Europa warmt bovendien sneller op dan het mondiale gemiddelde, waardoor de druk op sectoren met een grote klimaatimpact, zoals de scheepvaart, verder toeneemt (Europese Unie Vertegenwoordiging in België, 2026).

De scheepvaart is economisch onmisbaar: ongeveer 80% van het wereldwijde handelsvolume wordt over zee vervoerd (International Renewable Energy Agency, 2024; Sirimanne et al., 2023). Tegelijk is de sector verantwoordelijk voor ongeveer 3% van de mondiale uitstoot van broeikasgassen en blijft zij sterk afhankelijk van fossiele brandstoffen (Faber et al., 2021; Labrés Pohl, 2023). De maritieme energietransitie is daarom een noodzakelijke voorwaarde om bredere klimaatdoelstellingen te realiseren.

Hoewel er op Europees en internationaal niveau maatregelen worden genomen — zoals het EU *Emissions Trading System* voor de scheepvaart, *FuelEU Maritime* en de herziene broeikasgasstrategie van de *International Maritime Organization* — verloopt de overgang traag. Schepen hebben een lange levensduur, alternatieve brandstoffen vereisen nieuwe infrastructuur en internationale standaarden zijn nog in ontwikkeling. Daardoor kan de sector zich niet uitsluitend richten op toekomstige technologieën, maar moet zij ook inzetten op maatregelen die op korte termijn toepasbaar zijn binnen de bestaande vloot.

In dat licht is energie-efficiëntie bijzonder relevant. Brandstofkosten vormen een groot deel van de operationele kosten van rederijen, terwijl een lager verbruik zowel economische als ecologische voordelen oplevert. Hoewel de sector via schaalvergroting en *slow steaming* al efficiëntiewinsten heeft geboekt, blijft er een aanzienlijk besparingspotentieel bestaan. Dat potentieel ligt niet alleen in technologische innovatie, maar ook in operationele keuzes en in de manier waarop een schip wordt bediend.

Binnen die context krijgt ‘ecovaren’ steeds meer aandacht. ‘Ecovaren’ verwijst naar het bewust en energie-efficiënt bedienen van een schip, met aandacht voor snelheid, versnelling, motorbelasting, koerscorrecties en manoeuvres. Het doel is om onnodige pieken in het brandstofverbruik te vermijden zonder de veiligheid of operationele betrouwbaarheid te ondermijnen. Omdat ‘ecovaren’ geen vlootvernieuwing vereist, is het een laagdrempelige en onmiddellijk toepasbare maatregel.

Een nog onvoldoende onderzocht aspect van 'ecovaren' is de rol van menselijk gedrag. Zelfs wanneer hetzelfde schip onder vergelijkbare omstandigheden vaart, kunnen verschillen in bediening door een andere kapitein leiden tot uiteenlopende verbruiksprofielen. Agressief vaargedrag, zoals overmatige versnellingen, grote snelheidsvariaties of langdurig varen buiten een efficiënt motorregime, kan leiden tot extra brandstofverbruik zonder operationeel voordeel. De energie-efficiëntie van een schip wordt dus niet alleen bepaald door technologie, maar ook door de manier waarop kapiteins daarmee omgaan.

Vanuit deze context wordt in deze scriptie onderzocht of agressief vaargedrag kan worden gekwantificeerd aan de hand van parameters. Daarbij wordt eerst nagegaan of Aggressive Dynamics Metrics (ADM's), afkomstig uit de autosector, toepasbaar zijn binnen de scheepvaart. Vervolgens wordt onderzocht in welke mate de verschillende ADM's onderling correleren en hoe zij zich verhouden tot een rangschikking op basis van brandstofverbruik. Tot slot wordt nagegaan of het traject kan worden opgesplitst in regulier varen en manoeuvreren, en hoe de ADM's zich in beide delen gedragen.

In het vervolg van deze scriptie wordt eerst de beschikbare literatuur uit de autosector besproken en vertaald naar de maritieme context. Daarna wordt toegelicht welke data geschikt zijn voor het onderzoek en hoe de verschillende ADM's zijn berekend. Vervolgens worden de rangschikkingen volgens de ADM's gepresenteerd, inclusief een gecombineerde samenvatting, correlaties met brandstofverbruik en een bespreking van grenswaarden en casestudies. Tot slot worden aanbevelingen geformuleerd en mogelijke richtingen voor toekomstig onderzoek besproken

2 Methodologie

Dit onderzoek vertrekt vanuit de vraag in welke mate agressief vaargedrag een invloed heeft op het brandstofverbruik van schepen, en hoe dit gedrag op een kwantitatieve manier kan worden beschreven. Omdat de maritieme literatuur hierover beperkt is, werd eerst gekeken naar bestaande kennis uit de autosector. Daar wordt al decennialang onderzoek verricht naar ecorijden, agressieve dynamiek, emissies en de invloed van de bestuurder op het totale verbruik. De autosector beschikt bovendien over een grote hoeveelheid empirische data, gestandaardiseerde testcycli en gevalideerde modellen die het verband beschrijven tussen rijprofiel, voertuigparameters en energieverbruik. Deze rijke onderzoek basis maakt het mogelijk om concepten en methoden te identificeren die later kunnen worden vertaald naar de scheepvaart.

De literatuurstudie bestond uit het systematisch zoeken naar en analyseren van wetenschappelijke publicaties, rapporten en praktijkstudies die betrekking hebben op ecorijden, agressieve dynamiek, brandstofverbruik en monitoring van bestuurdersgedrag. Een belangrijk deel van deze literatuur heeft betrekking op *drive cycle characterization*, waarbij men een traject beschrijft aan de hand van parameters die de mate van agressiviteit, variabiliteit of dynamiek in het rijgedrag weergeven. In dat kader kwamen de ADM's naar voren als een relevant concept. Deze parameters zijn ontwikkeld om op basis van snelheidsdata, tijdsintervallen, hoogteverschillen en afgelegde afstand te bepalen hoe dynamisch een bestuurder zich gedraagt. Hoewel deze formules oorspronkelijk zijn ontworpen voor wegverkeer, bieden ze een interessante basis om vaargedrag te analyseren, omdat ze allemaal een directe relatie hebben met energie-inbreng, motorbelasting en variaties in snelheid en versnelling.

De hoeveelheid beschikbare wetenschappelijke literatuur over vaargedrag is beperkter dan in de autosector. De literatuurstudie vormt dan ook de theoretische basis voor het latere empirische werk, waarin de geïdentificeerde parameters voor rijgedrag worden toegepast op experimentele data uit de scheepvaart, om te onderzoeken in welke mate de in de literatuur gevonden verbanden ook in een maritieme context gelden.

Naast de literatuurstudie werd dit onderzoek aangevuld met experimentele data afkomstig uit het *GreenPort*-project. *GreenPort* is een door Erasmus+ gefinancierd samenwerkingsinitiatief dat zich richt op emissiereductie en energie-efficiëntie in havenoperaties. Het project focust op gedragsoptimalisatie, efficiëntere planning en het bewust inzetten van bestaande technologieën. Een belangrijk onderdeel van *GreenPort* is het ontwikkelen van opleidingsprogramma's rond *eco navigation* (ecovaren),

brandstofefficiëntie en simulatortraining voor maritieme professionals (GREENPORT Alliances, z.d.).

Binnen dit project werd aan de Antwerp Maritime Academy een simulatorexperiment uitgevoerd om de invloed van vaargedrag op energieverbruik te onderzoeken. In totaal namen 21 maritieme professionals deel, afkomstig uit verschillende functies en organisaties die actief zijn in de haven van Antwerpen:

- 10 loodsen van het Loodswezen,
- 4 sleepbootkapiteins van Boluda Towage,
- 2 dokloodsen van Port of Antwerp Bruges,
- 5 overige deelnemers, waaronder Brabo lijnmannen, havenmedewerkers en maritieme studenten.

Alle deelnemers kregen de controle over een sleepboot in een Kongsberg simulator en moesten een identiek traject afleggen, zie figuur (xx), inclusief het aanmeren van de sleepboot. De omstandigheden waren volledig gestandaardiseerd, waardoor de human factor geïsoleerd kon worden. Dit maakt het experiment bijzonder geschikt om verschillen in vaargedrag objectief te analyseren.



Figuur 1 Traject aflegt door deelnemers *GreenPort* experiment
Bron: Schalm et al. (2026)

De simulator registreert elke seconde een groot aantal parameters, waaronder snelheid, versnelling, afgelegde afstand, roergebruik, telegraafstanden, motorbelasting en koerswijzigingen. Hierdoor ontstaat een zeer gedetailleerde tijdreeks die uitermate geschikt is voor het analyseren van dynamisch vaargedrag. Het *GreenPort*-

onderzoeksteam maakte op basis van deze data reeds een rangschikking van de deelnemers, gebaseerd op hun energie- en brandstofefficiëntie tijdens het traject.

In deze scriptie wordt dezelfde dataset opnieuw geanalyseerd, maar nu aan de hand van ADM-parameters. Op die manier kan worden onderzocht in welke mate ADM's overeenkomen met de eerder vastgestelde rangschikking, en of deze parameters een bruikbare maat vormen om agressief vaargedrag te kwantificeren. De combinatie van literatuurstudie, simulatoranalyse en praktijkervaring maakt het mogelijk om een genuanceerd beeld te vormen van de rol van menselijk gedrag binnen ecovaren.

Tijdens dit onderzoek is er ook vastgesteld dat er verschillen waren tussen de deelnemers tijdens het uitgevoerde experiment van *GreenPort*: voornamelijk een verschil in beginsnelheid van de deelnemers en de instructies die zij hierover hebben gekregen.

Tot slot werd ook gebruikgemaakt van eigen ervaring als wachtofficier. De inzichten die tijdens het literatuuronderzoek en het analyseren van de simulatordata ontstonden, werden getoetst aan praktische situaties op zee en in de haven. Dit hielp om de theoretische bevindingen te plaatsen binnen een realistische operationele context en om beter te begrijpen hoe ecovaren in de praktijk kan worden toegepast.

Voor dit onderzoek werd gebruikgemaakt van generatieve artificiële intelligentie. Deze werd ingezet om alinea's te herschrijven, om structuur te verbeteren en om relevante literatuur efficiënter te identificeren.

3 Kwantificering van agressief rijgedrag en de invloed ervan op brandstofverbruik

Auto's worden op de openbare weg geconfronteerd met talrijke obstakels die maken dat hun snelheid niet constant kan blijven: bochten, snelheidslimieten, verkeerslichten en verkeersborden waar de bestuurder rekening mee moet houden. Hierdoor is de absolute snelheid minder geschikt om de agressiviteit van het rijgedrag te bepalen. In plaats daarvan wordt de versnelling over langere trajecten een veel relevantere indicator.

In de literatuur worden verschillende formules voorgesteld om deze versnelling over langere afstanden te kwantificeren. Deze methoden vormen de basis voor het analyseren van dynamisch rijgedrag en kunnen, mits de juiste aanpassingen, ook worden toegepast in een maritieme context.

3.1 Beperkingen van eenvoudige statistische parameters

Eerst is er gekeken naar de mogelijkheid om de data puur statistisch te verwerken, bijvoorbeeld door te kijken naar de gemiddelde snelheid van verschillende bestuurders, of naar de versnelling. We zouden deze dan ook kunnen analyseren aan de hand van bijvoorbeeld de standaardafwijking. Er is echter redelijk snel een probleem aan het licht gekomen waardoor deze aanpak geen compleet beeld kan schetsen. Als we enkel naar de standaardafwijking kijken, zouden er bepaalde gedragingen niet opvallen. De standaardafwijking vertelt ons enkel hoe ver bepaalde datapunten van het gemiddelde liggen. Maar twee datapunten kunnen even ver van het gemiddelde liggen terwijl ze toch compleet andere gedragingen vertegenwoordigen. Enerzijds kan een voertuig aan een constante snelheid rijden van x boven het gemiddelde. Een ander voertuig zou vaak kunnen versnellen en vertragen op hetzelfde traject maar wel dezelfde gemiddelde snelheid hebben. Als we dan enkel kijken naar de standaardafwijking, geeft deze geen informatie over het verschil in rijgedrag tussen beide. Ook als we zouden kijken naar de standaardafwijking van de versnelling, zou deze niet het volledige verhaal geven omdat de standaardafwijking versnellen en vertragen gelijk behandelt, terwijl men meer energie nodig heeft om te versnellen dan om te vertragen. Om deze redenen werd verder gezocht naar alternatieve parameters in de literatuur.

3.2 *Aggressive Dynamics Metrics* als maat voor dynamisch gedrag

Uit de literatuurstudie komt naar voren dat een aantal parameters uit de autosector bijzonder relevant zijn om gedrag en energieverbruik te analyseren, en dat deze parameters potentieel kunnen worden vertaald naar de maritieme context. Edwards A. J. (2022) geeft een goed overzicht in de mogelijk meer geavanceerde parameters die men kan gebruiken met betrekking tot het beschrijven van agressiviteit. Er worden drie formules besproken die we verder zullen bekijken. Al deze formules vallen onder de noemer *Aggressive Dynamics Metrics* (ADM). ADM wordt nog niet standaard gebruikt in de sector maar is eerder een verzamelnaam in het onderzoek voor verschillende parameters die het agressieve karakter van rijgedrag kwantificeren (zie tabel 1). Deze parameters zijn ontwikkeld om op basis van snelheidsdata, tijdsintervallen, hoogteverschillen en afgelegde afstand te bepalen hoe agressief een bestuurder zich gedraagt tijdens een traject. Hoewel deze formules oorspronkelijk zijn ontworpen voor wegverkeer, bieden ze een interessante basis om vaargedrag op schepen te analyseren, omdat ze allemaal een directe relatie hebben met energie-inbreng, motorbelasting en variaties in snelheid en versnelling.

Tabel 1 Overzicht van de in dit werk beschreven *Aggressive Dynamics Metrics*
Bron: eigen werk op basis van Edwards (2022), Europese Commissie (2016) en O'Keefe et al. (2007)

Afkorting	Naam parameter	Beschrijving
RPA	Relatieve Positieve Versnelling	Meet positieve versnellingen tijdens een traject
CA	Karakteristieke versnelling	Geeft de positieve energieverandering per afstand weer
AJE	<i>Average Judicative Element</i>	Meet de gemiddelde dynamische belasting ten opzichte van de zwaartekracht

3.2.1 Relatieve positieve versnelling (*Relative Positive Acceleration*)

Indien de snelheid van een wagen als een tijdsreeks is beschreven, dan kunnen we de relatieve positieve versnelling (*Relative Positive Acceleration*, afgekort RPA) als volgt berekenen (Europese Commissie, 2016):

$$RPA = \frac{\sum_j \frac{v_j}{2} (v_{j+1} - v_{j-1})_{pos}}{\sum_j v_j \Delta t} \quad (1)$$

In de formule betekent de 'pos' dat enkel positieve versnellingen worden meegenomen in de teller. Indien deze waarde negatief is, wordt de term uit de opsomming gehaald en

is deze gelijk aan nul. Hoewel de naam suggereert dat RPA een maat is voor versnelling, interpreteert Edwards A.J. (2022) dit als een tijdsgemiddelde maat voor het specifieke vermogen, genormaliseerd door de gemiddelde verplaatsingssnelheid. Dit wil zeggen dat men het specifieke vermogen (het vermogen per gewicht) gaat bekijken terwijl men aan het versnellen is. Hier kijkt men tegelijkertijd ook naar de snelheid die men reeds had, aangezien er meer vermogen nodig is om te versnellen van bijvoorbeeld 100 km/u naar 110 km/u dan van 10 km/u naar 20 km/u ook al zijn beide veranderingen maar 10 km/u. Dan zal men het gemiddelde over de hele rit nemen maar enkel wanneer de snelheidsverandering positief is. Tot wordt genormaliseerd ten opzichte van de gemiddelde snelheid, zodat ritten met verschillende gemiddelde snelheden toch vergeleken kunnen worden met elkaar. Het voordeel van het gebruiken van RPA tegenover bijvoorbeeld de standaardafwijking van de gemiddelde snelheid is dat RPA zich enkel focust op de positieve snelheidsveranderingen: hierdoor focust deze zich op hoe vaak en hoe sterk iemand versnelt. Deze parameter wordt gebruikt in de Europese regelgeving om te bepalen hoeveel auto's uitstoten.

3.2.2 Karakteristieke versnelling (*Characteristic Acceleration*)

De volgende formule is die van de karakteristieke versnelling (*Characteristic Acceleration*, afgekort CA) die werd ingevoerd door O'Keefe et al. (2007). De CA meet de traagheidskracht die nodig om het voertuig per massa-eenheid per afstandseenheid gedurende een cyclus te versnellen of op te tillen. Het is het positieve deel van de specifieke kinetische en potentiële energie per afstand die gepaard gaat met het verplaatsen van een voertuig gedurende een cyclus. CA komt dus neer op de werkelijke versnelling bij een lineaire snelheidsstijging op een constante helling. De formule wordt weergegeven als:

$$CA = \frac{\sum_{j=1}^N [\frac{1}{2}(v_{j+1}^2 - v_j^2) + g(h_{j+1} - h_j)]_{pos}}{D} \quad (2)$$

3.2.3 Average Judicative Element

De derde en meest interessante parameter is het *Average Judicative Element* (gemiddelde beoordelingselement, AJE), dat gebaseerd is op het *judicative element* (beoordelingselement, JE). Het is een maat om de agressiviteit van een rijcycclus te beschrijven op basis van hoogte- en snelheidsveranderingen. Deze waarde kijkt dus naar de verandering in kinetisch energie en potentiële energie. AJE zal dus weergeven hoe

sterk een voertuig gemiddeld versnelt of tegen een hoogteverschil in beweegt, uitgedrukt ten opzichte van de zwaartekracht. De formule voor JE wordt weergegeven als (Edwards, 2022):

$$JE = \frac{\frac{1}{2}(v_{j+1}^2 - v_j^2) + g(h_{j+1} - h_j)}{\frac{g}{2}(v_j + v_{j+1})\Delta t} \quad (3)$$

Δt is de periode van tijd tussen j en $j + 1$ en dit voor een vast interval tijdens de cyclus. JE wordt enkel berekend als de snelheid niet nul is. De uiteindelijke waarde is dimensieloos omdat JE genormaliseerd wordt door g . We kunnen deze formule ook herschrijven op volgende manier:

$$JE = \frac{\Delta K + \Delta U_g}{mgD} \quad (4)$$

Hier wordt alles reeds naar de verschillende soorten energie terug gewerkt en zien we ook de afstand en massa van het voertuig terugkomen in de noemer. Dit kan verder nog omgevormd worden tot:

$$JE = \frac{FD}{mgD} + \frac{H}{D} \quad (5)$$

We kunnen de formule uiteindelijk nog een keer herschrijven om duidelijk te laten zien dat deze verband legt met de versnelling:

$$JE = \frac{a + g \sin i}{g} \quad (6)$$

Uit deze laatste formule stellen we vast dat als het hoogteverschil nul is en onze versnelling 10% van g zou zijn, de waarde van JE 10% zal zijn. Omgekeerd, als de versnelling nul is en de hoek waar het voertuig oprijdt 6% zou zijn, dan zal JE ook de waarde 6% aannemen. Deze waarde is dus direct gerelateerd aan de zwaartekracht. Om dan tot de AJE te komen, moet je het gemiddelde van alle positieve JE's beschouwen over een periode die wordt bestudeerd.

De formule voor AJE wordt weergegeven als:

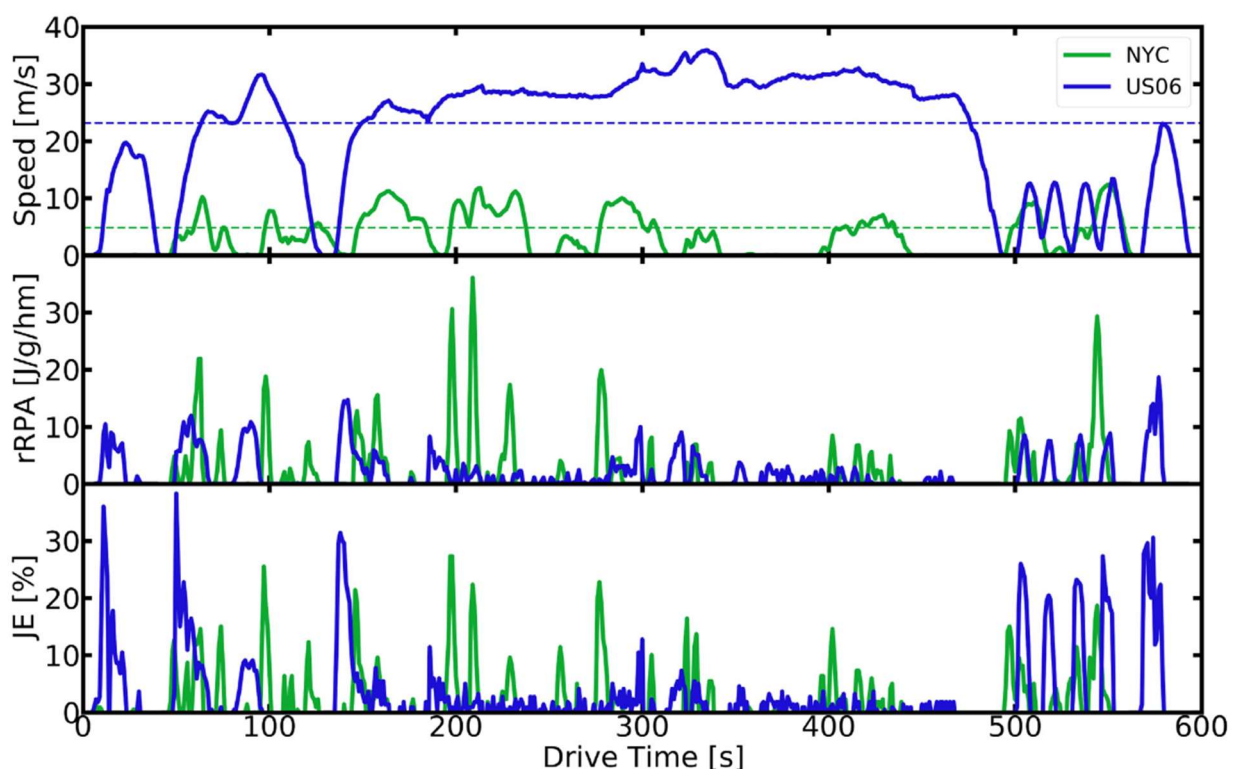
$$AJE = \text{ave}(JE_{neg \rightarrow 0}) \quad (7)$$

AJE is de enige parameter die volledig snelheidsonafhankelijk is en die negatieve versnellingen corrigeert zonder ze volledig te verwijderen. Dit gebeurt door negatieve waarden op nul te zetten, omdat vertragen minder energie kost dan versnellen. Hierdoor geeft AJE een realistischer beeld van de werkelijke belasting van het voertuig of schip. De literatuur toont aan dat AJE veel stabiel is dan de andere parameters en beter overeenkomt met de werkelijke dynamiek van het voertuig, vooral in situaties met beperkte snelheidsvariatie (Edwards, 2022).

In figuur 1 wordt duidelijk hoe JE en rRPA — waarbij rRPA staat voor lopende RPA, berekend op dezelfde manier als RPA maar zonder de som over alle waarden — de data op een verschillende manier interpreteren. In figuur 1 zijn twee snelheidsprofielen te zien: het groene profiel stelt een stedelijk scenario voor, terwijl de blauwe lijn een agressiever rijpatroon weergeeft. Op basis daarvan zou men verwachten dat in de volgende grafieken de blauwe lijn systematisch hoger ligt dan de groene. Dat blijkt echter enkel het geval te zijn bij JE.

De reden hiervoor is dat in het agressieve rijpatroon de versnellingen rond 100 s en na 500 s onder de gemiddelde snelheid liggen, waardoor deze minder zwaar doorwegen in rRPA. Het groene profiel vertoont op die momenten een gelijkaardige uitschieter, maar krijgt in rRPA een hogere waarde toegekend. JE reageert daarentegen wél zoals verwacht, omdat deze parameter rechtstreeks gebaseerd is op veranderingen in kinetische en potentiële energie en niet op de snelheid zelf.

De literatuur benadrukt bovendien dat AJE beter aansluit bij de perceptie van agressiviteit zoals bestuurders die ervaren, omdat de parameter gebaseerd is op g-krachten in plaats van op snelheid.



Figuur 2 Grafiek met voorbeeld voor RPA & JE (groen = stedelijke context; blauw = agressief rijgedrag)
Bron: Edwards (2022)

Na de drie formules te bespreken is het belangrijk te weten dat RPA en CA dezelfde eenheid hebben, namelijk die van de versnelling m/s^2 . Ze beschrijven wel een verschillende fysische situatie. Het nadeel van RPA en CA is wel dat zij steeds genormaliseerd moeten worden ten opzichte van de gemiddelde snelheid. Dit zorgt ervoor dat als de gemiddelde snelheid van verschillende datasets ver uit elkaar ligt, het moeilijk zal zijn ze te vergelijken aan de hand van deze parameters. Hier tegenover zal AJE daar geen probleem mee hebben omdat deze relatief tegenover de zwaartekracht een waarde geeft en dus niet de snelheid gebruikt om te normaliseren.

3.3 Invloed van de rijcontext op brandstof verbruik

Bij onderzoek naar rijgedrag wordt een traject vaak opgedeeld in verschillende rijomgevingen, zoals autosnelweg, stedelijk verkeer en landelijke wegen (Peng et al., 2019; Redsell et al., 1993). Deze onderverdeling is essentieel omdat het brandstofverbruik en de mate van agressief rijgedrag niet in elke omgeving door dezelfde factoren worden beïnvloed. Op autosnelwegen spelen vooral de voertuigsnelheid, het aantal schakelmomenten en de luchtdruk een belangrijke rol. De snelheid bepaalt in hoge mate de luchtweerstand, die toeneemt naarmate het voertuig sneller rijdt. Het aantal schakelmomenten beïnvloedt de efficiëntie van de motor, terwijl luchtdruk een rol speelt in de dichtheid van de lucht en daarmee in de weerstand die het voertuig ondervindt. In landelijke omgevingen blijkt vooral de stand van de gasklep bepalend te zijn, wat rechtstreeks verband houdt met de mate waarin de bestuurder gas geeft. In stedelijke omgevingen is de situatie nog complexer, omdat bestuurders voortdurend moeten anticiperen op verkeerslichten, kruispunten en andere weggebruikers, wat leidt tot frequente versnellingen en vertragingen.

Naast deze technische en omgevingsfactoren werd vastgesteld dat de invloed van bestuurder en voertuig verschilt per rijomgeving (Redsell et al., 1993). Op autosnelwegen had de keuze van het voertuig de grootste impact op het verbruik, omdat aerodynamica, motorcapaciteit en transmissie-efficiëntie daar de dominante factoren zijn. In stedelijke en landelijke omstandigheden bleek het voertuigtype echter minder doorslaggevend. Daar was vooral het profiel van de bestuurder bepalend. Dit wijst erop dat menselijk gedrag vooral in dynamische verkeerssituaties, waar vaak moet worden versneld, vertraagd en geanticipeerd, een grote invloed heeft op het brandstofverbruik. Een bijkomende vaststelling was dat in stedelijke en landelijke omstandigheden het brandstofverbruik daalde naarmate de gemiddelde snelheid toenam, omdat een hogere

gemiddelde snelheid vaak samenhangt met minder stoppen en een vlottere verkeersdoorstroming.

Verder werd onderzocht hoe bestuurders reageren wanneer zij tijdens een traject specifieke opdrachten krijgen. Hierbij bleek dat kleine verschillen in snelheid al een meetbaar effect hebben op het brandstofverbruik. Gemiddeld leidt een verschil van één % in snelheid tot een verschil van ongeveer 1,1 % in brandstofverbruik (Evans, 1979). Toch werd ook vastgesteld dat ervaren bestuurders hun reistijd kunnen verkorten zonder hun brandstofverbruik noodzakelijk te verhogen. Dit toont aan dat efficiënt rijgedrag niet enkel afhangt van trager rijden, maar vooral van de manier waarop de bestuurder anticipeert en zijn snelheid aanpast aan de verkeerssituatie.

In één van de besproken experimenten kregen bestuurders zeven verschillende opdrachten (Evans, 1979). Het voertuig was uitgerust met een verbruiksmeter die was ingedeeld in drie zones: groen, oranje en rood. De bestuurders moesten achtereenvolgens normaal rijden, het traject zo snel mogelijk afleggen, hard versnellen en vertragen, zo weinig mogelijk brandstof verbruiken, de verbruiksmeter in de groene zone houden, de meter in de groene of oranje zone houden en rijden zoals een zeer voorzichtige bestuurder. Tussen deze scenario's werden duidelijke verschillen in brandstofverbruik vastgesteld. Zelfs binnen het scenario waarin bestuurders hun verbruik moesten minimaliseren, konden verschillende rijstijlen worden onderscheiden. Sommige bestuurders verlaagden hun snelheid en verminderden de kracht waarmee ze versnelden, terwijl anderen juist tijdelijk sterk versnelden om te vermijden dat ze moesten stoppen voor een rood licht.

Opvallend was dat bestuurders minder verbruikten wanneer zij simpelweg de opdracht kregen om hun brandstofverbruik te minimaliseren dan wanneer zij de instructie kregen om de verbruiksmeter in de groene of oranje zone te houden of om zeer voorzichtig te rijden. Bij deze laatste strategieën werd vaak te traag versneld, waardoor bestuurders minder goed konden inspelen op verkeerslichten en vaker moesten stoppen. Dit toont aan dat extreem voorzichtig rijden niet altijd de meest efficiënte strategie is. Efficiënt rijgedrag vereist niet alleen rustig accelereren, maar ook anticiperen op toekomstige verkeerssituaties. De studie stelde vast dat bestuurders tot 15 % brandstof konden besparen of hun reistijd met 15 % konden verminderen, vooral wanneer de gemiddelde snelheid tussen veertig en zestig kilometer per uur lag.

Ook het effect van feedbacksystemen werd onderzocht. Bij personenwagens bleek het toevoegen van een verbruiksmeter in het dagelijkse rijgedrag slechts een beperkt effect te hebben wanneer bestuurders al de instructie hadden gekregen om zuiniger te rijden. Het verschil tussen rijden met en zonder verbruiksmeter bedroeg in dat geval ongeveer drie procent. Dit beperkte effect kan worden verklaard doordat een verbruiksmeter vooral nuttig is op langere trajecten, waar de bestuurder voldoende tijd heeft om zijn snelheid aan te passen en een efficiënte rijstijl te zoeken. In stedelijke omgevingen is dit moeilijker, omdat voertuigen vaak moeten starten, stoppen en reageren op verkeerslichten of ander verkeer.

De literatuur toont verder aan dat de theoretisch meest efficiënte route of snelheidsstrategie wel kan worden berekend, maar dat dit in de praktijk moeilijk toepasbaar is zonder geavanceerde systemen (Evans, 1979). Een ideaal algoritme zou op voorhand moeten weten wanneer verkeerslichten groen of rood worden, hoe andere voertuigen zich zullen gedragen en welke omstandigheden zich verderop op het traject zullen voordoen. Omdat deze informatie in de praktijk vaak ontbreekt, blijft volledig optimaal rijden voorlopig moeilijk haalbaar. Toch kunnen eenvoudige gedragsregels al een duidelijke verbetering opleveren.

Een eerste belangrijke regel is dat bestuurders moeten anticiperen op verkeerssituaties, zodat remmen zoveel mogelijk wordt vermeden. Het heeft weinig zin om te versnellen naar een hogere snelheid wanneer men kort daarna toch moet vertragen of stoppen. Een tweede regel is dat volledig stoppen zoveel mogelijk moet worden voorkomen. Wanneer een voertuig stilstaat, verbruikt het nog steeds brandstof, bijvoorbeeld tijdens het wachten aan een rood licht. Bovendien gaat bij het remmen kinetische energie verloren, die daarna opnieuw moet worden opgebouwd bij het optrekken. Een derde regel is dat rustig versnellen meestal voordelig is, behalve wanneer sneller versnellen helpt om later remmen of stoppen te vermijden.

Hoewel deze gedragsaanpassingen op individueel niveau duidelijke voordelen kunnen opleveren, blijft het onzeker wat het effect zou zijn wanneer alle bestuurders dezelfde strategieën zouden toepassen. Een rijstijl die voor één bestuurder efficiënt is, kan op systeemniveau nadelige gevolgen hebben. Wanneer iedereen bijvoorbeeld zeer traag zou versnellen om brandstof te besparen, kunnen minder voertuigen door een groen licht rijden. Hierdoor nemen wachttijden toe en kan het totale brandstofverbruik van de volledige verkeersstroom juist stijgen. Dit toont aan dat individuele efficiëntie niet automatisch leidt tot collectieve efficiëntie.

4 Toepassing van analyse op schepen

De autosector heeft de voorbije decennia een stevige basis gelegd voor onderzoek naar brandstofverbruik en de daarmee samenhangende uitstoot, waarbij men een duidelijk verband heeft kunnen aantonen tussen het gedrag van de bestuurder en het totale energieverbruik. Wanneer deze inzichten worden vertaald naar de scheepvaartsector, moeten echter enkele belangrijke kanttekeningen worden gemaakt.

4.1 Selectie van geschikte ADM's voor de analyse van vaargedrag

Om agressief vaargedrag te kwantificeren volstaat het niet om enkel eenvoudige statistische parameters te gebruiken, zoals de gemiddelde snelheid, de gemiddelde versnelling of de standaardafwijking daarvan. Dergelijke basisstatistieken geven wel een indicatie van variatie, maar ze beschrijven niet hoe intens, hoe frequent en in welke richting een schip versnelt of vertraagt.

Daarom wordt, zoals de literatuur suggereert, gekeken naar de verschillende ADM's. Deze formules zijn geschikter om vaargedrag te karakteriseren omdat ze niet alleen de mate van variatie in snelheid of versnelling vastleggen, maar vooral de dynamiek van het gedrag: de grootte van versnellingen, de abruptheid van manoeuvres en de frequentie waarmee deze optreden. In het literatuuroverzicht werden drie ADM's besproken, en in dit onderzoek wordt nagegaan welke van deze parameters toepasbaar zijn binnen de context van de scheepvaart.

Van de drie besproken formules blijkt AJE de meest geschikte parameter om als hoofdmaatstaf te gebruiken voor het kwantificeren van vaargedrag. AJE beschrijft de gemiddelde dynamische belasting van het vaartuig ten opzichte van de zwaartekracht en sluit daardoor nauw aan bij wat men subjectief ervaart als agressief of onrustig vaargedrag. Een bijkomend voordeel is dat AJE niet afhankelijk is van de gemiddelde snelheid, waardoor deze parameter geschikt is om datasets met sterk uiteenlopende snelheidsprofielen te vergelijken, zoals die van een olietanker tegenover een containerschip. Bovendien corrigeert AJE negatieve versnellingen op een manier die ervoor zorgt dat ze niet volledig wegvallen, maar wel minder zwaar doorwegen in de eindberekening, wat een realistischer beeld geeft van het totale dynamische gedrag. Wel moet de formule worden aangepast om bruikbaar te zijn in de scheepvaart. In de oorspronkelijke formule van JE, formule (3), waarvan AJE is afgeleid, wordt immers de elevatie opgenomen. De elevatie van een schip blijft echter te allen tijde gelijk aan de

zeespiegel, waardoor deze term in de maritieme context naar nul kan worden herleid en dus uit de formule kan worden verwijderd, zodat:

$$JE = \frac{\frac{1}{2}(v_{j+1}^2 - v_j^2)}{\frac{g}{2}(v_j + v_{j+1})\Delta t} \quad (8)$$

Voor formule (7) van JE kunnen we hetzelfde doen, in plaats van de hoogte die hier nul wordt, zal het de hoek tegenover het horizontaal vlak zijn die nul wordt. Dit geeft ons dan de volgende formule:

$$JE = \frac{a}{g} \quad (9)$$

De formule om uiteindelijk AJE te berekenen blijft onveranderd.

Naast AJE is ook RPA een nuttige aanvullende parameter. RPA richt zich specifiek op positieve versnellingen en geeft daardoor goed weer hoe vaak en hoe sterk een bestuurder extra energie vraagt om te versnellen. Het is bovendien een Europese parameter die reeds wordt gebruikt binnen de regelgeving rond de uitstoot van personenwagens. Een nadeel van RPA is echter dat deze sterk afhankelijk is van de gemiddelde snelheid. Daardoor is de parameter vooral geschikt om schepen van hetzelfde type met elkaar te vergelijken, omdat deze meestal met gelijkaardige snelheden varen.

CA kan eveneens worden gebruikt, omdat deze formule rechtstreeks verbonden is met het energieverbruik. CA beschrijft de positieve verandering in kinetische en potentiële energie per afgelegde afstand. Voor de scheepvaart is de term voor potentiële energie echter minder relevant, aangezien — zoals eerder bij AJE toegelicht — de elevatie van een schip ten opzichte van de zeespiegel in de praktijk constant blijft en dus naar nul kan worden herleid. De parameter blijft desondanks waardevol omdat zij nog steeds een goed beeld geeft van de hoeveelheid energie die nodig is om het vaartuig te versnellen. Daarom herschrijven we ook formule (2):

$$CA = \frac{\sum_{j=1}^N [\frac{1}{2}(v_{j+1}^2 - v_j^2)]_{pos}}{D} \quad (10)$$

De meest geschikte aanpak voor de scheepvaart bestaat er daarom uit om AJE als hoofdparameter te gebruiken, aangevuld met RPA en CA. Om de resultaten correct te interpreteren, blijft het echter zinvol om deze dynamische parameters te vergelijken met meer traditionele grootheden, zoals de gemiddelde snelheid en versnelling, maar ook met schep specifieke variabelen zoals voorligging, draaisnelheid, afgelegde afstand en eventueel andere relevante dynamische parameters

4.2 Externe factoren

In de autosector werd vastgesteld dat ook externe factoren een individuele invloed kunnen hebben op het brandstofverbruik. In dat onderzoek bleek vooral de omgevingsluchtdruk een merkbare rol te spelen. Voor schepen kan dit eveneens het geval zijn, maar in de maritieme context zijn er andere externe factoren die een veel grotere impact hebben, zoals stroming, golven en wind. Omdat een schip een aanzienlijk groter frontaal en lateraal oppervlak heeft dan een auto, kan wind een sterke invloed uitoefenen op zowel de snelheid als het verbruik. In combinatie met stroming kan wind bovendien drift veroorzaken, waardoor het schip zijdelings weggezet wordt. Dit leidt tot extra weerstand, omdat het vaartuig als het ware “krabbend” door het water beweegt. Hierdoor komt een groter deel van de scheepsromp in een ongunstige hoek in contact met het water, wat de hydrodynamische weerstand verhoogt.

De analyse van factoren die een invloed hebben op het brandstofverbruik bij auto's kan in principe ook worden toegepast op schepen. De belangrijkste vereiste is dat er tijdsreeksen beschikbaar zijn van de snelheid van een schip als functie van de tijd. Dergelijke data kunnen op verschillende manieren worden verzameld.

4.3 Dataverzameling voor maritieme analyse

Voor de dataverzameling binnen dit onderzoek werden drie mogelijke methoden overwogen. Een eerste mogelijkheid bestaat uit het uitvoeren van metingen aan boord van operationele schepen, waarbij zowel het brandstofverbruik als de bewegingen en bediening van het schip rechtstreeks worden geregistreerd. Een tweede mogelijkheid is het gebruik van bestaande AIS-gegevens, afkomstig van commerciële platformen zoals MarineTraffic en VesselFinder of van de Schelderadarketen (SRK). Een derde mogelijkheid bestaat uit het gebruik van gegevens die reeds tijdens eerdere simulatorexperimenten werden verzameld. Elk van deze methoden heeft specifieke voor- en nadelen wat betreft de beschikbare parameters, meetfrequentie en praktische haalbaarheid.

4.3.1 Data verzameling aan boord van schepen

De meest directe methode bestaat uit het verzamelen van gegevens aan boord van operationele schepen. Idealiter wordt hierbij een debietmeter op de brandstofleiding naar de motor geïnstalleerd, zodat het brandstofverbruik met een hoge tijdsresolutie,

bijvoorbeeld elke seconde, kan worden geregistreerd. Parallel hieraan zouden operationele parameters zoals positie, snelheid, versnelling, voorligging en roerhoek met dezelfde frequentie moeten worden gemeten. Hierdoor kunnen veranderingen in het vaargedrag rechtstreeks worden gekoppeld aan veranderingen in het brandstofverbruik.

Deze methode heeft als belangrijk voordeel dat het werkelijke vaargedrag onder operationele omstandigheden wordt onderzocht en dat de bewegingsgegevens rechtstreeks aan het effectieve brandstofverbruik kunnen worden gekoppeld. Daartegenover staat dat dergelijke metingen een uitgebreide installatie aan boord vereisen en afhankelijk zijn van de medewerking van rederijen en bemanningen. Bovendien moet gedurende voldoende lange tijd worden gemeten om verschillende officieren en vergelijkbare operationele omstandigheden met elkaar te kunnen vergelijken.

Binnen de beschikbare tijd en middelen van deze masterscriptie bleek het niet haalbaar om dergelijke metingen aan boord van operationele schepen uit te voeren. Daarom werden ook bestaande databronnen onderzocht.

4.3.2 Data verzameling met behulp van *Automatic Identification System*

Een tweede mogelijkheid bestaat uit het gebruik van gegevens afkomstig van het *Automatic Identification System* (AIS). Het voordeel hiervan is dat voor een groot aantal verschillende schepen reeds operationele gegevens beschikbaar zijn. Platformen zoals MarineTraffic en VesselFinder maken gebruik van AIS-data en kunnen daardoor een mogelijke bron vormen voor dergelijke gegevens. Daarnaast worden scheepsbewegingen in bepaalde vaargebieden geregistreerd door verkeerscentrales. In België gebeurt dit onder andere via de Schelderadarketen (SRK), die informatie logt van schepen die door de gemonitorde zones varen (Waterbouwkundig Laboratorium, z.d.).

Voor een nauwkeurige berekening van de ADM's is vooral de snelheid van een schip met een voldoende hoge tijdsresolutie van belang. Idealiter zijn gegevens ongeveer elke seconde beschikbaar. Daarom moet worden nagegaan welke schepen met AIS zijn uitgerust, welke gegevens zij uitzenden en met welke frequentie deze worden bijgewerkt.

Een AIS-transponder is verplicht voor alle schepen met een bruto tonnage van 300 of meer op internationale reizen, voor vrachtschepen groter dan 500 bruto tonnage die niet internationaal varen en voor alle passagiersschepen, ongeacht hun grootte (International Maritime Organization, 2002). AIS-berichten bevatten zowel statische en

reisgerelateerde als dynamische informatie. De statische en reisgerelateerde informatie, zoals het MMSI-nummer, de scheepsnaam en het scheepstype, wordt ongeveer iedere zes minuten bijgewerkt en is voor de berekening van de ADM's minder relevant.

De dynamische AIS-gegevens zijn daarentegen wel relevant. Deze omvatten onder meer de positie van het schip, het tijdstip van verzending, de koers over de grond (*Course Over Ground*, COG), de snelheid over de grond (*Speed Over Ground*, SOG), de voorligging (*heading*), de navigatiestatus en, indien beschikbaar, de *Rate of Turn* (ROT).

De updatefrequentie van deze dynamische gegevens is afhankelijk van het type AIS-transponder en de operationele toestand van het schip. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen AIS-klasse A en AIS-klasse B. Klasse A-transponders worden voornamelijk gebruikt op schepen waarvoor AIS verplicht is volgens SOLAS, terwijl klasse B-transponders vooral worden toegepast op kleinere schepen die niet onder deze verplichting vallen. De rapportage-intervallen voor beide types worden weergegeven in tabellen 2 en 3.

Tabel 2 Klasse A scheepsuitrusting rapportage-intervallen

Bron: IMO (2015)

Type of ship	General reporting interval
Ship at anchor or moored and not moving faster than 3 knots	3 min
Ship at anchor or moored and moving faster than 3 knots	10 s
Ship 0-14 knots	10 s
Ship 0-14 knots and changing course	3 1/3 s
Ship 14-23 knots	6 s
Ship 14-23 knots and changing course	2 s
Ship >23 knots	2 s
Ship >23 knots and changing course	2 s

Tabel 3 Klasse B scheepsuitrusting rapportage-intervallen
Bron: IMO (2015)

Crafts not subject to SOLAS	Nominal reporting interval
Class B “SO” shipborne equipment not moving faster than 2 knots	3 min
Class B “SO” shipborne equipment moving 2-14 knots	30 s
Class B “SO” equipment moving 14-23 knots	15 s
Class B “SO” equipment moving > 23 knots	5 s
Class B “CS” shipborne equipment not moving faster than 2 knots	3 min
Class B “CS” shipborne equipment moving faster than 2 knots	30 s

Deze intervallen hebben betrekking op de transmissie van AIS-berichten. Wanneer gebruik wordt gemaakt van commerciële platformen zoals MarineTraffic, zijn echter niet noodzakelijk alle verzonden berichten beschikbaar. MarineTraffic rapporteert bijvoorbeeld dat positie-updates met een interval van ongeveer één minuut per MMSI-nummer kunnen worden verwerkt (Vasilis, 2024). Hierdoor kunnen tussenliggende datapunten ontbreken.

Voor de berekening van ADM's vormt dit een beperking, aangezien de *metrics* gebaat zijn bij gegevens met een hoge meetfrequentie. De impact hiervan kan in de scheepvaart echter kleiner zijn dan in de automobielsector, omdat veranderingen in snelheid en beweging doorgaans trager plaatsvinden. Ter vergelijking: de maximale snelheid van auto's ligt rond 120 km/u (Vlaamse Stichting V, 2026), terwijl de meeste schepen varen met snelheden tussen ongeveer 13 en 25 knopen, overeenkomend met circa 24 tot 46 km/u (Agarwal, 2019). De dynamiek van een schip ontwikkelt zich daardoor doorgaans over een langere tijdschaal.

Voor een zo nauwkeurig mogelijke berekening van ADM's geniet toegang tot de gelogde gegevens van de Schelderadarketen de voorkeur boven data van commerciële AIS-platformen. MarineTraffic of VesselFinder kunnen wel worden gebruikt voor een eerste verkennende analyse, mits rekening wordt gehouden met de lagere en variabele tijdsresolutie.

Bij toepassing van AIS-data is het bovendien belangrijk een schip te selecteren dat regelmatig een vergelijkbaar traject aflegt. Hierdoor kunnen verschillende reizen en, indien bekend, verschillende wachtofficiëren beter met elkaar worden vergeleken. Een

mogelijk voorbeeld is het containerschip *Freya*¹, dat frequent tussen Zeebrugge en Hull vaart en beschikt over een *pilot exemption license*. Hierdoor kan de invloed van verschillende loodsen op het geregistreerde vaargedrag worden beperkt, wat de vergelijkbaarheid tussen reizen ten goede komt.

Hoewel AIS-data daarmee interessante mogelijkheden bieden voor vervolgonderzoek, bleek het binnen deze masterscriptie niet haalbaar om voldoende consistente gegevens van één of meerdere schepen te verzamelen om de ADM's op deze manier uitgebreid te onderzoeken.

4.3.3 Data verzameling aan de hand van simulatorexperiment

In het kader van deze masterscriptie bleek het niet haalbaar om gegevens van operationele schepen aan boord te verzamelen, noch om voldoende AIS-data over één of meer schepen te verzamelen. Om die reden wordt gebruik gemaakt van gegevens die reeds beschikbaar zijn vanuit eerdere experimenten uitgevoerd aan de Antwerp Maritime Academy. Dit omvat onder meer datasets die verzameld werden in het kader van het *GreenPort-project*, waarin diverse vaargedragsparameters onder gecontroleerde omstandigheden zijn geregistreerd. Deze gegevens vormen een geschikte basis om de voorgestelde analysemethoden toe te passen en te evalueren binnen een maritieme context.

¹ Freya, IMO-nummer: 9219874, *call sign*: PECN, vlag: Nederland, GT: 5067 t, gebouwd: 2000, eigenaar: Scheepvaartonderneming "FREYA" C.V., beheerder: Holwerda Shipmanagement B.V.

5 Resultaten

De ADM's zijn toegepast op de dataset afkomstig uit het *GreenPort*-experiment. Alle berekeningen werden uitgevoerd in Excel, waarbij voor elke parameter een afzonderlijk Excel-werkboek werd aangemaakt, zie digitale bijlagen. De simulator registreerde elke seconde een groot aantal variabelen, waaronder longitudinale en laterale snelheid en versnelling, afgelegde afstand en roer- en telegraafstanden. Deze tijdreeks vormde de basis voor het berekenen van RPA, CA en AJE. Hieronder wordt stap voor stap toegelicht hoe elke parameter werd berekend.

In de dataset zijn snelheid en versnelling ontbonden in een longitudinale en een laterale component. Voor dit onderzoek zullen we de longitudinale component gelijkstellen aan x en de laterale component gelijkstellen aan y.

5.1 RPA

Voor de berekening van RPA werd eerst de totale snelheid bepaald. De simulator registreerde de snelheid als twee afzonderlijke componenten. Om de ADM's correct te kunnen berekenen, werd de totale snelheid als volgt berekend:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}. \quad (11)$$

Vervolgens werd de versnelling benaderd door het verschil te nemen tussen de snelheid op tijdstip $j+1$ en tijdstip $j-1$. Deze methode levert een robuuste benadering van de versnelling op basis van discrete tijdstappen van één seconde.

Daarna werd gecontroleerd welke van deze waarden positief waren. RPA houdt immers uitsluitend positieve versnellingen bij, omdat vertragen minder energie kost dan versnellen. Dit werd gedaan door telkens het maximum te bepalen van het berekende verschil en nul. Indien de waarde negatief was, werd ze dus vervangen door nul. Dit werd gedaan met behulp van de max functie in Excel. Tot slot werden deze berekende waarden samengevoegd om RPA te berekenen aan de hand van formule (1).

Voor *running RPA* (rRPA) werd eerst de gemiddelde snelheid berekend. Deze gemiddelde snelheid werd vervolgens gebruikt in de noemer van de formule, waarna rRPA kon worden bepaald volgens formule:

$$rRPA = \frac{\frac{v_j}{2}(v_{j+1}-v_{j-1})_{pos}}{\bar{v} * \Delta t} \quad (12)$$

5.2 CA

Voor de berekening van CA werd opnieuw gestart met het bepalen van de totale snelheid, zoals hierboven beschreven. Vervolgens werd de teller van de CA-formule berekend in een aparte kolom volgens formule (10). Net zoals bij RPA moesten enkel de positieve waarden worden behouden. Dit werd opnieuw uitgevoerd door het maximum te nemen van de berekende waarde en nul.

De CA-formule bevat naast de snelheidscomponent ook een term die het hoogteverschil tussen twee tijdstippen weergeeft. In de maritieme context is deze term altijd nul, waardoor hij wegvalt uit de berekening. De noemer van de formule bestaat uit de totale afgelegde afstand tijdens het experiment. De simulator registreerde deze afstand in nautische mijl, waardoor deze eerst werd omgerekend naar meter. Deze zijn dan samengevoegd, en zo is de uiteindelijke CA-waarde berekend.

Voor *running* CA (rCA) werd gebruikgemaakt van de gemiddelde snelheid vermenigvuldigd met het tijdsinterval, zoals beschreven in de literatuur (O'Keefe et al., 2007):

$$rCA = \frac{\frac{1}{2}(v_{j+1}^2 - v_j^2)_{pos}}{\bar{v} * \Delta t} \quad (13)$$

5.3 AJE

Voor het AJE werden twee verschillende formules van het JE gebruikt. AJE is immers het gemiddelde van alle JE-waarden, waarbij negatieve waarden worden teruggebracht naar nul. Hieronder worden beide benaderingen toegelicht.

5.3.1 AJE literatuur

De eerste formule die gebruikt werd voor JE, is formule (8) en zal in het vervolg ook genoteerd worden als AJE_{lit} . Dit is de formule die in de literatuur beschreven werd (Edwards, 2022), waarbij de term die het hoogteverschil beschrijft, wegvalt in de scheepvaart. Deze formule bekijkt in de teller het verschil in kinetische energie en zou

dus kunnen omschreven worden als JE als interpretatie van energie. De formule is als volgt:

$$JE = \frac{\frac{1}{2}(v_{j+1}^2 - v_j^2)}{\frac{g}{2}(v_j + v_{j+1})\Delta t} \quad (14)$$

In deze formule is Δt gelijk aan 1 seconde, omdat het tijdsinterval tussen twee data-registraties in de simulator altijd exact één seconde is. In Excel werd eerst opnieuw de totale snelheid berekend, zoals bij RPA en CA. Vervolgens werden teller en noemer afzonderlijk berekend in aparte kolommen en daarna samengevoegd tot JE.

Daarna werd gecontroleerd of de JE-waarden negatief waren. Negatieve waarden werden vervangen door nul, omdat vertragen minder energie kost dan versnellen. Tot slot werd het gemiddelde genomen van alle positieve JE-waarden om AJE te verkrijgen:

5.3.2 AJE via eenheidsvector

Als alternatieve formulering voor de berekening van de AJE werd eveneens formule (9) beschouwd. Aangezien hoogteverschillen bij schepen in deze studie worden verwaarloosd, vervalt de term voor de verandering in potentiële energie. De formule reduceert hierdoor tot een verhouding tussen de versnelling en de zwaartekrachtsversnelling, waardoor de bewegingsrichting niet expliciet in de berekening wordt meegenomen.

Om deze richtingsafhankelijkheid toch te behouden, werd de versnellingsvector geprojecteerd op de eenheidsvector van de snelheid. Deze aanpassing sluit aan bij de energie gebaseerde formulering van JE. In die formulering vertegenwoordigt de teller de verandering in kinetische energie, die volgens het arbeid-energietheorema overeenkomt met de verrichte arbeid. Arbeid wordt bepaald door het scalair product van de kracht en de verplaatsingsrichting. Op analoge wijze kan daarom de component van de versnelling in de bewegingsrichting worden bepaald door het scalair product van de versnellingsvector en de eenheidsvector van de snelheid. Dit leidt tot de volgende formulering:

$$JE = \frac{\vec{a} \cdot \vec{v}}{g} \quad (15)$$

Om deze formule toe te passen in Excel, werden de volgende stappen uitgevoerd.

$$\vec{a} \cdot \vec{v} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = a_x v_x + a_y v_y \quad (16)$$

$$|v| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (17)$$

Als dit dan allemaal wordt samengevoegd wordt de volgende formule verkregen:

$$JE = \frac{a_x v_x + a_y v_y}{g \sqrt{v_x^2 + v_y^2}} \quad (18)$$

In Excel werd deze formule als volgt berekend: voor de data van het experiment waren de snelheden reeds opgesplitst in longitudinaal en lateraal. Eerst werden $a_x v_x$ en $a_y v_y$ apart berekend, hierna werd de vierkant wortel berekend die ons eigenlijk gewoon de snelheid geeft. Tot slot is alles samengevoegd zoals in formule (18). Tot slot werden alle negatieve waarden dan weer omgezet naar nul en werd van de hele set het gemiddelde genomen. De benadering via de eenheidsvector zal in het vervolg ook als AJE_{ev} genoteerd worden.

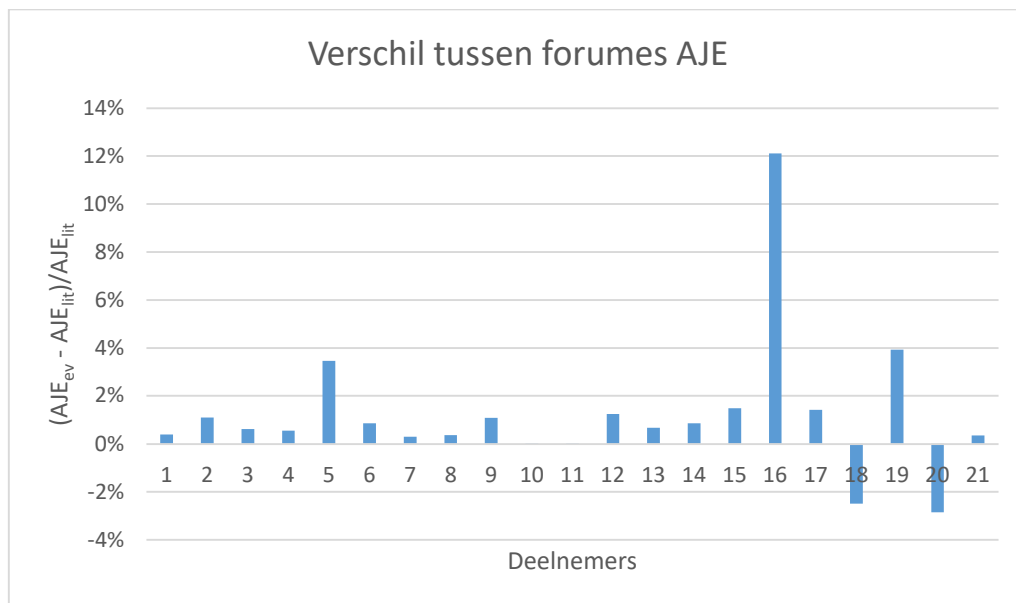
5.3.3 Verschil formules AJE

Theoretisch gezien zouden beide benaderingen van de formules voor JE en dus AJE hetzelfde moeten zijn. Toch is er vastgesteld dat er kleine verschillen zijn tussen de twee. Dit kan verklaard worden doordat het tijdsinterval toch niet klein genoeg is en hierdoor in de berekeningen verschillen ontstaan.

Het verschil tussen beide benaderingen is klein. Om deze verschillen duidelijk te maken, werd het percentuele verschil tussen beide berekend als $(AJE_{ev} - AJE_{lit}) / AJE_{lit}$, wat duidelijk te beoordelen valt. Het verschil in absolute waarde met de formule a/g is echter wel zeer groot: voor testpersoon 1 levert de AJE_{ev} een waarde van $0,00095 \text{ m/s}^2$ op, terwijl de de simpele formule a/g een waarde van $0,00381 \text{ m/s}^2$ geeft. Dit komt neer op een factor van bijna 25 terwijl de formule via de eenheidsvector en de formule van de literatuur slechts een factor 0,4% verschillen.

Als er gekeken word naar de verschillen bij de andere testpersonen tussen de formule via de eenheidsvector en deze beschreven in de literatuur is het grootste verschil 12,118% (uitgedrukt als percentage van AJE_{lit}), dit is het geval bij proefpersoon 16. Het gemiddelde verschil genomen met de absolute waardes was gelijk aan 1,721%. Op figuur 2 zijn de percentuele verschillen weergegeven. Voor de positieve verschillen betekent het dat de formule met de eenheidsvector groter was dan de formule van de literatuur. Interessant om nog te bekijken in figuur 2 is dat testpersonen achttien en twintig de enige zijn waar de formule van de literatuur groter was dan die van de eenheidsvector. Ook

springt deelnemer zestien er bovenuit met het verschil van meer dan 12%. Er kan wel geconcludeerd worden dat beide formules voldoende overeenkomen met elkaar. Dus beide kunnen gebruikt worden voor verder onderzoek.



Figuur 3 Verschil tussen formules AJE
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort* (2026)

5.4 Problemen met data

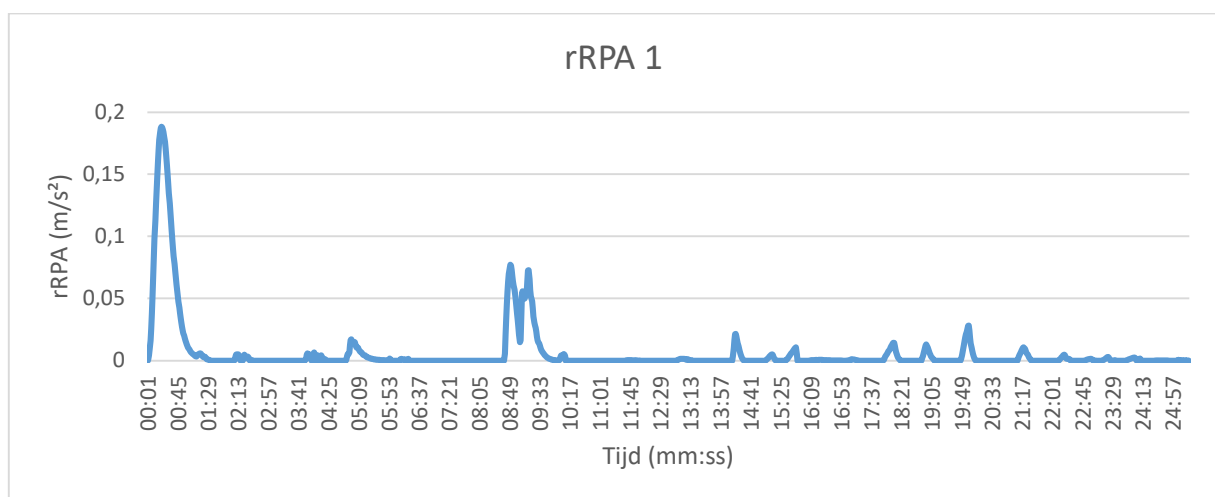
Tijdens het experiment bleek dat de beginsituatie niet voor alle deelnemers identiek was. Deelnemers 1 tot en met 9 startten vanuit stilstand, terwijl de overige deelnemers het geregistreerde traject reeds met een bepaalde snelheid aanvatten. Voor de meeste deelnemers bedroeg deze beginsnelheid ongeveer 4,12 m/s, met uitzondering van deelnemer 16 en 17, die respectievelijk met 7,00 m/s en 3,70 m/s begonnen. Daarnaast kregen pas vanaf deelnemer 16 de deelnemers de instructie om de telegraaf reeds vóór de start van het traject vooruit te zetten. Hierdoor verloren deelnemers 10 tot en met 15 aanvankelijk snelheid, die zij vervolgens opnieuw moesten opbouwen. Deze verschillen in beginsituatie vormen een minder ideale uitgangspositie voor een onderlinge vergelijking.

Dit verschil is voornamelijk relevant voor de berekening van de RPA. In de RPA-formule wordt de snelheidsverandering bepaald op basis van de snelheid één seconde vóór en één seconde na het beschouwde tijdstip. Voor de eerste berekende RPA-waarde is daardoor ook een snelheid vóór het begin van het geregistreerde traject nodig. In dit onderzoek wordt hiervoor uitgegaan van 0 m/s. Bij deelnemers die het traject reeds met

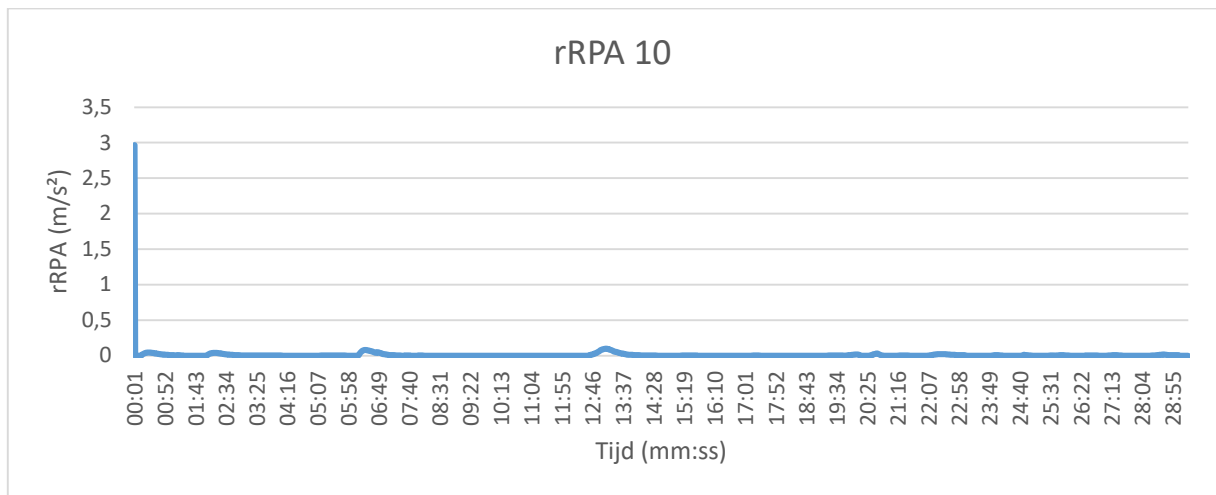
een bepaalde beginsnelheid aanvatten, wordt op deze manier rekening gehouden met de initiële kinetische toestand die nodig is om deze snelheid te bereiken.

De eerste RPA-waarde moet daarbij niet worden geïnterpreteerd als een werkelijk gemeten versnelling van 0 m/s tot de volledige beginsnelheid binnen één seconde. Ze wordt gebruikt als een methodologische correctie om rekening te houden met de verschillende beginsnelheden. Zonder deze correctie zouden deelnemers die reeds met een hogere snelheid aan het geregistreerde traject begonnen een voordeel krijgen ten opzichte van deelnemers 1 tot en met 9, die tijdens het geregistreerde traject daadwerkelijk vanuit stilstand moesten versnellen.

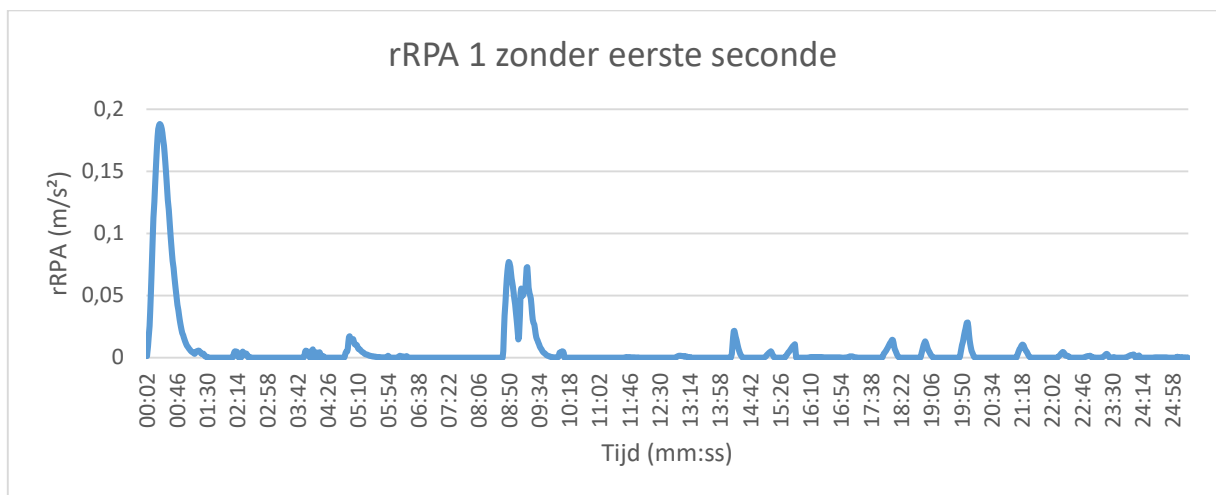
Deze correctie heeft vooral een zichtbaar effect op de rRPA aan het begin van het traject. Zoals weergegeven in figuur 4 is de rRPA van deelnemer 10 tijdens de eerste seconde zeer hoog. Hierdoor wordt de schaal van de grafiek sterk door deze eerste piek bepaald en zijn de kleinere variaties tijdens de rest van het traject moeilijker zichtbaar. Bij deelnemer 1 is dit effect veel kleiner, aangezien deze deelnemer vanuit stilstand begon. Om het verloop van de rRPA duidelijker weer te geven, wordt de eerste seconde daarom uitsluitend in de grafieken weggelaten. Figuren (3 en 4) tonen de rRPA met de eerste seconde, terwijl in figuren (5 en 6) dezelfde gegevens zonder deze eerste seconde worden weergegeven.



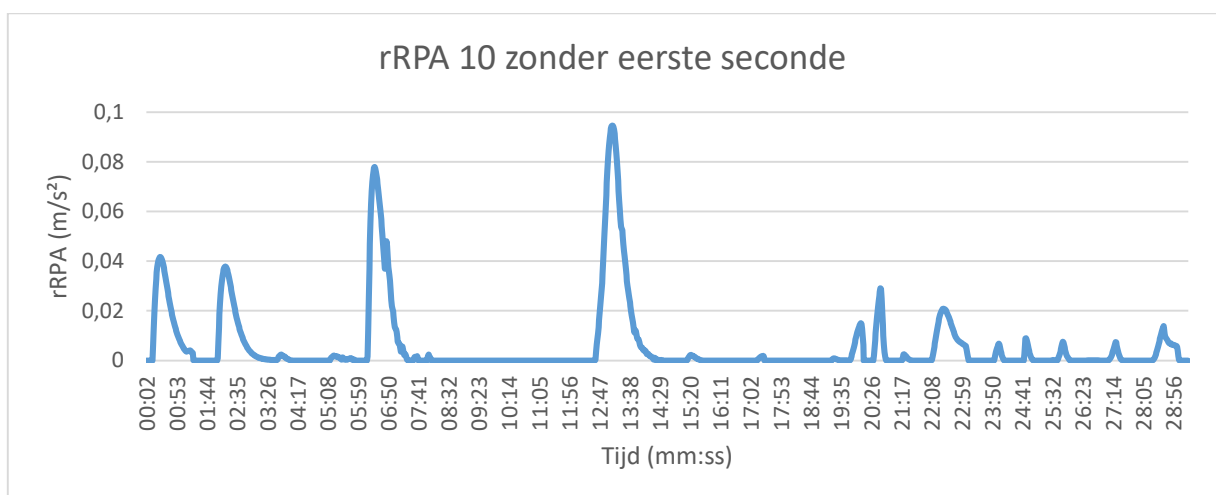
Figuur 4 rRPA deelnemer 1
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*



Figuur 5 rRPA deelnemer 10
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*



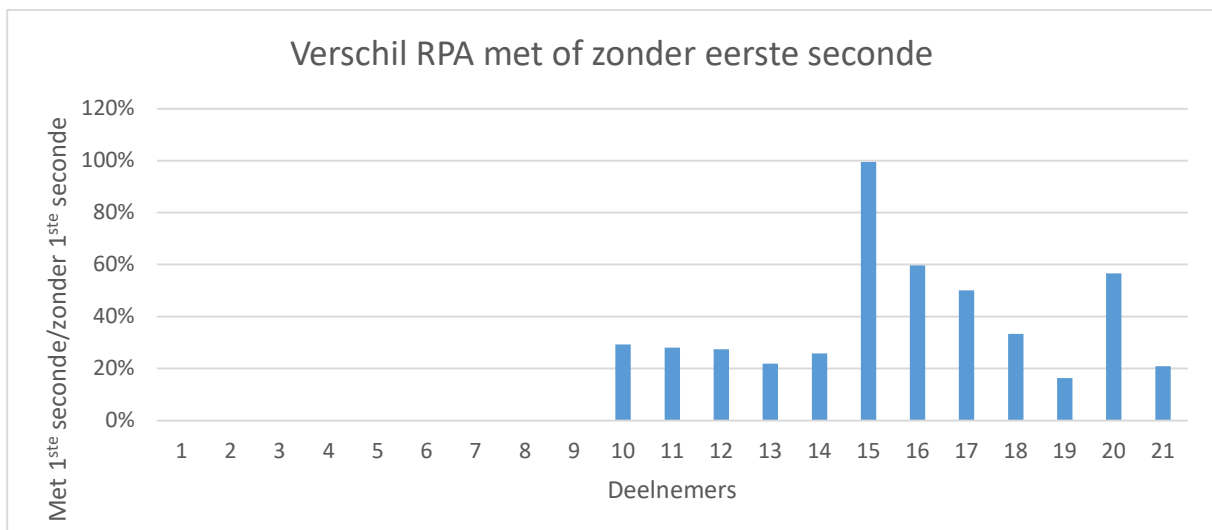
Figuur 6 rRPA deelnemer 1 zonder eerste seconde
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*



Figuur 7 rRPA deelnemer 10 zonder eerste seconde
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

Voor de berekening van de uiteindelijke RPA-waarde over het volledige traject wordt de eerste seconde daarentegen wel meegenomen. De energie die nodig is om een schip vanuit stilstand tot een snelheid van ongeveer 4 m/s te brengen, is aanzienlijk. Wanneer de eerste seconde bij deelnemers die reeds met deze snelheid aan het geregistreerde traject begonnen volledig zou worden weggelaten, zou deze initiële toestand niet worden meegenomen in hun RPA-waarde. Bij deelnemers 1 tot en met 9 wordt de versnelling vanuit stilstand daarentegen automatisch geregistreerd tijdens het traject.

De invloed hiervan werd onderzocht door de RPA-waarden met en zonder de eerste seconde te vergelijken, zoals weergegeven in figuur 7. Voor deelnemers 10 tot en met 21 werd gemiddeld een verschil van 39% vastgesteld. Bij deelnemer 15 leidde het weglaten van de eerste seconde zelfs tot ongeveer een halvering van de uiteindelijke RPA-waarde. Dat het verschil voornamelijk bij deze deelnemers zichtbaar is, kan worden verklaard door hun hogere beginsnelheid. De eerste berekende RPA-waarde vertegenwoordigt bij hen een relatief groot aandeel van de totale RPA. Bij deelnemers 1 tot en met 9 waren de snelheden tijdens de eerste meetmomenten daarentegen nog nul of zeer laag, waardoor de eerste afzonderlijke RPA-waarde slechts een beperkte bijdrage levert.



Figuur 8 Verschil RPA met of zonder eerste seconde
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

Het weglaten van de eerste seconde bij de rRPA-grafieken betreft bijgevolg uitsluitend een keuze voor de visualisatie van de resultaten. Voor de berekening en vergelijking van de uiteindelijke RPA-waarden wordt steeds het volledige traject, inclusief de eerste seconde, gebruikt.

5.5 Varen of manoeuvreren

Voor het experiment legden alle deelnemers hetzelfde traject af: van een beginpunt naar een ligplaats waar ze de sleepboot moesten aanleggen. Dat traject kan logisch worden opgesplitst in twee delen: een eerste deel waarin men voornamelijk “regulier vaart” en een tweede deel waarin men duidelijk aan het manoeuvreren is. Omdat deze twee fasen een verschillend dynamisch profiel hebben, is het zinvol om ze afzonderlijk te analyseren.

Om deze opdeling te maken, is bewust gekozen voor een methode die volledig gebaseerd is op snelheidsdata, omdat alle ADM's ook enkel gebruiken maken van deze data en hierdoor minder data moet worden bewaard. Zo blijft de aanpak ook bruikbaar voor grotere datasets en voor schepen die verschillende trajecten afleggen, zonder dat telkens handmatig moet worden bepaald waar het manoeuvreren begint. De classificatie moet reproduceerbaar zijn en niet afhankelijk van visuele interpretatie van de positie van het schip.

5.5.1 Parameters voor onderscheid tussen regulier varen en manoeuvreren

Er werden drie variabelen geselecteerd om te bepalen of een datapunt tot manoeuvreren behoort of niet.

Verhouding laterale en totale snelheid

Als parameter werd de verhouding tussen de laterale snelheid en de totale snelheid geselecteerd. Tijdens manoeuvres neemt het relatieve aandeel van de laterale snelheidscomponent doorgaans toe, aangezien het schip zich niet uitsluitend in voorwaartse richting verplaatst, maar ook dwarsscheepse bewegingen uitvoert. Dergelijke bewegingen kunnen worden veroorzaakt door de inzet van sleepboten of door het gebruik van de eigen boeg- en hekschroeven. Een verhouding groter dan 15% werd gehanteerd als grenswaarde voor het identificeren van manoeuvreergedrag.

Root Mean Square

Daarnaast werd de *Root Mean Square* (RMS) van de versnelling als parameter opgenomen, omdat deze de algemene dynamiek van de scheepsbeweging samenvat in één positieve waarde (Wikipedia-bijdragers, 2025). Bij de berekening worden zowel de longitudinale als de laterale versnellingscomponent in rekening gebracht. Dit is relevant

voor de identificatie van manoeuvres, aangezien een schip tijdens het manoeuvreren zowel in longitudinale als in laterale richting van snelheid kan veranderen.

Door de versnellingscomponenten te kwadrateren, wegen grotere versnellingen en vertragingen sterker door in het uiteindelijke resultaat. Bovendien worden positieve en negatieve versnellingen op dezelfde wijze gewaardeerd, waardoor tegengestelde waarden elkaar niet kunnen opheffen. Hierdoor kan de RMS-waarde bijdragen aan een duidelijker onderscheid tussen manoeuvreren en normale vaart.

De RMS-waarde werd berekend aan de hand van een lopend tijdvenster van 60 seconden. Het gebruik van een dergelijk venster vermindert de gevoeligheid van de parameter voor kortstondige versnellingen en lokale meetfluctuaties, terwijl aanhoudende veranderingen in de scheepsdynamiek behouden blijven.

Vervolgens werd de RMS-waarde binnen elk tijdvenster vergeleken met de gemiddelde RMS-waarde over het volledige traject. Wanneer de lokale RMS-waarde groter is dan 70% van dit trajectgemiddelde, werd dit beschouwd als een indicatie dat het schip zich in een manoeuvreerfase bevond.

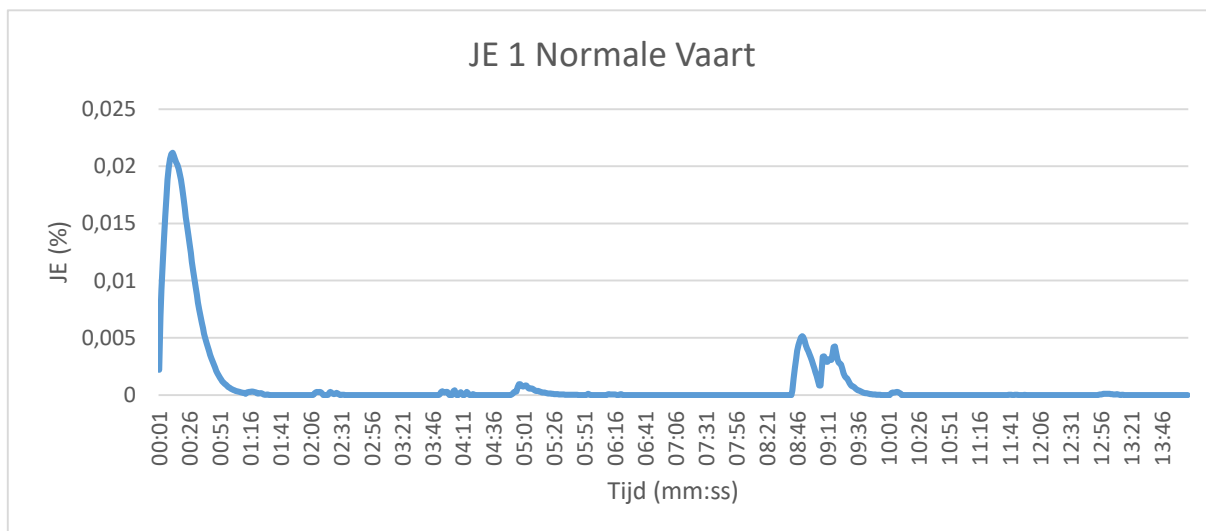
Totale snelheid en gemiddelde snelheid

Daarnaast werd de totale snelheid vergeleken met de gemiddelde snelheid over het volledige traject. Deze parameter werd opgenomen omdat manoeuvres doorgaans bij lagere snelheden worden uitgevoerd dan reguliere vaart. Een datapunt werd als indicatief voor manoeuvreren beschouwd wanneer de totale snelheid kleiner was dan 70% van de gemiddelde snelheid van het traject.

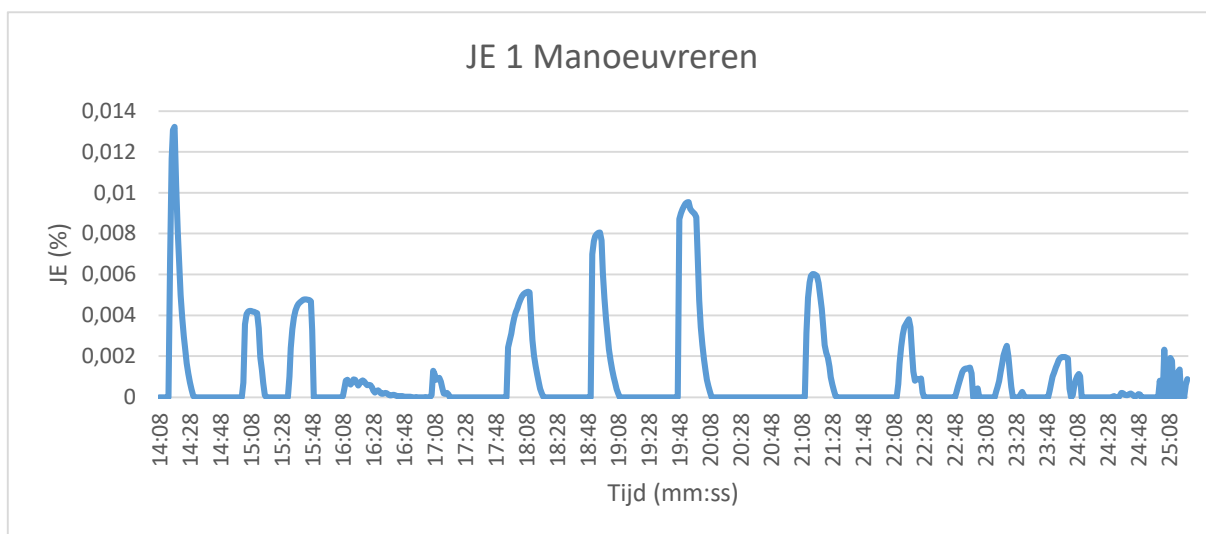
5.5.2 Classificatie regulier varen en manoeuvreren

Een datapunt werd geclassificeerd als manoeuvreren wanneer het aan minstens twee van deze drie voorwaarden voldeed. Deze regel zorgt ervoor dat de methode robuust is: één enkele afwijking hoeft nog geen manoeuvre te betekenen, maar wanneer twee variabelen gelijktijdig een afwijking tonen, is de kans groot dat het schip effectief aan het manoeuvreren is. De drempelwaardes zijn niet willekeurig gekozen, maar gebaseerd op een eerste analyse van de positie van de schepen en de bijbehorende snelheidsprofielen. Daarna werden ze steekproefsgewijs getest bij andere deelnemers totdat de opdeling tussen varen en manoeuvreren een consistent en realistisch beeld gaf.

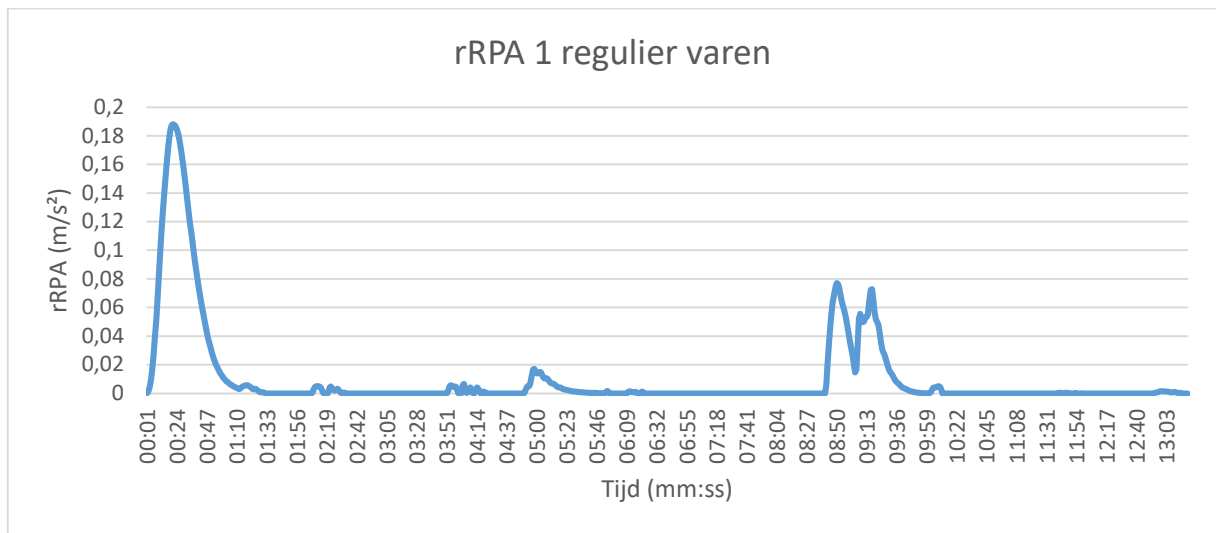
Onderstaande figuren (8, 9, 10 en 11) tonen de opdeling tussen varen en manoeuvreren voor een voorbeeldtraject:



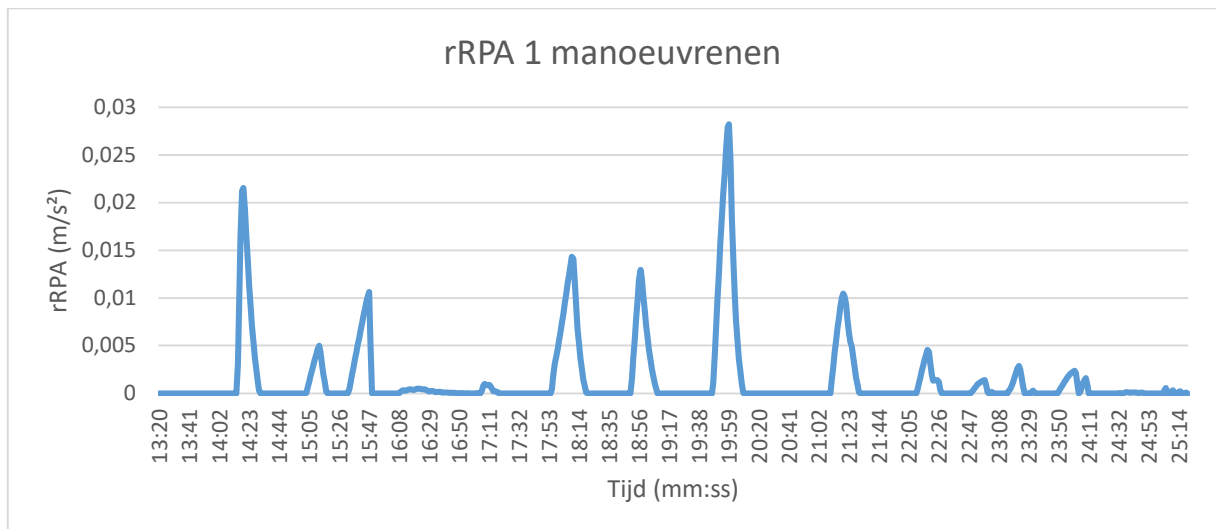
Figuur 9 JE deelnemer 1 regulier varen
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*



Figuur 10 JE deelnemer 1 manoeuvreren
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*



Figuur 11 rRPA deelnemer 1 regulier varen
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*



Figuur 12 rRPA deelnemer 1 manoeuvren
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

Er valt op dat de absolute waarden van de pieken tijdens het varen veel hoger zijn maar dat er wel meer pieken zijn tijdens het manoeuvren ook al zijn deze pieken wel duidelijk lager. Als we kijken naar de RPA-waardes voor de onderverdeling is de RPA-waarde van het manoeuvren groter dan die van het varen. De RPA-waardes voor deelnemer 1 zijn respectievelijk: 0,006744 m/s² tijdens het manoeuvren en 0,006105 m/s² tijdens de reguliere vaart.

Een alternatieve benadering zou erin bestaan de reguliere vaart verder op te delen in rechte trajectdelen en bochten. Deze indeling is echter minder geschikt, aangezien koerswijzigingen niet noodzakelijk wijzen op manoeuvreergedrag. Tijdens een normale

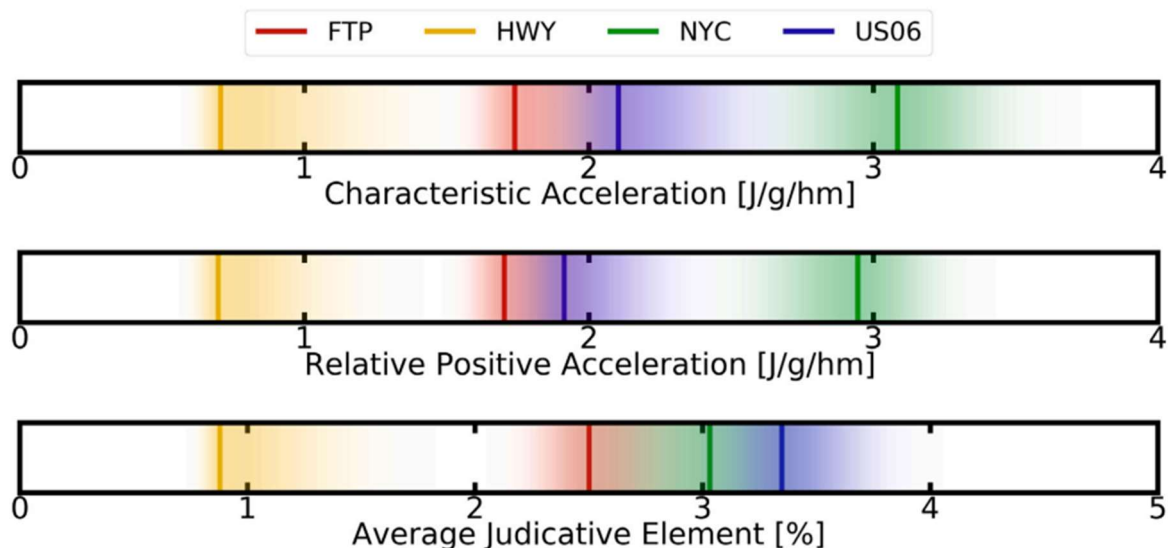
verplaatsing, bijvoorbeeld van de ene kaai naar de andere, zal een schip eveneens bochten uitvoeren. Dergelijke koersveranderingen maken deel uit van de reguliere vaart en mogen daarom niet automatisch als manoeuvres worden geclassificeerd.

Ter verduidelijking kan een vergelijking worden gemaakt met het praktische autorijexamen. Daarbij wordt doorgaans een onderscheid gemaakt tussen specifieke manoeuvres, zoals parkeren en achteruitrijden, en het rijden op de openbare weg. Tijdens dit tweede gedeelte worden eveneens bochten genomen, maar deze behoren tot het normale rijgedrag en worden niet als afzonderlijke manoeuvres beschouwd. Op vergelijkbare wijze moeten koersveranderingen tijdens een regulier vaartraject worden onderscheiden van specifieke manoeuvreerhandelingen.

5.6 Vergelijken met autosector

Wanneer de waarden uit dit onderzoek worden vergeleken met wat in de literatuur wordt gerapporteerd voor de autosector, valt onmiddellijk op dat de schaal waarop ADM-parameters voorkomen volledig anders is. In studies over wegverkeer worden waarden voor AJE, RPA en CA doorgaans gerapporteerd tussen 0 en 4 J/g/hm, zoals beschreven door Edwards (2022). De eenheid J/g/hm is echter geen standaard SI-eenheid. Eén J/g/hm komt overeen met 10 m/s^2 , waardoor de waarden uit de autosector in SI-termen tussen 0 en 40 m/s^2 liggen.

De parameter AJE is dimensie loos, waardoor deze, in tegenstelling tot RPA en CA, wel rechtstreeks kan worden vergeleken tussen sectoren. Voor RPA en CA moet eerst een conversie worden uitgevoerd om de waarden op dezelfde schaal te plaatsen.



Figuur 13 ADM-waarden en -bereiken op basis van de EPA-snelheidsschema's. De verticale lijnen geven de ADM-waarden aan bij toepassing van de exacte EPA-snelheidsschema's. De gearceerde gebieden geven het bereik aan van ADM-waarden die zijn verkregen door de EPA-snelheidsschema's aan te passen om verschillende mate van snelheidsschommelingen te verkrijgen, waarbij de EPA-snelheidstoleranties worden gerespecteerd. De ADM-waarden en -bereiken van de FTP, HWY, NYC en US06 zijn respectievelijk weergegeven in rood, geel, groen en blauw.

Bron: Edwards (2022)

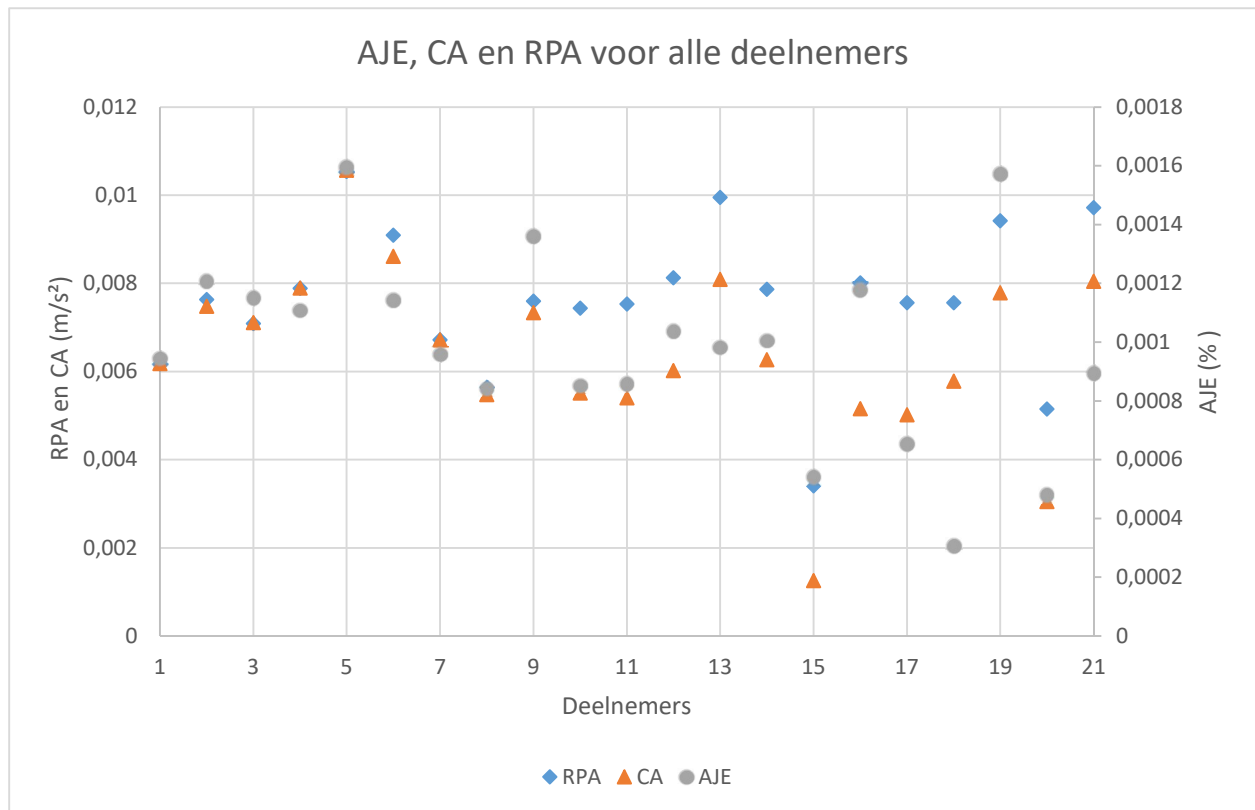
Wanneer we een gemiddelde waarde van 2 J/g/hm uit de autosector nemen of dus 20 m/s² in SI-eenheden en deze vergelijken met de resultaten uit het experiment, wordt het enorme schaalverschil duidelijk. De gemiddelde RPA-waarde in de scheepvaart bedraagt 0,00763 m/s², wat neerkomt op een factorverschil van ongeveer 2600. Voor CA, met een gemiddelde waarde van 0,00642 m/s², bedraagt het verschil zelfs ongeveer 3100.

Voor AJE is de vergelijking eenvoudiger. In de autosector wordt een gemiddelde waarde van ongeveer 2,5% gerapporteerd, terwijl in de scheepvaart een gemiddelde van 0,00019% werd gevonden. Dit komt overeen met een factorverschil van ongeveer 2500.

Deze verschillen tonen aan dat ADM-waarden uit de scheepvaart niet rechtstreeks kunnen worden vergeleken met die uit de autosector. De schaal waarop dynamische variaties optreden, is in de scheepvaart veel kleiner, omdat schepen een veel grotere massa hebben, trager reageren op stuur- en snelheidscommando's en doorgaans met een veel lagere versnelling opereren dan voertuigen op de weg. ADM-parameters zijn in de scheepvaart daarom vooral nuttig om deelnemers onderling te vergelijken, en minder om absolute waarden te vergelijken met de autosector of zelfs andere soorten schepen.

5.7 Vergelijkende analyse van ADM-waarden tussen deelnemers

Wanneer de ADM-waarden over het volledige traject worden geanalyseerd, valt op dat de verdeling tussen deelnemers niet uniform is en bovendien verschilt per parameter. Dit wordt duidelijk zichtbaar in de figuur 13:



Figuur 14 ADM's geplot voor alle deelnemers
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

Uit deze figuur 13 blijkt dat deelnemer 5 bij alle ADM's naar voren komt als de meest agressieve deelnemer. Dit betekent dat deze persoon het meest dynamische vaargedrag vertoonde, met de grootste variaties in snelheid en versnelling. De volgorde van de daaropvolgende deelnemers verschilt echter per parameter, wat aangeeft dat elke ADM een ander aspect van dynamiek meet.

Zo is deelnemer 15 de beste bij zowel RPA als CA, terwijl deelnemer 18 de beste is bij AJE. Dit verschil toont aan dat de parameters niet identiek reageren op dezelfde vaargedragingen. RPA en CA zijn gevoeliger voor positieve versnellingen en veranderingen in kinetische energie, terwijl AJE een bredere maat is die zowel versnelling als potentiële energieveranderingen (in de autosector) omvat en in de scheepvaart vooral de zuivere versnelling normaliseert ten opzichte van g .

Daarnaast valt op dat de clusters van de meest agressieve en minst agressieve deelnemers niet consistent zijn tussen de verschillende ADM's. Een deelnemer die bij één parameter goed scoort, kan bij een andere parameter minder goed presteren. Dit ondersteunt het idee dat ADM's complementair zijn: geen enkele parameter geeft op zichzelf een volledig beeld van agressief vaargedrag. Pas wanneer de parameters samen worden bekeken, ontstaat een genuanceerd inzicht in hoe dynamisch een deelnemer vaart.

6 Rangschikking van deelnemers

De deelnemers zullen nu per ADM gerangschikt worden om zo een overzicht te geven wie waar de beste is. In tabel 4 wordt vastgesteld dat volgens AJE de beste deelnemer 18 is en de slechtste deelnemer, deelnemer 5 is. Het verschil tussen deze twee deelnemers is een factor van vijf. Er is volgens AJE dus een grote verbetering mogelijk voor de deelnemers om minder agressief te varen.

Verder zal de rangschikking van de formules volgens de literatuur ook nog bekeken worden. Het enige verschil tussen de formules is de positie van deelnemer 16: bij de formule met de eenheidsvector bevindt deze zich plek zeventien en bij deze volgens de literatuur op plek veertien, zie tabellen 4 en 5. Voor het vervolg van de vergelijkingen zal verdergegaan worden met de rangorde gebruik makende van de eenheidsvector.

Tabel 4 Rangschikking volgens AJE eenheidsvector
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort* (2026)

Deelnemers	AJE eenheidsvector (%)
18	0,000306705
20	0,000481463
15	0,000542588
17	0,000653341
8	0,000841843
10	0,00085319
11	0,000858013
21	0,000894101
1	0,000945523
7	0,000959035
13	0,000982798
14	0,001005197
12	0,001038326
4	0,001109005
6	0,00114235
3	0,001150609
16	0,001178562
2	0,001207463
9	0,001360442
19	0,001573323
5	0,001595574

Tabel 5 Rangschikking volgens AJE literatuur
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort* (2026)

Deelnemers	AJE literatuur (%)
18	0,000314541
20	0,000495648
15	0,000534682
17	0,000644184
8	0,000838832
10	0,000853066
11	0,000857908
21	0,000897198
1	0,000941834
7	0,000956242
13	0,000976308
14	0,000996604
12	0,001025568
16	0,001051179
4	0,001103012
6	0,001132593
3	0,001143536
2	0,001194399
9	0,001345863
19	0,001513896
5	0,001542233

In tabel 6 wordt de rangschikking volgens RPA weergegeven. Hier is deelnemer 15 de minst agressieve en is deelnemer 5 weer de meeste agressieve. Het verschil hier is minder groot dan bij AJE: een factor drie. Er zou hier dus minder mogelijkheid zijn voor verbetering.

Dan voor de laatste ADM, CA, is de verdeling zoals weergegeven in tabel 7. Hier is de verdeling heel gelijkend op RPA, al zijn er toch enkele verschillen. Wel blijven de minst en meest agressieve testpersonen dezelfde. Het verschil tussen beide is hier ook groter dan bij RPA maar minder dan bij AJE: het bedraagt een factor negen.

Tabel 6 Rangschikking volgens RPA
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort* (2026)

Deelnemers	RPA (m/s ²)
15	0,003412145
20	0,005156135
8	0,005646515
1	0,006176883
7	0,006721672
3	0,007096745
10	0,007441807
11	0,007537833
17	0,007565547
18	0,007565547
9	0,007603598
2	0,007642086
14	0,0078751
4	0,007890314
16	0,00801406
12	0,008131027
6	0,009097033
19	0,009429578
21	0,009726121
13	0,009958425
5	0,010546692

Tabel 7 Rangschikking volgens CA
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort* (2026)

Deelnemers	CA (m/s ²)
15	0,001261022
20	0,003054391
17	0,005026934
16	0,005162966
11	0,005406794
8	0,005479633
10	0,005516183
18	0,005790073
12	0,006028142
1	0,006185321
14	0,006270867
7	0,006726295
3	0,007116816
9	0,007339529
2	0,007488133
19	0,007791389
4	0,007902512
21	0,008055424
13	0,008096102
6	0,008618362
5	0,010576368

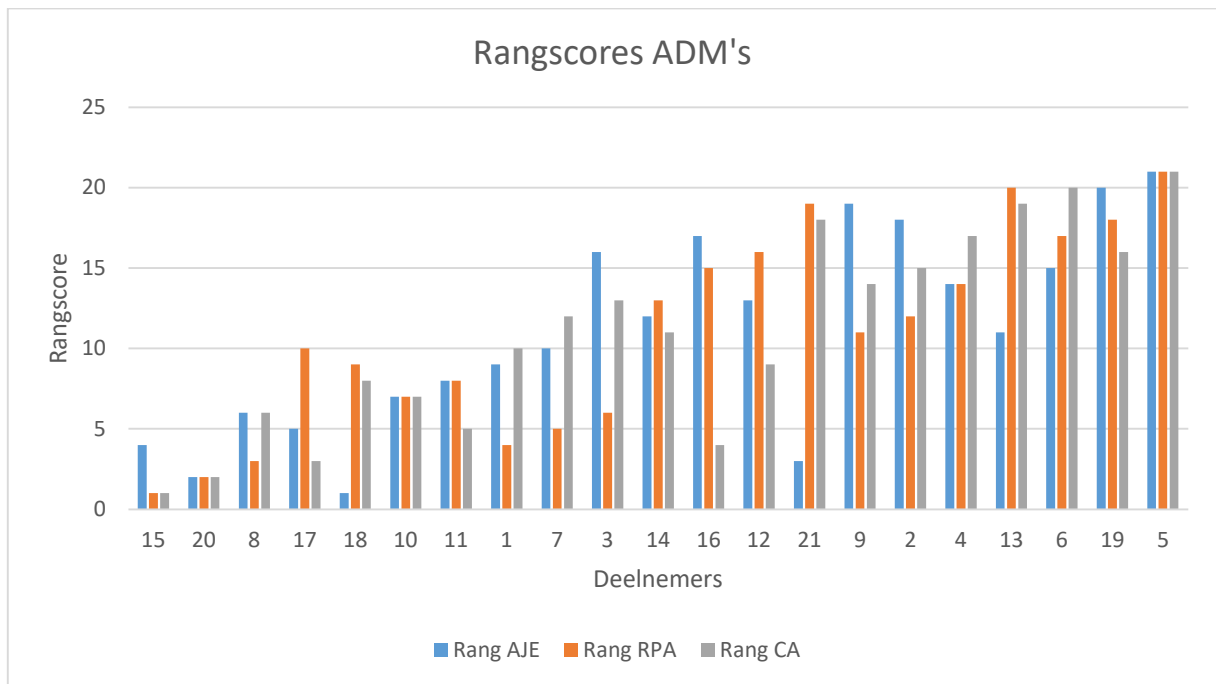
Om de deelnemers te vergelijken, werd voor elke ADM een rangorde opgesteld. Elke parameter kreeg een gelijke weging, zodat de totale score eenvoudig kon worden bepaald door het gemiddelde te nemen van al deze rangen. De resulterende rangorde is weergegeven in de tabel (8). Ook werd de standaardafwijking berekend per deelnemer om te zien in welke mate de rangschikkingen met elkaar overeenkwamen of niet. Voor de meeste deelnemers is er een goede overeenkomst tussen de verschillende ADM's; de vier deelnemers met de grootste afwijking zijn deelnemers 21, 16, 3 en 13.

Tabel 8 Rangschikking volgens ADM's met standaard afwijking
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

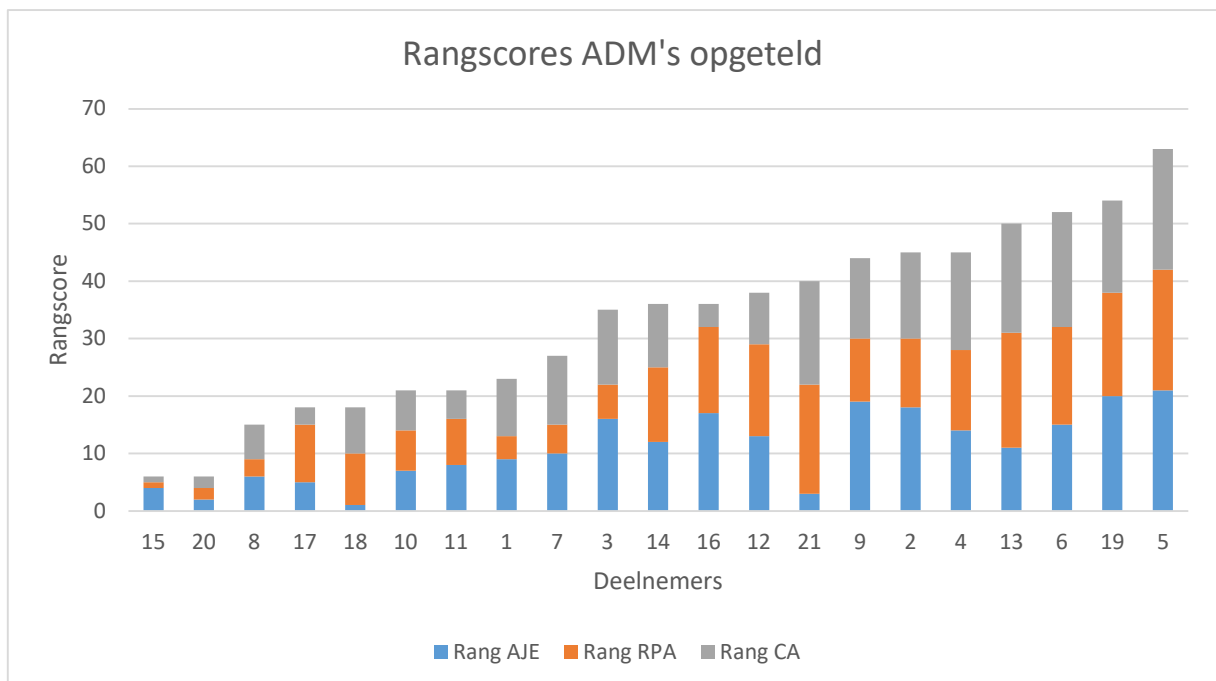
Deelnemers	Rang AJE	Rang RPA	Rang CA	Gemiddelde	Standaard afwijking
15	4	1	1	2	1,414213562
20	2	2	2	2	0
8	6	3	6	5	1,414213562
18	1	9	8	6	3,559026084
17	5	10	3	6	2,943920289
10	7	7	7	7	0
11	8	8	5	7	1,414213562
1	9	4	10	7,666667	2,624669291
7	10	5	12	9	2,943920289
3	16	6	13	11,66667	4,18993503
14	12	13	11	12	0,816496581
16	17	15	4	12	5,715476066
12	13	16	9	12,66667	2,867441756
21	3	19	18	13,33333	7,318166133
9	19	11	14	14,66667	3,299831646
2	18	12	15	15	2,449489743
4	14	14	17	15	1,414213562
13	11	20	19	16,66667	4,027681991
6	15	17	20	17,33333	2,054804668
19	20	18	16	18	1,632993162
5	21	21	21	21	0

Om deze scores visueel te verduidelijken, werden figuren 14 en 15 opgesteld. Figuur 14 heeft alle ADM's apart geplot en de deelnemers van minst agressief naar meest agressief gerangschikt. In figuur 15 werden de rangscores opgeteld en zo weergegeven. Uit figuur 14 blijkt dat AJE enkele duidelijke uitschieters vertoont die niet zichtbaar zijn bij RPA of CA. Dit geldt vooral voor deelnemers 13, 21 en 18, die bij AJE een opvallend betere score hebben dan bij de andere ADM's. Daarnaast valt op dat deelnemers 5, 10 en 20 voor alle ADM's exact dezelfde rang hebben gekregen, wat wijst op een consistent dynamisch profiel dat door alle parameters op dezelfde manier wordt beoordeeld.

Wanneer de rangorden worden gestapeld, ontstaat een duidelijker beeld van de totale agressiviteit per deelnemer. In figuur 15 is te zien dat er een ex aequo is voor de eerste plaats, maar dat het verschil tussen deze twee koplopers en de rest van de groep aanzienlijk is. Dit toont aan dat agressief vaargedrag zich bij sommige deelnemers veel sterker manifesteert dan bij andere.



Figuur 15 Rangscores van de verschillende ADM's per deelnemer
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*



Figuur 16 Rangcores van de verschillende ADM's per deelnemer opgeteld
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

De laatste ranking waarnaar gekeken zal worden, is deze genomen van het *GreenPort* onderzoek. Deze rangschikt de deelnemers volgens brandstofverbruik, zie tabel 9.

Tabel 9 Rangschikking volgens brandstof verbruik
Bron: *GreenPort* (2025)

Deelnemers	Totaal brandstof verbruik (m ³)
8	30,2022
13	35,76295
10	37,94916
11	41,2088
20	44,34154
21	46,39858
15	47,7469
1	52,52389
17	53,31869
6	58,03577
12	60,92286
19	64,19544
7	64,37993
3	65,46228
2	65,83823
16	67,46373
4	67,91383
14	71,88811
18	73,30829
9	73,77909
5	78,26807

Tot slot kan de rangschikking op basis van het brandstofverbruik worden vergeleken met de uiteindelijke rangschikking op basis van de gemiddelde ADM-score, zoals weergegeven in tabel 10. Daarbij is er vooral overeenstemming over de deelnemer met de slechtste prestatie. Deelnemer 5 heeft het hoogste brandstofverbruik en komt eveneens bij de ADM's naar voren als de meest agressieve deelnemer.

Voor de best presterende deelnemer is deze overeenkomst minder duidelijk. Op basis van het brandstofverbruik behaalt deelnemer 8 de beste score, terwijl deze deelnemer bij AJE op de zesde plaats, bij RPA op de derde plaats en bij CA eveneens op de zesde plaats staat. Dit toont aan dat een laag brandstofverbruik niet noodzakelijk overeenkomt met de beste score voor de afzonderlijke ADM's.

De verhouding tussen de hoogste en laagste waarde bedraagt binnen de rangschikking op basis van brandstofverbruik ongeveer 2,6. Dit is de kleinste verhouding van alle opgestelde rangschikkingen en wijst bijgevolg op een relatief beperkte spreiding tussen de deelnemers. Hierdoor is ook de theoretische verbeteringsmarge ten opzichte van de best presterende deelnemer kleiner dan bij de afzonderlijke ADM-rangschikkingen. Voor

de overige deelnemers vertoont de rangschikking op basis van brandstofverbruik slechts een beperkte overeenkomst met de rangschikkingen volgens de ADM's.

Tabel 10 Vergelijking tussen rangschikking volgens verbruik en ADM
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

Deelnemers	Rang verbruik	Rang ADM
1	8	8
2	15	16
3	14	10
4	17	16
5	21	21
6	10	19
7	13	9
8	1	3
9	20	15
10	3	6
11	4	6
12	11	13
13	2	18
14	18	11
15	7	1
16	16	11
17	9	4
18	19	4
19	12	20
20	5	1
21	6	14

Om dit verder te bestuderen, werden de rangschikkingen volgens de ADM's en de rangschikking volgens brandstofverbruik samengevoegd tot één gemiddelde rangschikking met standaardafwijking, zie tabel 11. Tegen opzichte van de vergelijking tussen enkel de ADM's valt hierop dat de standaardafwijkingen hoger liggen, wat erop wijst dat de rangschikking volgens brandstofverbruik afwijkt van de rangschikkingen volgens de ADM's. Dit is ook berekend geweest aan de hand van Kendall's coëfficiënt van overeenstemming. Voor de drie ADM's kwam deze uit op een waarde van 0,7436675, voor de drie ADM's en het brandstof verbruik kwam deze uit op 0,6330979. Dit toont dus aan dat er meer correlatie is tussen de ADM's onderling dan tussen de ADM's en het brandstofverbruik.

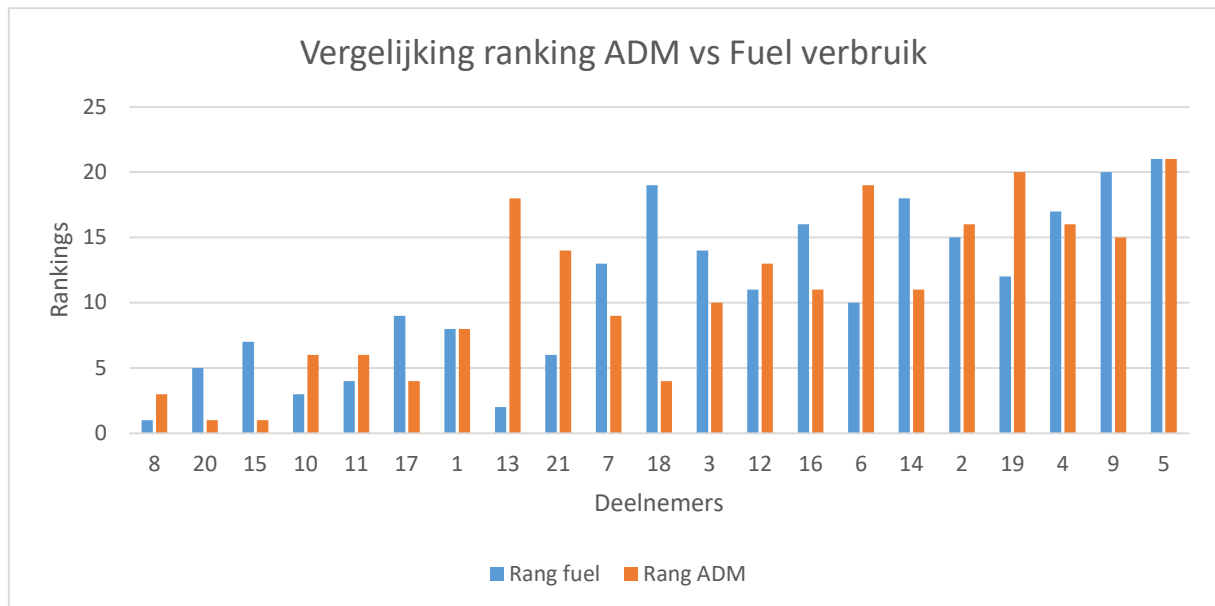
Tabel 11 Rang en voor ADM's en verbruik met gemiddelde en standaardafwijking
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

Deelnemers	Rang AJE	Rang RPA	Rang CA	Rang verbruik	Gemiddelde	Standaardafwijking
20	2	2	2	5	2,75	1,299038106
15	4	1	1	7	3,25	2,487468593
8	6	3	6	1	4	2,121320344
10	7	7	7	3	6	1,732050808
11	8	8	5	4	6,25	1,785357107
17	5	10	3	9	6,75	2,861380786
1	9	4	10	8	7,75	2,277608395
18	1	9	8	19	9,25	6,417748826
7	10	5	12	13	10	3,082207001
21	3	19	18	6	11,5	7,088723439
3	16	6	13	14	12,25	3,766629793
12	13	16	9	11	12,25	2,586020108
13	11	20	19	2	13	7,245688373
16	17	15	4	16	13	5,244044241
14	12	13	11	18	13,5	2,692582404
2	18	12	15	15	15	2,121320344
4	14	14	17	17	15,5	1,5
6	15	17	20	10	15,5	3,640054945
9	19	11	14	20	16	3,674234614
19	20	18	16	12	16,5	2,958039892
5	21	21	21	21	21	0

Om dit visueel duidelijk te maken, werd de gemiddelde ADM-rangschikking vergeleken met de rangschikking volgens brandstofverbruik in figuur 16. Het valt duidelijk op dat er grote verschillen zitten tussen beide rangschikkingen voor bepaalde deelnemers. Vooral voor deelnemers 13 en 18 is het verschil opvallend. Een mogelijke verklaring voor dit verschil bij deelnemer 18 ligt in het feit dat deze deelnemer voor een groot deel van het traject volle vaart heeft gevaren en weinig correctie heeft moeten doen, waardoor hij een weinig agressief vaargedrag vertoonde maar de motor wel zwaar heeft belast. Deelnemer 13 daarentegen heeft gevaren aan een zeer variabele snelheid. Om op het einde te manoeuvreren, heeft deze deelnemer zeer hard moeten corrigeren wat een agressief vaarpatroon geeft terwijl de belasting van de motor lager was dan bij deelnemer 18.

Hieruit kan worden afgeleid dat een hoge mate van dynamisch of agressief vaargedrag niet noodzakelijk rechtstreeks leidt tot een hoger brandstofverbruik. De ADM's beschrijven voornamelijk de dynamiek waarmee een schip wordt bediend, terwijl het totale brandstofverbruik daarnaast wordt beïnvloed door andere factoren, zoals de gemiddelde vaarsnelheid, de duur van het traject, de motorbelasting en de gebruikte telegraafstanden. Deelnemers 13 en 18 illustreren dit verschil duidelijk: deelnemer 18

vertoonde relatief weinig dynamische correcties, maar voer gedurende een groot deel van het traject met een hoge motorbelasting, terwijl deelnemer 13 een dynamischer vaarprofiel vertoonde maar de motor gemiddeld minder zwaar belastte. De ADM's en het brandstofverbruik beschrijven daardoor verschillende, maar complementaire aspecten van het vaargedrag. Voor een volledige beoordeling van energie-efficiënt vaargedrag is het daarom aangewezen om beide samen te beschouwen.



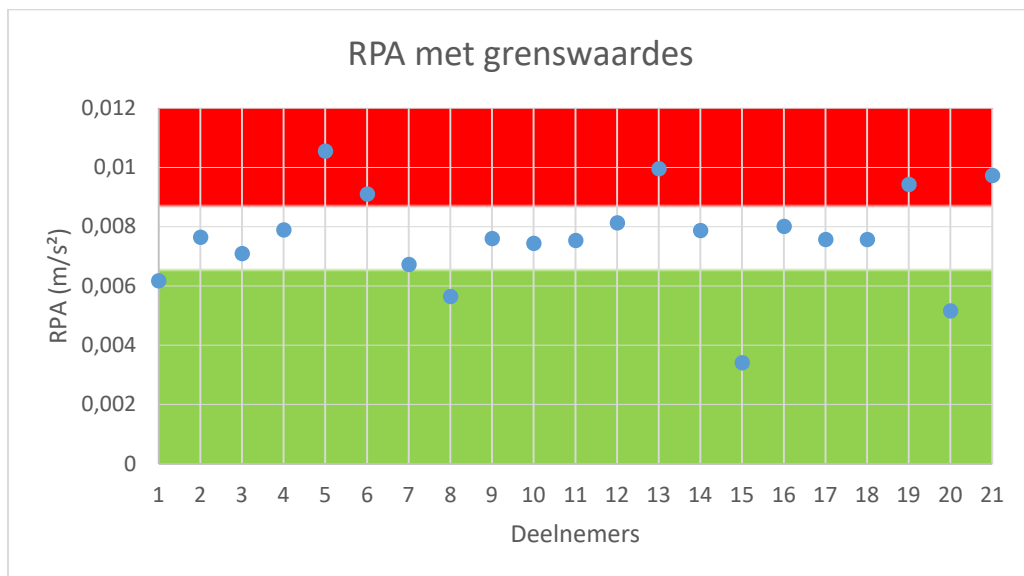
Figuur 17 Vergelijking tussen rangschikking volgens ADM's en verbruik voor alle deelnemers
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

6.1 Grenswaardes

Vervolgens wordt gezocht naar grenswaarden om de deelnemers te classificeren in drie categorieën: weinig agressief vaargedrag, normaal vaargedrag en agressief vaargedrag. Deze grenswaarden werden bepaald op basis van de mediaan en de gemiddelde deviatie. Om tot de classificatie te komen werd de gemiddelde deviatie opgeteld en afgetrokken van de mediaan om zo de zone van normaal vaargedrag te bepalen. Deze methode zorgt voor een robuuste indeling die minder rekening houdt met uitschieters. Belangrijk om te kaderen is dat deze grenswaarden niet kunnen overgenomen worden naar andere onderzoeken omdat ze zijn bekomen met behulp van de data in dit experiment. Er kan ook gesteld worden dat de testgroep niet groot genoeg was om universele grenswaarden te bekomen voor de scheepvaartsector. De grenswaarden geven wel een duidelijk beeld voor de deelnemers uit dit experiment.

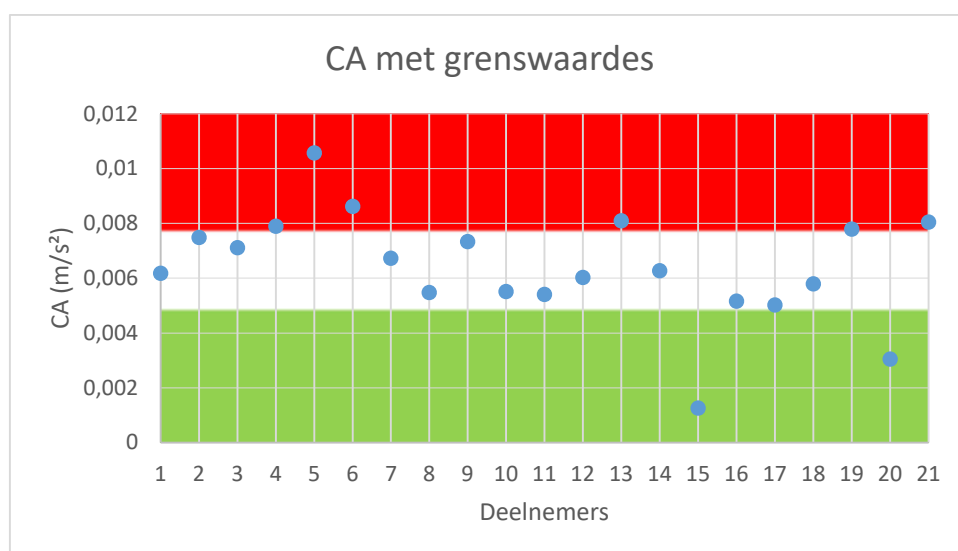
Voor RPA leverde deze berekening een bovenste grenswaarde op van $0,008747 \text{ m/s}^2$ en een onderste grenswaarde van $0,006460 \text{ m/s}^2$. Op basis hiervan kan worden vastgesteld

dat vier deelnemers niet agressief hebben gevaren, twaalf deelnemers een normaal niveau van agressiviteit hebben vertoond en vijf deelnemers te agressief hebben gevaren. De verdeling wordt weergegeven in de figuur 17.



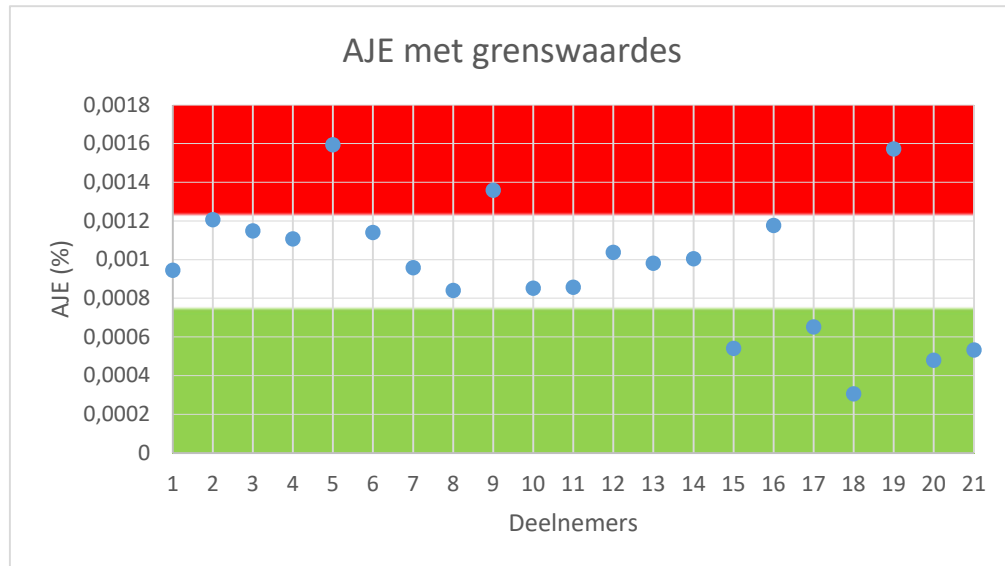
Figuur 18 RPA voor alle deelnemers met classificatie in weinig agressief (groen), normaal (wit) en agressief (rood) vaargedrag
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

Voor CA werden de grenswaardes op dezelfde manier berekend. Dit resulteerde in een bovenste grenswaarde van 0,007745 m/s² en een onderste grenswaarde van 0,004797 m/s². Op basis hiervan waren er twee deelnemers die niet agressief hebben gevaren, dertien deelnemers die normaal hebben gevaren en zes deelnemers die te agressief hebben gevaren, zie figuur 18.



Figuur 19 CA voor alle deelnemers met classificatie in weinig agressief (groen), normaal (wit) en agressief (rood) vaargedrag
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

Tot slot werden voor AJE de grenswaardes bepaald op 0,001240% en 0,000726%. Deze indeling toont dat vijf deelnemers niet agressief hebben gevaren, dertien deelnemers een normaal niveau van agressiviteit hebben vertoond en drie deelnemers te agressief hebben gevaren, zie figuur 19. In alle drie de classificaties komt deelnemer vijf naar voren als de meest agressieve deelnemer. Daarom wordt deze deelnemer hieronder in detail besproken.



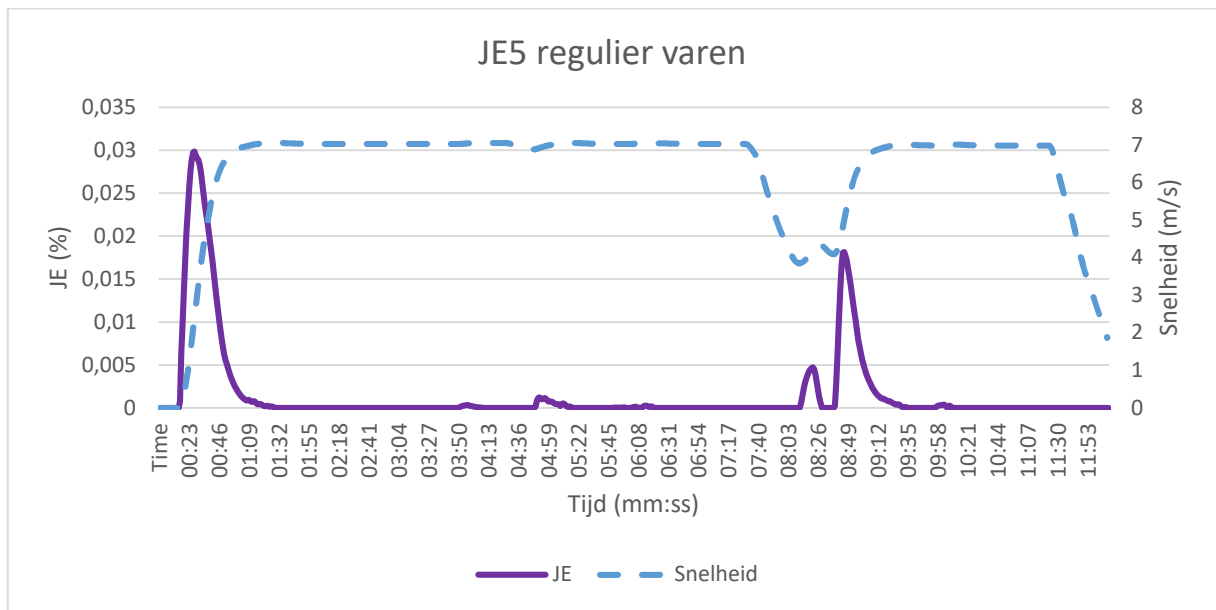
Figuur 20 AJE voor alle deelnemers met classificatie in weinig agressief (groen), normaal (wit) en agressief (rood) vaargedrag
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

6.2 Detail deelnemer vijf

Deelnemer vijf komt in alle ADM's naar voren als de meest agressieve deelnemer, en heeft ook het hoogste brandstofverbruik. Wanneer AJE wordt opgesplitst in regulier varen en manoeuvreren, blijkt echter dat deze deelnemer niet in beide segmenten de hoogste waarde heeft. Tijdens regulier varen is deelnemer vijf de tweede meest agressieve, terwijl tijdens manoeuvreren deze deelnemer de derde plaats inneemt. Deelnemer acht scoort het hoogst tijdens regulier varen, terwijl deelnemer negentien het meest agressief manoeuvreert, gevolgd door zestien en pas daarna vijf.

Een belangrijke reden waarom deelnemer vijf toch als meest agressief wordt beoordeeld, is de tijd waarin het traject werd afgelegd. Deze deelnemer had de vierde snelste tijd van alle deelnemers. Een kortere vaartijd betekent dat dezelfde manoeuvres in minder tijd worden uitgevoerd, waardoor ADM-waarden strenger worden beoordeeld.

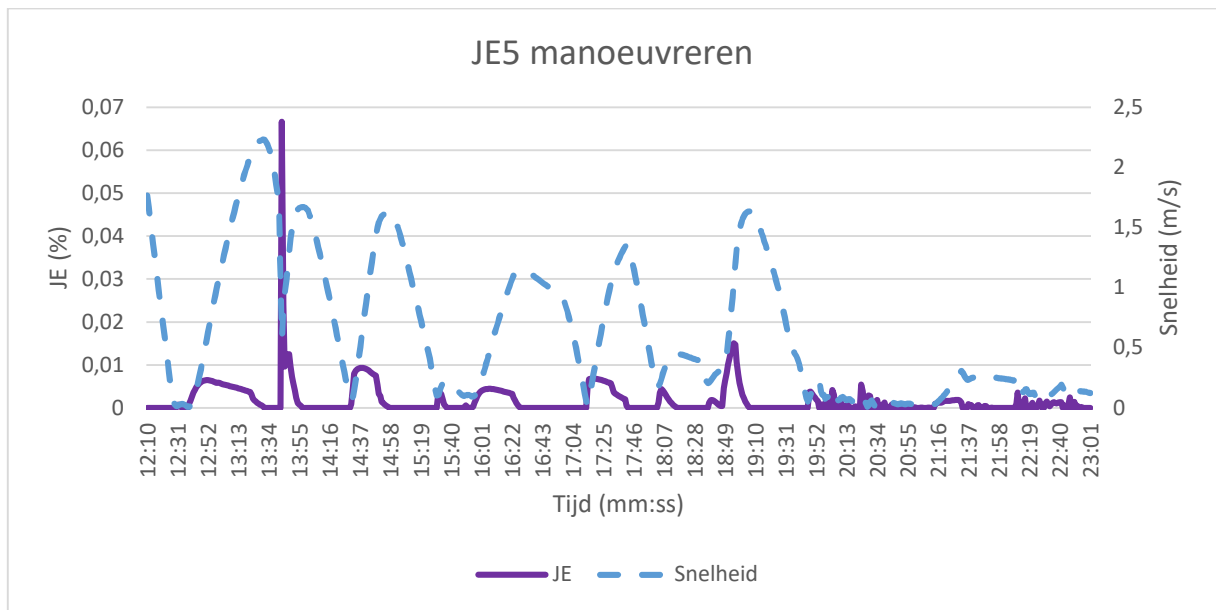
Het verloop van JE tijdens het reguliere varen van deelnemer vijf toont een aantal duidelijke pieken, zie figuur 20.



Figuur 21 Detail van JE voor deelnemer vijf regulier varen
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

De eerste piek ontstaat doordat deze deelnemer, net als deelnemers één tot negen, vanuit nul snelheid moest versnellen naar de gewenste vaart. Een tweede kleinere piek rond minuut 04:56 komt overeen met het nemen van een ruime bocht. De grotere pieken na minuut 08:05 horen bij het nemen van een scherpere bocht. Voor deze bocht werd eerst vertraagd door de telegraaf op nul te zetten, waarna opnieuw werd opgedreven tot maximale toeren. Opvallend is dat de stuurboordpropeller eerst werd bijgezet en pas enkele seconden later de bakboordpropeller, terwijl het een bocht over bakboord betrof. Hierdoor werd het moment deels tegengewerkt, wat leidt tot hogere JE-waarden. Uit de *rate of turn*-gegevens blijkt bovendien dat er voor deze bocht veel harder werd gedraaid dan voor de eerste, wat logisch is gezien de scherpere hoek, maar de manier waarop dit werd uitgevoerd wijst op stuuracties die niet overeenkomen met goed stuurgedrag en daardoor tot hogere JE-waarden leiden, en dus agressiever vaargedrag.

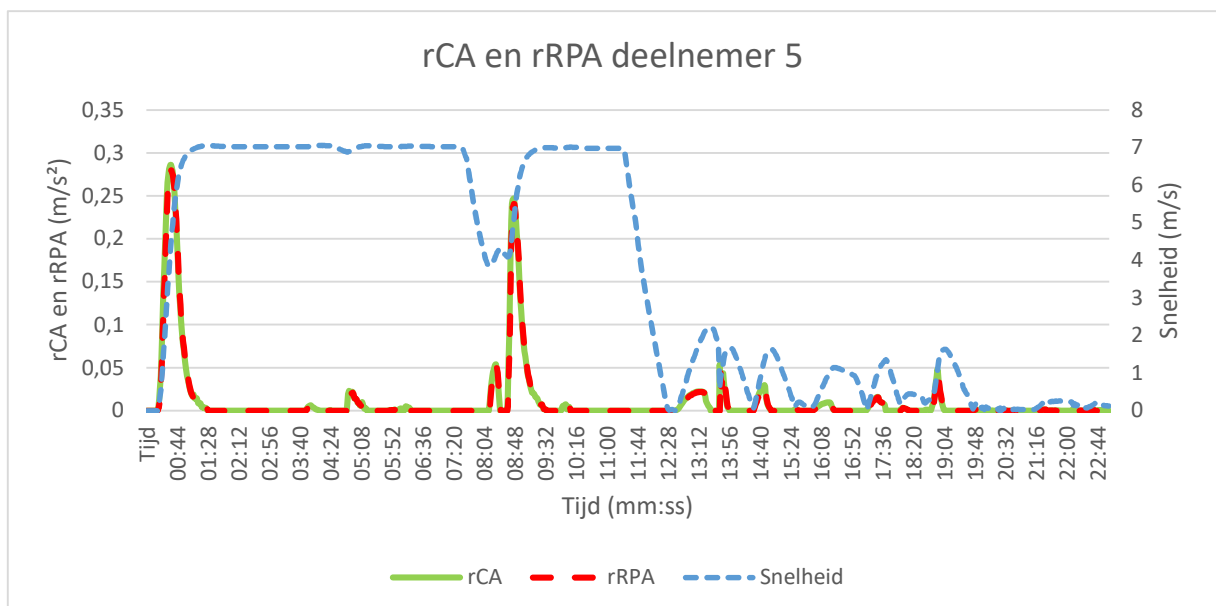
Het manoeuvreergedeelte toont een ander patroon, zie figuur 21.



Figuur 22 Detail van JE voor deelnemer vijf manoeuvreren
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

De meest opvallende piek rond 13:42 ontstaat doordat de snelheid eerst sterk daalde door de telegraaf half achteruit te zetten, waarna deze onmiddellijk weer naar halve kracht vooruit werd gezet. Omdat dit gebeurde bij een relatief hoge snelheid, ontstaat een grote JE-reactie. Andere pieken zijn minder uitgesproken omdat de snelheid daar gelijkmatiger werd opgebouwd of afgebouwd.

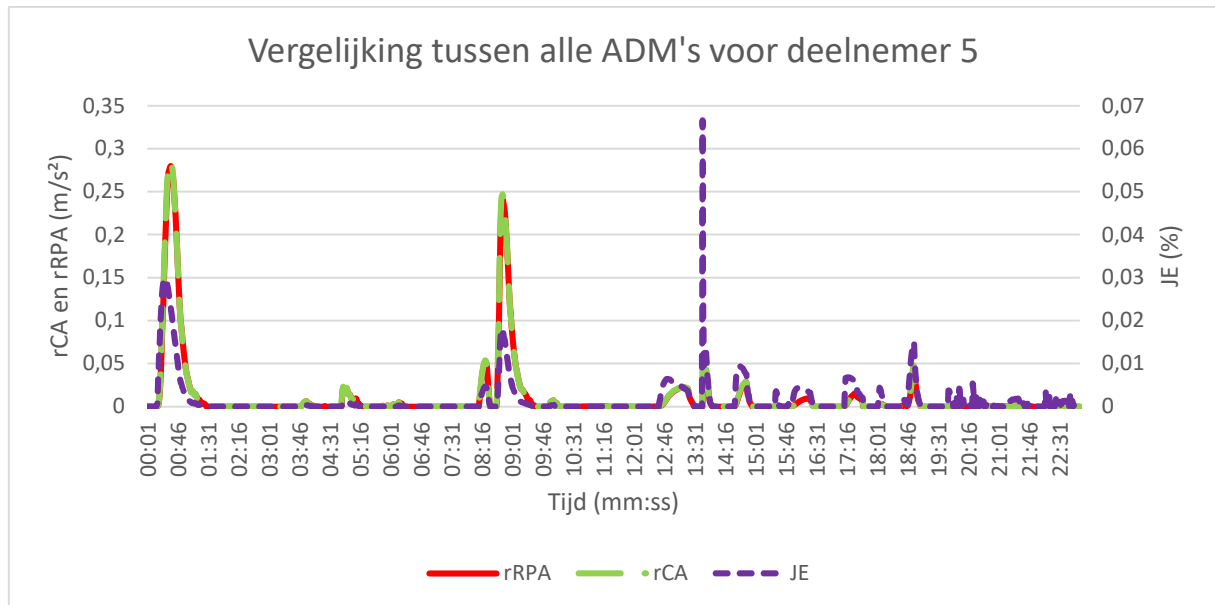
Wanneer RPA en CA voor deelnemer vijf worden bekeken, blijkt dat beide parameters een vergelijkbaar beeld geven, zie figuur 22.



Figuur 23 Vergelijking tussen rCA en rRPA voor deelnemer vijf
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

Het verschil tussen rRPA en rCA is klein, al is rCA doorgaans iets strenger. Beide volgen vooral de versnellingen die zichtbaar zijn in de snelheidsgrafiek.

Interessanter is de vergelijking tussen JE enerzijds en rRPA/rCA anderzijds, zie figuur 23.



Figuur 24 Vergelijking tussen alle ADM's voor deelnemer vijf
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

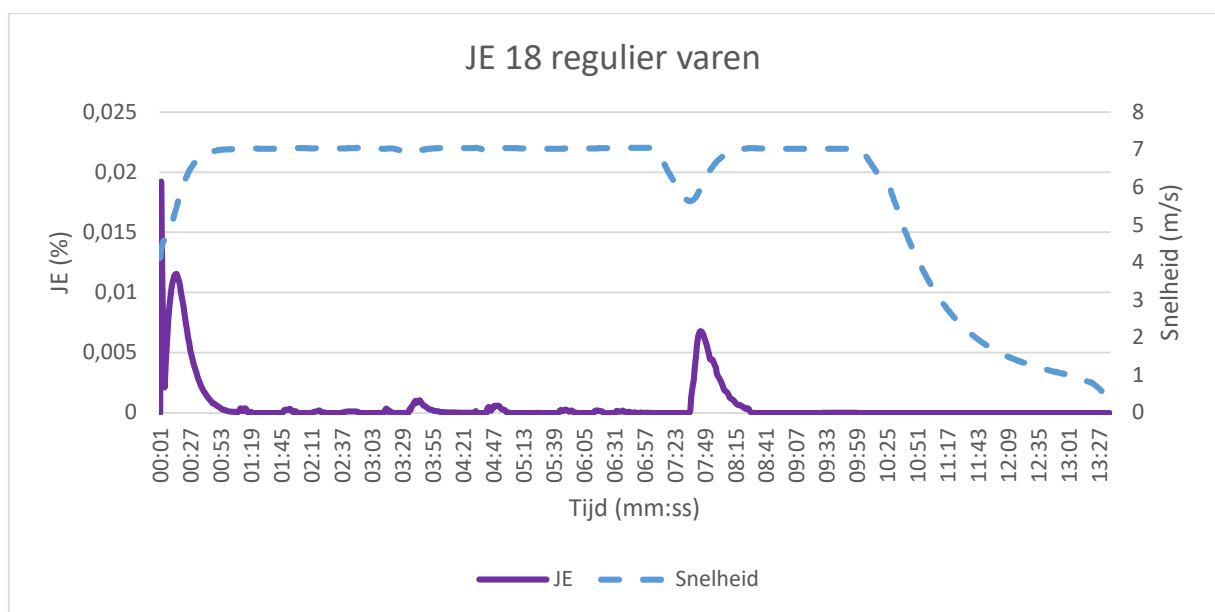
Hieruit blijkt dat de ADM's niet alle scenario's op dezelfde manier afstraffen. Tijdens regulier varen worden versnellingen door rRPA en rCA veel strenger beoordeeld dan door JE, omdat deze parameters rekening houden met de gemiddelde snelheid, die in dat segment relatief hoog ligt. Tijdens manoeuvreren treed JE strenger op, omdat deze parameter direct kijkt naar de versnelling ten opzichte van de valversnelling g .

6.3 Detail deelnemer achttien

In dit onderdeel wordt ingezoomd op deelnemer 18, die volgens AJE als beste deelnemer uit het experiment komt. Opmerkelijk is dat deze deelnemer door RPA en CA minder gunstig wordt beoordeeld, waardoor hij in de uiteindelijke ADM-rangschikking op de vijfde plaats eindigt. Wanneer de resultaten worden vergeleken met de rangorde uit het originele *GreenPort*-experiment, waarin brandstofverbruik centraal stond, blijkt dat deelnemer 18 daar op de negentiende plaats staat. Het grote verschil tussen beide ranglijsten vraagt om een nadere analyse.

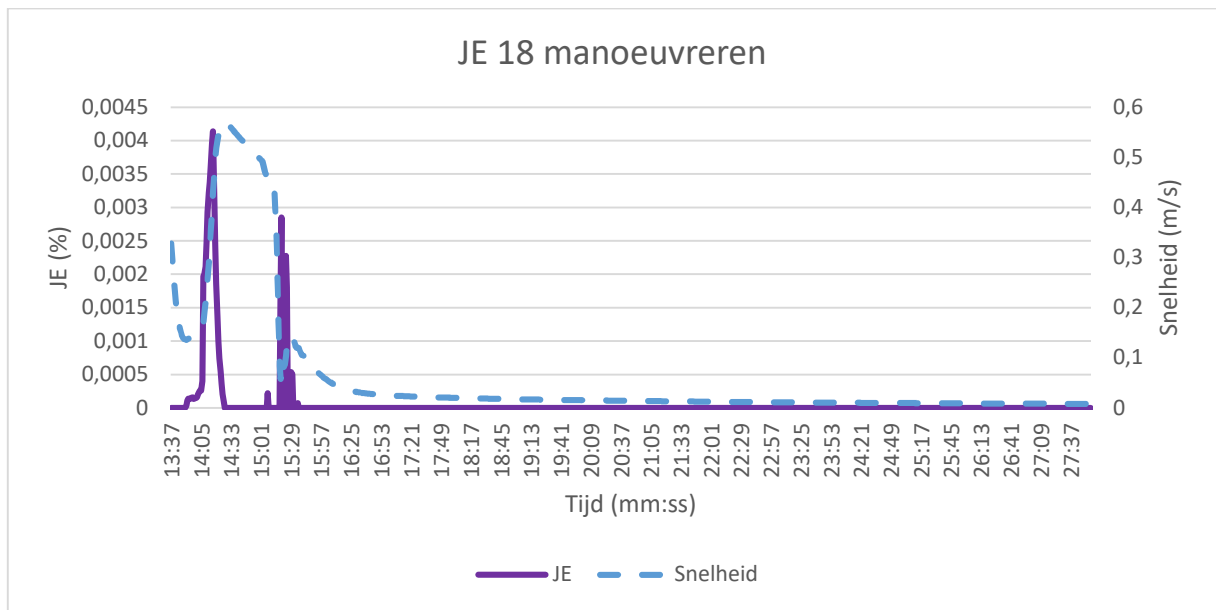
Een mogelijke verklaring ligt in de manier waarop deze deelnemer het experiment startte. De snelheid bij aanvang lag rond 4 m/s en de telegraaf stond reeds ingesteld op 'vooruit'. Voor de ADM's resulteert dit in een vlotte beweging, waardoor de deelnemer niet wordt afgestraft voor de initiële versnelling. In termen van brandstofverbruik is dit echter minder gunstig, omdat het varen op hoge toeren vanaf het begin leidt tot een hoger verbruik. Dit verklaart waarom deelnemer 18 bij AJE zeer goed scoort, maar bij brandstofverbruik net veel slechter.

Voor deze deelnemer werd JE opnieuw geplott voor zowel het reguliere varen als het manoeuvreren, telkens samen met de snelheid. Deze worden weergegeven in figuren 24 en 25.



Figuur 25 Detail van JE voor deelnemer achttien regulier varen
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

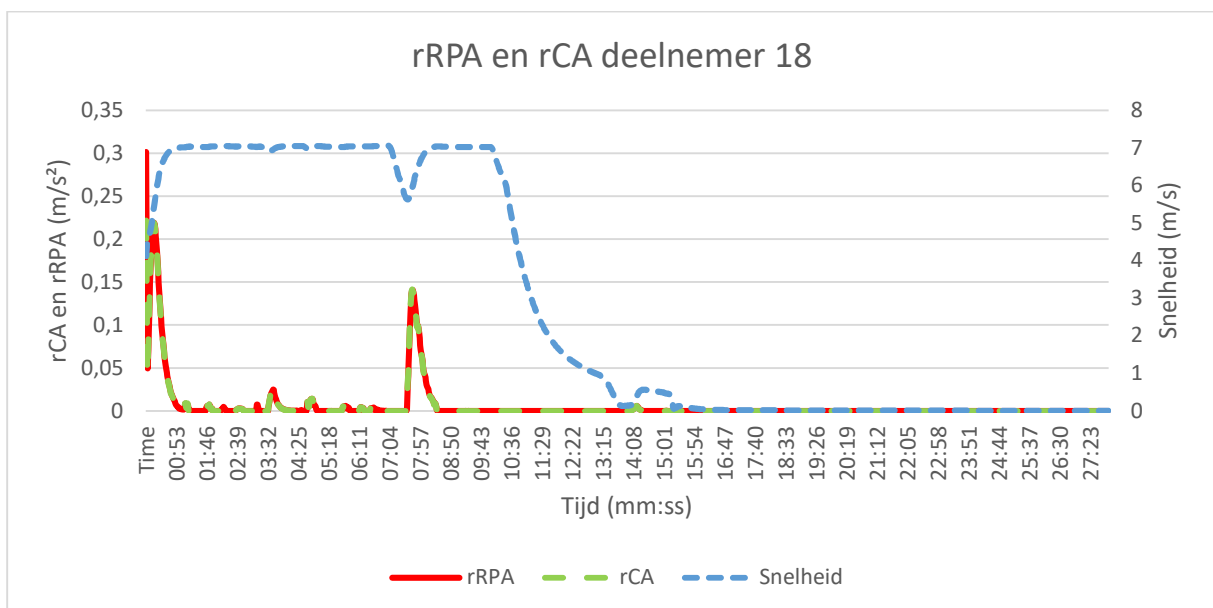
Tijdens het reguliere varen valt de initiële versnelling van deelnemer 18 op, gevolgd door de scherpere bocht die in het traject moet worden genomen. Daarnaast is duidelijk zichtbaar dat deelnemer 18 tegen het einde van dit segment al begint te vertragen om de overgang naar het manoeuvreergedeelte voor te bereiden.



Figuur 26 Detail van JE voor deelnemer achttien manoeuvreren
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

Tijdens het manoeuvreren ligt de gemiddelde snelheid lager dan één m/s. Deelnemer 18 voert twee duidelijke correcties uit, waarna het schip voornamelijk op momentum richting de kaai beweegt. Dit resulteert in een relatief rustig dynamisch profiel, wat aansluit bij de lage AJE-waarde.

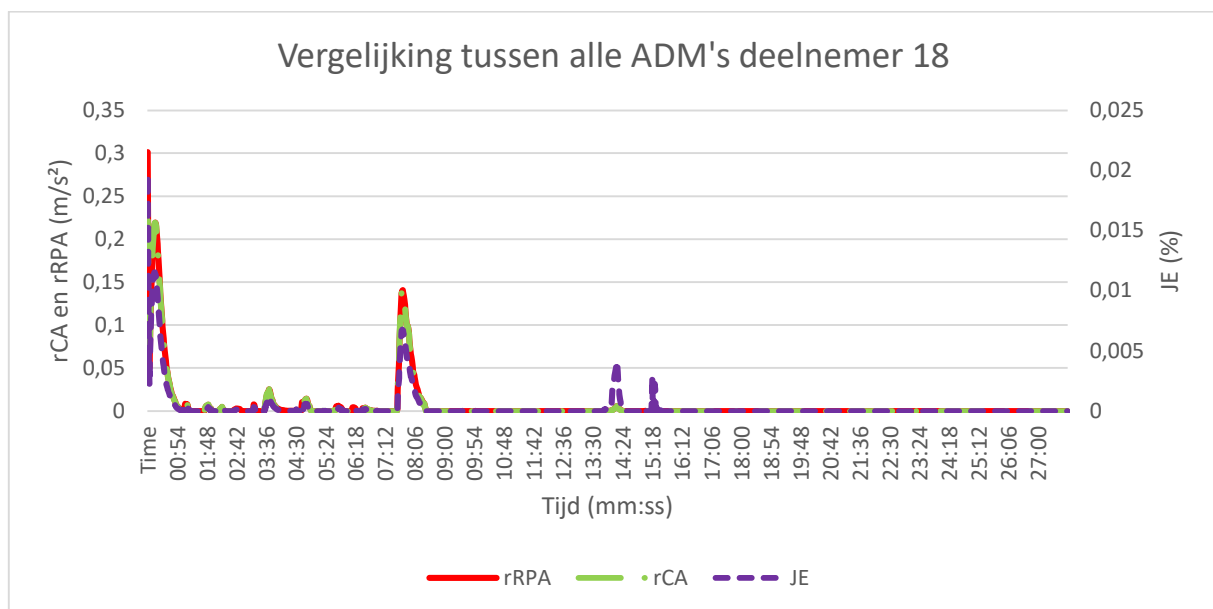
Voor rRPA en rCA van deelnemer 18 werden beide fases samen geplot, zoals weergegeven in figuur 26.



Figuur 27 Vergelijking tussen rCA en rRPA voor deelnemer vijf
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

Ook voor deze deelnemer vallen de grafieken van rRPA en rCA vrijwel samen. Dit is logisch, aangezien de gemiddelde waarden voor rRPA en rCA over alle deelnemers slechts een verschil van 0,0014 vertoonden. In figuur 26 is de eerste seconde weggelaten om de grafiek leesbaar te houden; anders zou de initiële piek het verdere verloop visueel domineren.

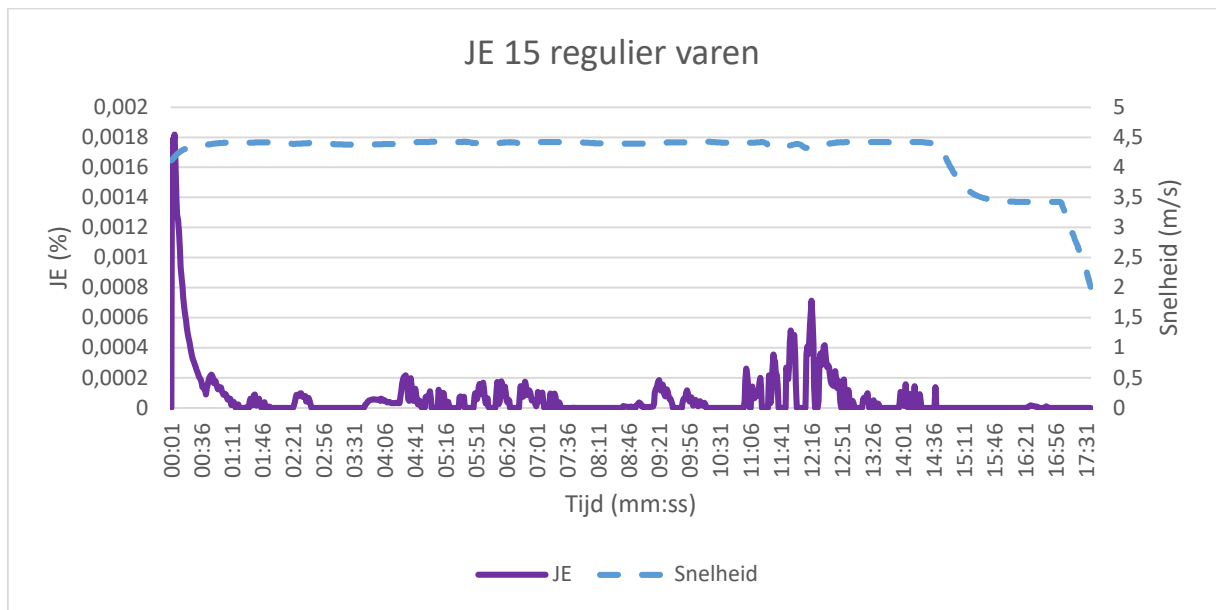
Vervolgens werden alle ADM's van deelnemer 18 samen geplot om deze onderling te vergelijken, zie figuur 27. Hieruit blijkt opnieuw dat JE lager ligt dan rRPA en rCA tijdens het reguliere varen, maar hoger tijdens het manoeuvreren. Dit patroon komt overeen met wat eerder werd vastgesteld bij andere deelnemers: JE reageert sterker op manoeuvreeracties, terwijl rRPA en rCA vooral gevoelig zijn voor versnellingen tijdens het reguliere varen.



Figuur 28 Vergelijking tussen alle ADM's voor deelnemer achttien
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

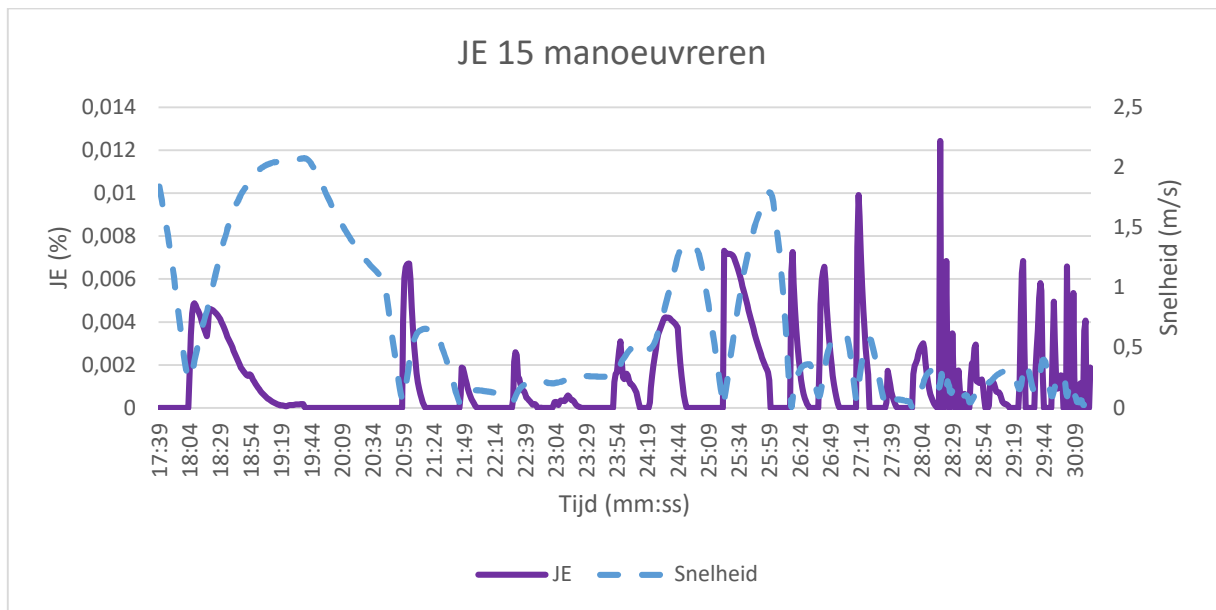
6.4 Detail deelnemer vijftien

Deelnemer 15 komt in het experiment naar voren als de beste deelnemer volgens zowel RPA als CA. Deze deelnemer deelt de eerste plaats met deelnemer 20, maar heeft het traject aanzienlijk trager afgelegd dan de eerder besproken deelnemers 5 en 18. Voor een volledig beeld wordt eerst gekeken naar het verloop van JE tijdens het reguliere varen en tijdens het manoeuvreren, zoals weergegeven in figuren 28 en 29. Volgens de JE-rangschikking was deelnemer 15 de derde beste deelnemer.



Figuur 29 Detail van JE voor deelnemer vijftien regulier varen
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

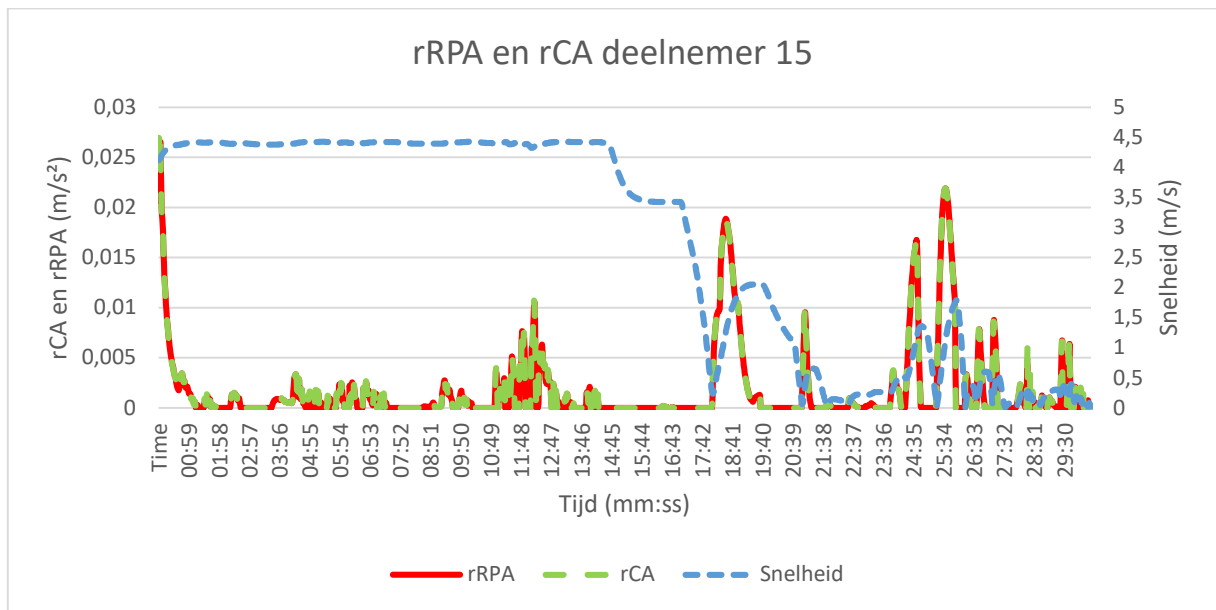
Tijdens het reguliere varen valt op dat deelnemer 15 tot het tijdstip 14:35 niet aan de telegraaf komt, maar dat er toch duidelijke variaties in snelheid en dus in JE zichtbaar zijn. De grotere variatie rond tijdstip 04:47 correspondeert met het nemen van de eerste bocht, terwijl de variatie rond 12:18 overeenkomt met de tweede, scherpere bocht. Deze variaties zijn bij deelnemer 15 duidelijker zichtbaar dan bij deelnemers 5 en 18, omdat de snelheid tijdens het reguliere varen veel lager lag. Zijn telegraaf stond slechts op 30%, waardoor het schip trager voer en dynamische veranderingen sterker worden uitvergroot in de JE-grafiek. De kleine variaties op de rechte stukken kunnen worden toegeschreven aan subtiele roerbewegingen en externe invloeden zoals stroming, wind en golven.



Figuur 30 Detail van JE voor deelnemer achttien manoeuvreren
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

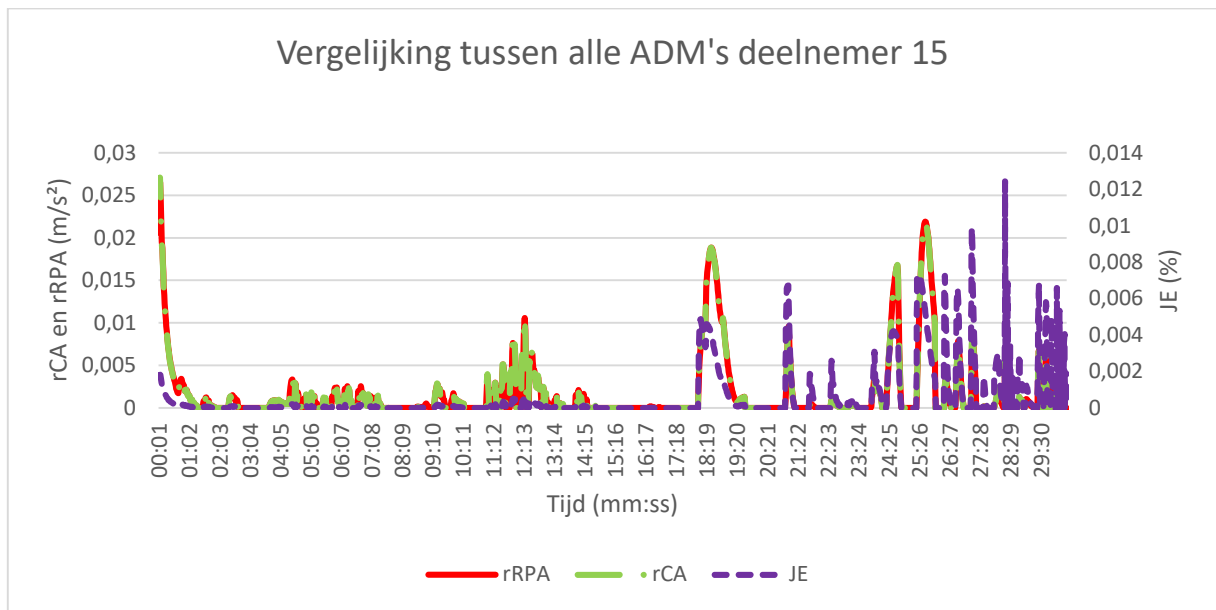
Tijdens het manoeuvreren valt onmiddellijk op dat deelnemer 15 zijn snelheid in het begin drastisch vermindert, om vervolgens opnieuw te versnellen. De hoogste piek tijdens het reguliere varen bleef onder 0,002, terwijl de meeste pieken tijdens het manoeuvreren duidelijk hoger liggen. Bovendien komen er tijdens het manoeuvreren veel meer pieken voor, wat wijst op een dynamisch intensieve fase. Dit wordt bevestigd wanneer de totale AJE-waarden worden vergeleken: tijdens het reguliere varen bedraagt de totale AJE 0,000067 m/s², terwijl deze tijdens het manoeuvreren oploopt tot 0,001197 m/s². Dit is een verschil van een factor achttien. In de rangschikking voor regulier varen is deelnemer 15 de tweede beste volgens AJE, maar tijdens het manoeuvreren zakt hij naar de tiende plaats.

Daarna wordt geanalyseerd waarom deze deelnemer zo goed scoort volgens RPA en CA. De belangrijkste reden hiervoor is de lage snelheid tijdens het begin van het traject. Door deze lage snelheid heeft deelnemer 15 aanzienlijk langer over het traject gedaan. ADM-parameters zoals RPA en CA houden rekening met de gemiddelde snelheid, waardoor lagere snelheden leiden tot lagere waarden en dus tot een gunstigere beoordeling. Dit verklaart waarom deelnemer 15, ondanks de relatief dynamische manoeuvreerfase, toch als beste uit de bus komt voor RPA en CA.



Figuur 31 Vergelijking tussen rCA en rRPA voor deelnemer vijf
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

Tot slot werden alle ADM's van deelnemer 15 samen geplot om deze onderling te vergelijken, zoals weergegeven in figuur 31. Hieruit blijkt dat JE deze deelnemer nauwelijks afstraft tijdens het reguliere varen, maar wel duidelijk tijdens het manoeuvreren, vooral bij de laatste acties. Voor rRPA en rCA treden de grootste pieken eveneens op tijdens het manoeuvreren, al is er ook een duidelijke afstraffing tijdens het reguliere varen. De pieken zijn bij deelnemer 15 visueel duidelijker omdat de maximale waarden die hij bereikt veel kleiner zijn dan bij de eerder besproken deelnemers, waardoor de relatieve variaties sterker opvallen.



Figuur 32 Vergelijking tussen alle ADM's voor deelnemer vijf
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

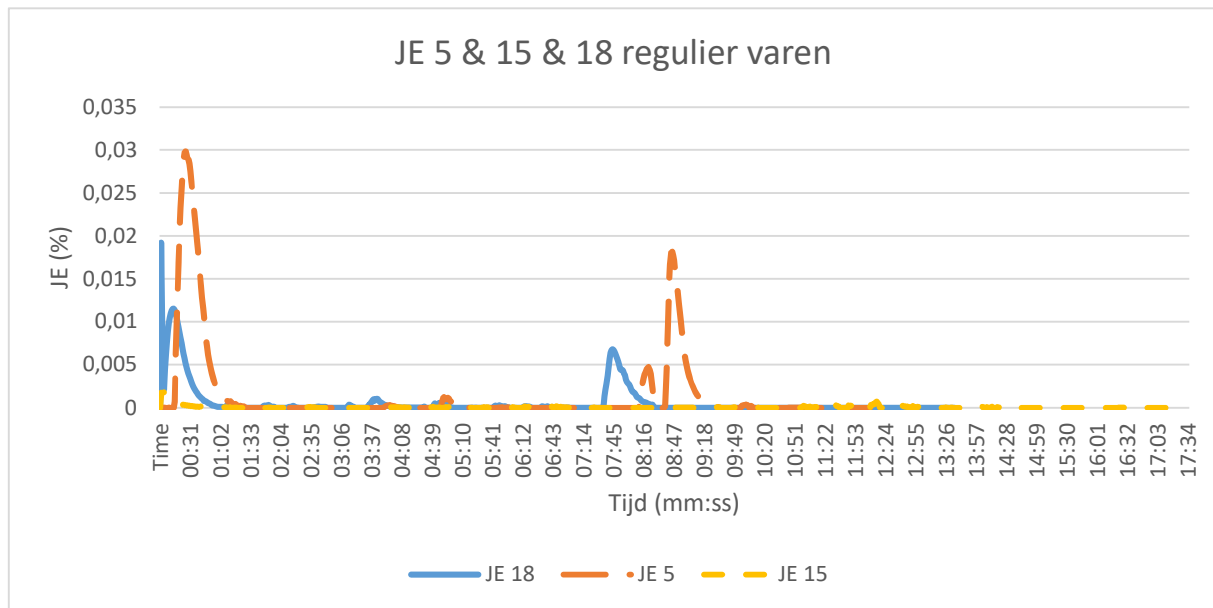
6.5 Vergelijking tussen deelnemers 5, 15 en 18

In dit onderdeel worden de verschillen tussen deelnemers 5, 15 en 18 geanalyseerd, met als doel te begrijpen wat deze deelnemers van elkaar zouden kunnen leren op het vlak van dynamisch vaargedrag. De vergelijking start met het verloop van JE tijdens het reguliere varen, zoals weergegeven in figuur 32.

Het eerste opvallende verschil is de veel grotere initiële JE-waarde bij deelnemer 5. Dit komt doordat deze deelnemer vanuit nul snelheid moest versnellen naar zijn maximale snelheid. Deelnemer 18 had daarentegen reeds een beginsnelheid van ongeveer 4 m/s en moest enkel nog versnellen tot de maximale snelheid, waardoor de initiële piek veel kleiner is. Deelnemer 15 vertoont bijna geen initiële versnelling, omdat hij gedurende het volledige begin van het traject op de startsnelheid is gebleven, eveneens rond 4 m/s.

Daarnaast valt op dat deelnemer 18 twee keer een duidelijke correctie moest uitvoeren voor de flauwe bocht, terwijl bij deelnemer 5 slechts één sprong zichtbaar is. Deze sprong is wel hoger dan beide correcties van deelnemer 18. Bij de scherpe bocht voert deelnemer 5 twee grote correcties uit, terwijl deelnemer 18 met één correctie volstaat. De correctie van deelnemer 18 is bovendien minder uitgesproken, omdat hij het schip grotendeels heeft laten voortbewegen op het reeds aanwezige momentum, zonder extra vermogen bij te geven. Deelnemer 5 probeerde daarentegen onmiddellijk opnieuw te versnellen tot maximale snelheid, wat leidt tot een veel hogere dynamische reactie. Hierdoor heeft deelnemer 18 ook een langer segment regulier varen dan deelnemer 5. Deelnemer 15 vertoont in dit deel nauwelijks grote variaties, omdat bochten bij de lagere

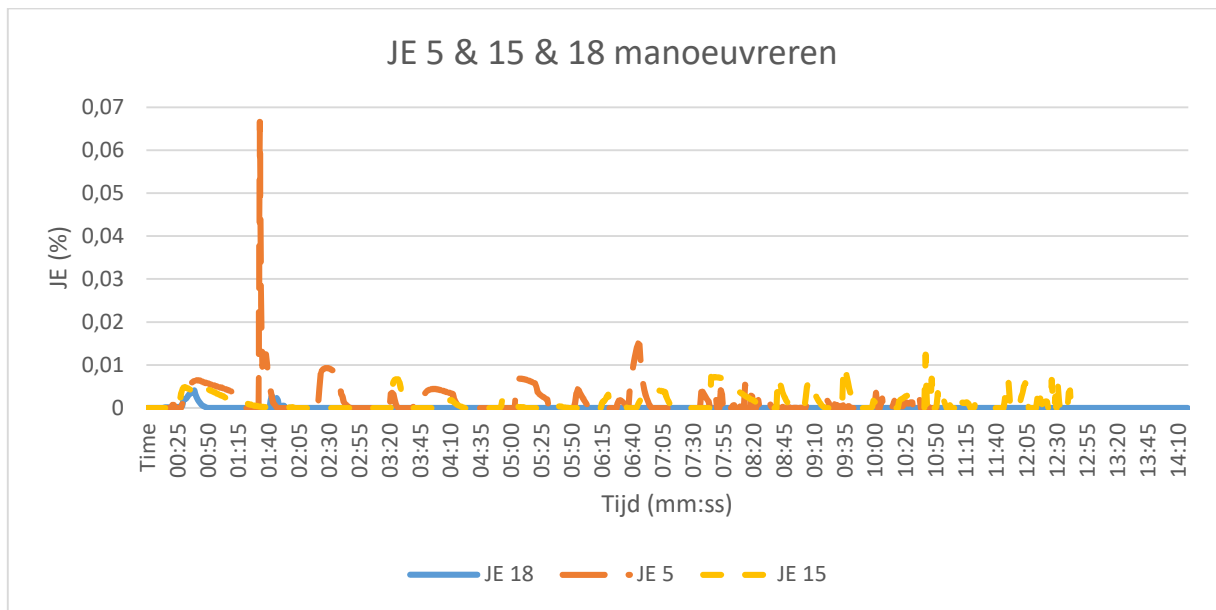
snelheid probleemloos konden worden genomen. Dit verklaart waarom deelnemer 15 aanzienlijk langer over het traject heeft gedaan dan de andere deelnemers.



Figuur 33 vergelijking van JE tussen deelnemers voor regulier varen
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

Tijdens het manoeuvreren worden de verschillen tussen de drie deelnemers nog duidelijker, zoals weergegeven in figuur 33. Deelnemer 18 wacht voornamelijk af en laat het schip bewegen op basis van momentum, met slechts enkele kleine correcties. Deelnemers 5 en 15 daarentegen manoeuvreren veel actiever. Deelnemer 5 had aan het einde van het reguliere varen opnieuw versneld, waardoor hij moest vertragen toen de kaai naderde. Na het vertragen versnelde hij onmiddellijk daarna opnieuw, wat de grote piek aan het begin van het manoeuvreergedeelte verklaart. Deelnemer 15 vertoont dit gedrag eveneens maar in mindere mate. Dit staat in scherp contrast met deelnemer 18, die, zodra het schip in de juiste richting bewoog, eenvoudigweg wachtte tot het schip vanzelf aan de kaai kwam.

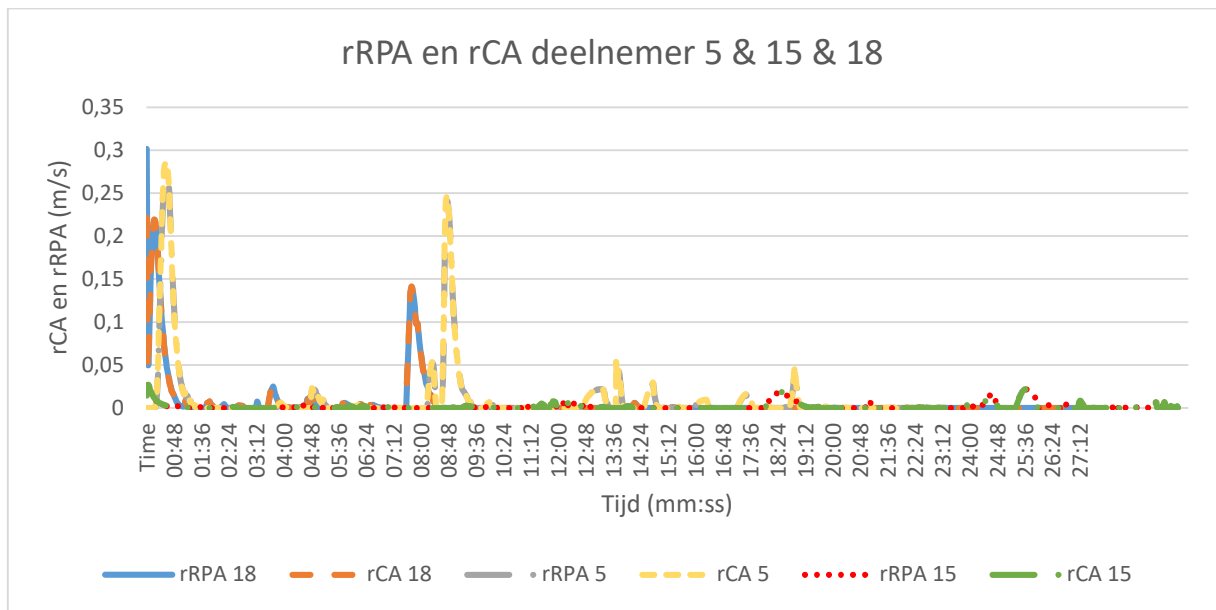
Ook tussen deelnemers 5 en 15 zijn duidelijke verschillen zichtbaar. Deelnemer 15 corrigeert in het begin van zijn manoeuvres relatief hard, terwijl deelnemer 15 pas tegen het einde van het manoeuvreergedeelte agressiever ingrijpt. Wel kan worden vastgesteld dat de meeste agressieve deelnemer, 5, het snelste tegen de kant was, gevolgd door deelnemer 15 en tot slot deelnemer 18 die het momentum van het schip het grote werk heeft laten doen.



Figuur 34 vergelijking van JE tussen deelnemers voor manoeuvreren
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

Wanneer vervolgens wordt gekeken naar de verschillen tussen rRPA en rCA, zoals weergegeven in figuur 34, valt op dat deelnemer 5 veel grotere en frequentere pieken vertoont dan deelnemers 15 en 18. Tegelijk blijft duidelijk dat deelnemer 15 in het algemeen langer over het traject heeft gedaan. Deelnemer 18 is bij beide bochten sneller dan deelnemer 5, wat aansluit bij het eerder beschreven gebruik van momentum. Uit de snelheid van deelnemer 15 kan worden afgeleid dat deze later bij de bochten aankomt, al is dit moeilijk exact af te lezen in figuur 34.

Het is belangrijk te benadrukken dat deelnemer 18 voor rRPA en rCA niet tot de beste deelnemers behoort, maar respectievelijk op de tiende en achtste plaats staat. Deelnemer 15 is de beste volgens rRPA en rCA, wat duidelijk zichtbaar is in figuur 4. Dit komt vooral doordat deelnemer 15 geen grote pieken heeft gehad, dankzij de lagere snelheid waarmee hij het traject heeft afgelegd. Deelnemer 5 blijft de slechtste deelnemer volgens deze ADM's.



Figuur 35 Vergelijking van rCA en rRPA voor verschillende deelnemers
Bron: eigen werk op gegevens *GreenPort*

Deze vergelijking toont dat de drie deelnemers elk een duidelijk verschillend dynamisch profiel hebben. Deelnemer 5 vertoont de meest agressieve acceleraties, deelnemer 15 compenseert met lage snelheden en lange vaartijd, en deelnemer 18 maakt optimaal gebruik van momentum. Deze inzichten tonen dat ADM's niet alleen verschillen tussen deelnemers zichtbaar maken, maar ook concrete aanwijzingen geven over hoe vaargedrag kan worden verbeterd.

7 Discussie en aanbevelingen

Op basis van de uitgevoerde analyses en de verschillende rangschikkingen die binnen dit onderzoek werden opgesteld, kunnen een aantal conclusies worden geformuleerd over de toepasbaarheid van ADM's binnen de scheepvaart. Tegelijkertijd kunnen aanbevelingen worden gedaan voor toekomstig onderzoek en voor de verdere ontwikkeling van methoden om dynamisch of agressief vaargedrag te beoordelen. Aangezien dit onderzoek als een pilootstudie kan worden beschouwd, is bijkomend onderzoek noodzakelijk om de gebruikte methoden verder te verfijnen en te valideren.

Uit de resultaten blijkt dat AJE het meest geschikt lijkt voor toepassing binnen de scheepvaart. Daarvoor zijn verschillende redenen aan te halen. Ten eerste is AJE minder afhankelijk van de vaarsnelheid dan RPA en CA. Dit is binnen de maritieme sector bijzonder relevant, omdat schepen sterk uiteenlopende operationele snelheden hanteren. In het wegverkeer bewegen voertuigen binnen eenzelfde verkeerssituatie doorgaans binnen vergelijkbare snelheidsgrenzen, waardoor snelheidsafhankelijke parameters daar minder problematisch zijn. De geringere snelheidsafhankelijkheid van AJE biedt daardoor mogelijkheden om het dynamische vaargedrag van verschillende scheepstypes onderling te vergelijken, zonder dat de snelheid zelf een dominante factor wordt.

Daarnaast is AJE beter in staat om vertragingen mee te nemen in de beoordeling van dynamisch gedrag. Een sterke koerswijziging kan een aanzienlijke snelheidsafname veroorzaken, waarna de verloren snelheid opnieuw moet worden opgebouwd. Dit vereist extra energie en heeft dus een directe invloed op het brandstofverbruik. AJE houdt rekening met zowel positieve als negatieve versnellingen en kan daardoor een vollediger beeld geven van het effect van manoeuvres dan parameters die hoofdzakelijk positieve versnellingen benadrukken.

Dit betekent echter niet dat RPA en CA buiten beschouwing moeten worden gelaten. De resultaten tonen duidelijk dat de verschillende ADM's niet steeds tot dezelfde rangschikking van deelnemers leiden. Elke parameter beschrijft een ander aspect van het vaargedrag. Voor toekomstig onderzoek lijkt het daarom aangewezen om voor iedere deelnemer zowel AJE, RPA als CA te berekenen en deze gezamenlijk te gebruiken voor een algemene beoordeling. Een gecombineerde rangschikking, zoals toegepast in tabel 8, kan een vollediger beeld geven van de dynamiek van het vaargedrag dan één afzonderlijke parameter.

De resultaten van deze studie moeten worden geïnterpreteerd binnen de beperkingen van het uitgevoerde experiment. Het *GreenPort*-experiment was oorspronkelijk niet ontworpen met het oog op de toepassing van ADM's, waardoor bij sommige deelnemers verschillen in begincondities voorkwamen. Daarnaast werd het experiment uitgevoerd in een simulator, waardoor externe en operationele factoren die in de praktijk een invloed kunnen hebben op het vaargedrag niet volledig konden worden meegenomen. Een voorbeeld hiervan is de beschikbare waterdiepte. In het simulatorscenario was deze voldoende om het beschikbare motorvermogen zonder beperkingen te benutten, terwijl in werkelijke omstandigheden een beperkte waterdiepte de respons van het schip aanzienlijk kan beïnvloeden. Het volledig vooruit zetten van de telegraaf resulteert dan niet noodzakelijk in dezelfde versnelling als onder diepwatercondities. Wanneer uitsluitend naar de beweging van het schip wordt gekeken, kan de beoordeling van het gedrag hierdoor worden vertekend.

Daarnaast bleef de omvang van de onderzoeksgroep beperkt. De in deze studie verkregen ADM-waarden, classificaties en bijbehorende grenswaarden kunnen daarom niet zonder meer worden veralgemeend naar de volledige scheepvaartsector. Ze moeten worden beschouwd als een eerste indicatie van hoe ADM's zich gedragen binnen een maritieme context, eerder dan als definitieve referentiewaarden.

Voor toekomstig onderzoek zou het daarom waardevol zijn om bijkomende operationele gegevens te verzamelen. De actuele waterdiepte kan bijvoorbeeld via het echolood worden geregistreerd. Daarnaast kan de stand van de telegraaf belangrijke informatie verschaffen over de intentie van de officier. Door de gegeven commando's te combineren met de daadwerkelijke reactie van het schip kan beter onderscheid worden gemaakt tussen het gedrag van de officier en beperkingen die voortkomen uit de omgeving of uit de eigenschappen van het schip. Dit maakt het mogelijk om agressief vaargedrag te onderscheiden van situaties waarin het schip eenvoudigweg niet sneller kan reageren.

Naast deze technische factoren moet ook aandacht worden besteed aan de menselijke factor. Binnen eerder onderzoek bij sleepbedrijf Boluda werd vastgesteld dat het bewustmaken van kapiteins en officieren van hun brandstofverbruik door middel van een *fuel monitoring system* al tot een aanzienlijke vermindering van het verbruik kon leiden. Daarbij rapporteert Boluda een brandstofbesparing van ongeveer 20% (mondelinge communicatie). Wanneer het systeem bovendien werd gekoppeld aan haptische feedback via de bediening van het schip, liep de gerapporteerde besparing op tot ongeveer 22%. De verschillen tussen individuele kapiteins wijzen erop dat persoonlijke

motivatie en gedrag een belangrijke invloed kunnen hebben op de operationele efficiëntie. Dit ondersteunt het uitgangspunt dat niet uitsluitend technische kenmerken van het schip, maar ook beslissingen en gedragingen van de operator relevant zijn bij onderzoek naar brandstofverbruik.

Ook de manier waarop een officier reageert op verkeerssituaties verdient verdere aandacht. Tijdens simulatortrainingen aan de Antwerp Maritime Academy wordt bijvoorbeeld aangeleerd om in uitwijksituaties, wanneer mogelijk, voornamelijk gebruik te maken van koerswijzigingen en veranderingen in snelheid te beperken. Bij schepen die reeds dicht bij hun normale of maximale operationele snelheid varen, zal een snelheidswijziging immers meestal een vertraging betekenen. Een koerswijziging kan in dergelijke omstandigheden een efficiënter alternatief vormen. Tegelijkertijd is deze keuze sterk afhankelijk van het type schip en de operationele omstandigheden. Wanneer een schip tijdens normale operaties niet op zijn maximale snelheid vaart, kan een tijdelijke versnelling eveneens een bruikbare mogelijkheid vormen om een verkeerssituatie op te lossen. Dit benadrukt dat een beoordeling van dynamisch of agressief vaargedrag steeds in de juiste operationele context moet worden geplaatst.

Dit sluit eveneens aan bij de COLREGS, waarin wordt vereist dat een uitwijkmanoeuvre tijdig, duidelijk en voldoende groot is om voor andere schepen waarneembaar te zijn. Afhankelijk van de situatie kan dit gebeuren door middel van een duidelijke koerswijziging, een snelheidswijziging of een combinatie van beide (International Maritime Organization, 2013). Een grote verandering in snelheid of koers mag daarom niet zonder meer als agressief gedrag worden geïnterpreteerd. In bepaalde verkeerssituaties kan een dergelijke ingreep juist noodzakelijk zijn om veilig en conform de geldende vaarregels te handelen.

Vervolgonderzoek naar agressief of dynamisch vaargedrag zou idealiter niet uitsluitend gebaseerd worden op de beweging van het schip. Een combinatie van ADM's met operationele gegevens, omgevingsfactoren, gegeven commando's en persoonsgebonden informatie kan een vollediger beeld geven van het gedrag van de officier en van de mogelijke invloed daarvan op het brandstofverbruik.

Een eerste mogelijkheid bestaat uit een nieuw simulatorexperiment dat specifiek rond de ADM's wordt ontworpen. Daarbij kunnen de operationele gegevens worden gecombineerd met informatie over de deelnemers, zoals ervaring en resultaten van persoonlijkheidstesten. Hierdoor kan worden onderzocht of hoge ADM-scores

daadwerkelijk samenhangen met eigenschappen die als agressief of risicovol kunnen worden beschouwd. Daarnaast kan worden nagegaan of het gedrag van een persoon consistent blijft tussen verschillende transportmodi, bijvoorbeeld door dezelfde deelnemers zowel in een voertuig als in een scheepssimulator te onderzoeken. De ADM-waarden zouden daarbij niet rechtstreeks op basis van hun absolute grootte mogen worden vergeleken, maar binnen iedere transportmodus moeten worden genormaliseerd of relatief gerangschikt.

Een belangrijke volgende stap is vervolgens de toepassing van de methode in de werkelijke scheepvaart. Publiek beschikbare AIS-gegevens kunnen worden gebruikt voor een eerste analyse, maar voor gedetailleerder onderzoek zijn datasets met een hogere meetfrequentie, zoals gegevens van de Schelderadarketen of rechtstreeks aan boord verzamelde sensordata, beter geschikt. Idealiter worden deze gegevens gekoppeld aan informatie over het brandstofverbruik, de operationele omstandigheden, de gegeven commando's en de officier die het schip op dat moment bestuurt. Hierdoor kan rechtstreeks worden onderzocht in welke mate verschillen in vaargedrag samenhangen met verschillen in energieverbruik en welke menselijke of operationele factoren deze verschillen verklaren.

8 Conclusie

Dit onderzoek vertrok vanuit de hoofdonderzoeksvraag of het mogelijk is om agressief vaargedrag te kwantificeren aan de hand van parameters. Op basis van de literatuurstudie en de analyse van de gegevens uit het *GreenPort*-experiment kan deze vraag positief worden beantwoord. De resultaten tonen aan dat verschillen in dynamisch vaargedrag objectief zichtbaar kunnen worden gemaakt aan de hand van ADM's. Parameters zoals AJE, RPA en CA zetten verschillen in versnellingen, vertragingen en de dynamiek waarmee een traject wordt uitgevoerd om in kwantitatieve waarden. Hierdoor kunnen deelnemers op een reproduceerbare manier met elkaar worden vergeleken, waarbij de resultaten steeds binnen hun operationele context moeten worden geïnterpreteerd.

De eerste deelvraag onderzocht of ADM's die oorspronkelijk binnen de automobielsector werden ontwikkeld, ook toepasbaar zijn binnen de scheepvaart. Uit dit onderzoek blijkt dat de onderliggende principes van deze parameters overdraagbaar zijn naar een maritieme context, mits rekening wordt gehouden met de specifieke eigenschappen van een schip. Zo kan het hoogteverschil uit bepaalde oorspronkelijke formules voor een schip op zee gelijkgesteld worden aan nul. De aangepaste formules konden vervolgens worden toegepast op de seconde-per-secondegegevens uit de simulator en maakten duidelijke verschillen tussen de deelnemers zichtbaar.

Een rechtstreekse vergelijking met grenswaarden of absolute ADM-waarden uit de autosector is daarentegen niet mogelijk. Een schip versnelt en vertraagt op een andere tijdschaal dan een voertuig en wordt beïnvloed door factoren zoals stroming, wind en waterdiepte. Ook tussen scheepstypes kunnen de operationele snelheden sterk uiteenlopen. De binnen dit onderzoek bepaalde grenswaarden zijn daarom enkel bruikbaar voor de vergelijking van de deelnemers binnen het *GreenPort*-experiment en mogen niet als algemene grenswaarden voor agressief vaargedrag worden beschouwd.

Van de onderzochte ADM's lijkt AJE het meest geschikt als hoofdparameter voor toepassing binnen de scheepvaart. AJE is minder afhankelijk van de gemiddelde snelheid dan RPA en CA, wat relevant is omdat operationele snelheden binnen de scheepvaart sterk kunnen verschillen. De detailanalyses tonen bovendien dat AJE dynamische veranderingen zichtbaar maakt die bij RPA en CA anders worden gewogen. RPA en CA blijven echter waardevol als aanvullende parameters en leggen sterker de nadruk op positieve versnellingen en de energie die nodig is om snelheid op te bouwen. De rangschikkingen volgens de drie ADM's zijn daardoor niet identiek. De parameters

beschrijven verschillende aspecten van hetzelfde vaargedrag en vullen elkaar aan, waardoor een gecombineerde beoordeling een vollediger beeld geeft dan één afzonderlijke parameter.

Dit wordt bevestigd door de tweede deelvraag, waarin werd onderzocht in welke mate de ADM's onderling overeenkomen en hoe deze zich verhouden tot de rangschikking volgens brandstofverbruik. Voor de drie ADM's bedroeg Kendall's coëfficiënt van overeenstemming 0,744. Dit wijst op een duidelijke overeenkomst tussen de rangschikkingen, maar toont tegelijkertijd dat de parameters niet exact hetzelfde meten. Wanneer ook de rangschikking volgens brandstofverbruik werd toegevoegd, daalde deze coëfficiënt tot 0,633. De overeenkomst met het brandstofverbruik is dus beperkter dan die tussen de ADM's onderling.

Dynamisch of agressief vaargedrag staat dan ook niet noodzakelijk in een rechtstreeks verband met het totale brandstofverbruik. Deelnemer 5 vormt een duidelijk voorbeeld waarbij beide maatstaven wel overeenkomen: deze deelnemer werd door alle ADM's als meest agressief beoordeeld en had eveneens het hoogste brandstofverbruik. Bij andere deelnemers waren de verschillen groter. Zo voerde deelnemer 18 relatief weinig dynamische correcties uit en scoorde daardoor goed volgens de ADM's, terwijl gedurende een groot deel van het traject een hoge motorbelasting werd aangehouden en het brandstofverbruik hoog bleef. Deelnemer 15 vertoonde daarentegen met een lager motorvermogen toch een dynamischer vaarpatroon door vaker te versnellen, vertragen of corrigeren. ADM's en brandstofverbruik beschrijven daarmee verschillende, maar gerelateerde aspecten van de bediening van een schip: de ADM's beschrijven hoe dynamisch het schip wordt bewogen, terwijl het brandstofverbruik weergeeft hoeveel energie daarvoor uiteindelijk wordt gebruikt.

Ook de derde deelvraag, of het traject kan worden onderverdeeld in regulier varen en manoeuvreren en hoe de ADM's zich in beide fases gedragen, kan positief worden beantwoord. Binnen dit onderzoek werd een reproduceerbare methode ontwikkeld waarbij de verhouding tussen de laterale en totale snelheid, de RMS van de versnelling en de totale snelheid ten opzichte van de gemiddelde snelheid gezamenlijk werden gebruikt om manoeuvreren te herkennen. Hiermee kon het traject op basis van de gemeten beweging van het schip worden opgesplitst zonder voor iedere deelnemer handmatig het begin van de manoeuvreerfase te bepalen.

De afzonderlijke analyse van beide fases toont waarom deze opdeling relevant is. Tijdens regulier varen ligt de snelheid doorgaans hoger en worden versnellingen door rRPA en rCA relatief zwaar beoordeeld doordat deze parameters afhankelijk zijn van de gemiddelde snelheid. Tijdens manoeuvreren ligt de snelheid lager, maar vinden doorgaans meer correcties en opeenvolgende snelheidsveranderingen plaats. In deze fase bleek JE gevoeliger voor abrupte veranderingen, omdat deze parameter de versnelling rechtstreeks relateert aan de zwaartekracht en niet afhankelijk is van de gemiddelde snelheid. De detailanalyses tonen bovendien dat een deelnemer tijdens regulier varen relatief rustig kan varen, maar tijdens manoeuvreren een veel dynamischer profiel kan vertonen, of omgekeerd. Een ADM-waarde voor het volledige traject vertelt daardoor niet volledig waar het agressieve gedrag ontstaat. De opsplitsing maakt het mogelijk om ook specifieke delen van het vaargedrag te identificeren die voor verbetering vatbaar zijn.

De hoofdonderzoeksvraag kan uiteindelijk als volgt worden beantwoord: agressief vaargedrag kan aan de hand van parameters worden gekwantificeerd, maar niet door één parameter los van zijn operationele context te interpreteren. ADM's maken verschillen in dynamisch gedrag meetbaar en bieden de mogelijkheid om deelnemers, trajecten en afzonderlijke vaarfases objectief te vergelijken. AJE lijkt hierbij de meest geschikte hoofdparameter voor de scheepvaart, terwijl RPA en CA aanvullende informatie leveren. De beperkte overeenkomst met het brandstofverbruik toont tegelijkertijd dat dynamisch vaargedrag slechts één onderdeel vormt van de uiteindelijke energie-efficiëntie van een schip.

Daarmee wordt ook het bredere belang van deze studie duidelijk. ADM's bieden een methode om een tot nu toe moeilijk kwantificeerbaar onderdeel van ecovaren, namelijk het gedrag van de persoon die het schip bestuurt, meetbaar te maken. Door deze parameters in toekomstig onderzoek te combineren met gegevens over brandstofverbruik, motorbelasting, telegraaf- en roercommando's en externe omstandigheden kan beter worden bepaald welke operationele keuzes daadwerkelijk energie-efficiënt zijn. ADM's vormen daarmee een bruikbare eerste stap richting een meer data gedreven benadering van ecovaren, waarbij naast technische optimalisatie ook het menselijke handelen als mogelijke bron van efficiëntiewinst wordt meegenomen. Op termijn kan deze kennis worden ingezet voor monitoring, feedback en opleiding van maritieme professionals en zo bijdragen aan een lager energieverbruik binnen de bestaande vloot.

9 Bibliografie

- Agarwal, M. (2019, april 26). *What is The Speed of a Ship at Sea?* Marine Insight. <https://www.marineinsight.com/speed-of-a-ship-at-sea/>
- Edwards, A. J. (2022). Aggressive-dynamics metrics for drive-cycle characterization. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 14, 100592. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100592>
- Europese Commissie. (2016). *Commission Regulation (EU) 2016/646 of 20 April 2016 amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6)* (No. 2016/646; pp. 1-22).
- Europese Unie Vertegenwoordiging in België. (2026, april 29). *Staat van het klimaat 2025: Europa warmer sneller op dan ooit*. https://belgium.representation.ec.europa.eu/actualites-et-evenements/actualites/etat-du-climat-2025-leurope-se-rechauffe-plus-vite-que-jamais-2026-04-29_nl
- Evans, L. (1979). Driver Behavior Effects on Fuel Consumption in Urban Driving. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. <https://doi.org/10.1177/001872087902100401>
- Faber, J., Hanayame, S., Zhang, S., & Pereda, P. (2021). *Fourth IMMO GHG Study 2020 Full Report*. Dalian Maritime University, CE Delft, NMRI, ClassNK, Fudan University, Manchester Metropolitan University, UMAS, Purdue University, ICCT, fipe, Krannert School of Management.
- GREENPORT Alliances. (z.d.). *Over GREENPORT*. Geraadpleegd 5 augustus 2026, van <https://greenportalliance.eu/nl/>
- International Maritime Organization. (2002). *International Convention for the Safety of Life at Sea—Chapter V - Safety of Navigation*. IMO. Versie 03/06/2026 via https://dmr.regs4ships.com/docs/international/imo/solas/chp_05/index.cfm
- International Maritime Organization. (2013). *Convention on the international regulations for preventing collisions at sea, 1972*. IMO. Versie 07/08/2026 <https://dmr.regs4ships.com/docs/international/imo/conv/colregs72.cfm>
- International Maritime Organization. (2015). *Revised guidelines for the onboard operational use of shipborne automatic identification systems (AIS)*. Versie 03/06/2026 via https://dmr.regs4ships.com/docs/international/imo/resolutions/ass/1106_29.cfm
- International Renewable Energy Agency. (2024). *Shipping (Decarbonising hard-To-Abate sectors with renewables: Perspectives for the G7)*. IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Apr/IRENA_G7_Decarbonising_hard_to_abate_sectors_2024.pdf
- Labrés Pohl, I. (2023). *The State of Shipping and Oceans. Understanding the impact of global shipping on climate, the ocean and human health*. [Report]. Seas at Risk VZW.

- O'Keefe, M. P., Simpson, A., Kelly, K. J., & Pedersen, D. S. (2007). *Duty Cycle Characterization and Evaluation Towards Heavy Hybrid Vehicle Applications*. SAE World Congress and Exhibition.
- Peng, P., Wenhui, Q., Yang, X., Chiyomi, M., & Kazuya, T. (2019). *Impact of Driver Behavior on Fuel Consumption: Classification, Evaluation and Prediction Using Machine Learning*. 78515-78523. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2920489>
- Redsell, M., Lucas, G. G., & Ashford, N. J. (1993). Factors Affecting Car Fuel Consumption. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, (207). https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1993_207_155_02
- Schalm, O., Lemmens, J., & De Wilde, L. (2026, mei 27). *Quantifying Human-Driven Energy and Cost Variability in Tugboat Manoeuvres*. 11th International Conference on Maritime Transport, Barcelona.
- Sirimanne, S. N., Hoffmann, J., Asariotis, R., Assaf, M., Bacrot, C., Benamara, H., Hansen, P., Kulagi, T., Premti, A., Rodríguez, L., & Youssef, F. (2023). *Review of maritime transport: Towards a green and just transition*. UNCTAD.
- Torfs, M. (2025, januari 10). *Aarde bereikte 1,6 graden opwarming in 2024: "Het gaat zeer hard, maar oplossingen liggen op tafel"* | VRT NWS Nieuws [Nieuwssite]. VRTNWS. <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2025/01/07/klimaat-jaarrapport-copernicus-2024-warmste-jaar-ooit-gemeten/>
- Vasilis, K. (2024, juli 2). *How often do the positions of the vessels get updated on MarineTraffic?* | *MarineTraffic*. <https://support.marinetraffic.com/en/articles/9552905-how-often-do-the-positions-of-the-vessels-get-updated-on-marinetraffic>
- Vlaamse Stichting V. (2026, maart 18). *Snelheidslimieten België: Hoeveel mag je rijden in en buiten bebouwde kom, op snelwegen?* <https://www.veiligverkeer.be/veiligrijden/snelheid/regels-snelheid-en-snelheidslimieten/>
- Waterbouwkundig Laboratorium. (z.d.). *AIS-analyse*. Geraadpleegd 31 mei 2026, van <https://www.waterbouwkundiglaboratorium.be/nl/expertise/havens-en-vaarwegen/ais-analyse>
- Wikipedia-bijdragers. (2025, februari 16). *Kwadratisch gemiddelde*. Wikipedia, de vrije encyclopedie. https://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Kwadratisch_gemiddelde&oldid=68906482

10 Bijlage



In het bestand AJE.xlsx staat per tabblad een deelnemer hier word per deelnemer JE en AJE berekend. In het eerste blad genaamd AJE werden de grenswaarden berekend. Hier is ook het onderzoek gedaan naar het opsplitsen in manoeuvreren en regulier varen



In het bestand CA.xlsx staat per tabblad een deelnemer hier word per deelnemer rCA en CA berekend. In het eerste blad genaamd CA werden de grenswaarden berekend.



In het bestand Resultaten.xlsx werden de resultaten van alle ADM's samengevoegd om de figuren en tabellen te creëren, hier werd ook het onderzoek gedaan voor de deelnemer 5, 15 en 18 voor de bespreking in detail.



In het bestand RPA.xlsx staat per tabblad een deelnemer hier word per deelnemer rRPA en RPA berekend. In het eerste blad genaamd RPA werden de grenswaarden berekend.