

Milieu-impact tijdens het loodsen – traject Schelde

De Blende Lise

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

Promotor: Geert Potters

Academiejaar 2023- 2024

Woord vooraf

Het klimaat krijgt steeds meer belangstelling. Ook in de scheepvaartsector wordt er meer belang gehecht aan duurzaamheid en gezocht naar alternatieve oplossingen om deze te minimaliseren. Deze scriptie heeft als doel de mogelijkheden te onderzoeken om de CO₂-uitstoot van schepen te verminderen. Specifiek werd er gericht op methodes die toegepast kunnen worden op de trajecten die belooft worden op de Schelde. Door verschillende modellen te vergelijken, werden methoden gevonden die op dit traject toegepast kunnen worden. Aan de hand van cijfermateriaal van schepen die het Scheldetraject hebben afgelegd, wordt bepaald hoe de impact op het klimaat kan worden verminderd tijdens het loodsen.

Ik bedank graag mijn promotor Geert Potters voor de samenwerking, nodige hulp en advies. Daarnaast bedank ik Kim Ossieur voor haar interesse in de ecologische impact tijdens het loodsen en haar vraag naar mogelijkheden om deze te verminderen, alsook voor het delen van haar tijd en kennis. Tot slot bedank ik ook graag Eric Poirier en het Loodswezen voor hun tijd en moeite voor het verzamelen van de scheepsgegevens.

Samenvatting

In deze scriptie is onderzocht hoe de milieu-impact kan verminderd worden door het verlagen van de CO₂-uitstoot van schepen tijdens het beloodste traject op de Schelde. De uitstoot van schepen bestaat uit schadelijke stoffen zoals verschillende broeikasgassen: koolstofdioxide, methaan, stikstofoxiden en zwaveloxiden. De uitstoot van schepen zorgt ervoor dat het aandeel van deze broeikasgassen in de atmosfeer stijgt. Deze gassen hebben nadelige effecten op het klimaat, de mens en het biologisch ecosysteem. Zo dragen de stoffen bij aan de opwarming van de aarde, de stijging van het zeewatertemperatuur, het stijgen van het zeeniveau, het extremer worden van het weer en de verspreiding van ziektes zoals malaria.

Verschiedende modellen werden bestudeerd om het effect van slow steaming op kortere trajecten, met name het beloodste Scheldetraject, te kwantificeren. Bij de toepassing van de gegevens uit huidige onderzoek, werd vastgesteld dat de beste resultaten werden verkregen bij het gebruik van de modellen van Corbett et al. (2009) en Chang et al. (2014). Hieruit bleek dat een vertraging met 10% ten opzichte van de manoeuvreer-snelheid, overeenkomt met een verlaging van 19% in het brandstofverbruik. Een vertraging van 30% ten opzichte van de manoeuvreer-snelheid, overeenkomt met een verlaging van 51% in het brandstofverbruik. Een vertraging die de helft trager is ten opzichte van de manoeuvreer-snelheid, overeenkomt met een verlaging van 75% in het brandstofverbruik. De grootste vermindering, die voorkomt wanneer de snelheid gehalveerd wordt, bedraagt 22 ton brandstof. Dit komt overeen met 70 ton CO₂ vermindering, een verlaging van 75%. Het effect van slow steaming is dus wel degelijk significant. Op basis van de keuzen over de snelheid die tijdens het loodsen gemaakt worden, kan er dus een effectieve bijdrage geleverd worden tijdens het beloodste traject.

Abstract

This thesis investigated how the environmental impact can be reduced by reducing CO₂ emissions from ships during the piloted route on the Scheldt. Ship emissions consist of harmful substances such as various greenhouse gases: carbon dioxides, methane, nitrogen oxides and sulfur oxides. Ship emissions increase the share of these greenhouse gases in the atmosphere. These gases have adverse effects on the climate, human and the biological ecosystems. For example, the substances contribute to global warming, the rise in the sea temperature, the rise of sea levels, the weather becoming more extreme and the spread of diseases such as malaria.

Various models were studied to quantify the effect of slow steaming on shorter routes, in particular the piloted Scheldt route. When applying the data from the current research, it was determined that the best results were obtained when using the models of Corbett et al. (2009) and Chang et al (2014). Those showed that a 10% deceleration compared to manoeuvring speed corresponds to a 19% reduction in fuel consumption. A 30% deceleration compared to manoeuvring speed corresponds to a 51% reduction in fuel consumption. A deceleration that is half slower compared to the manoeuvring speed corresponds to a 75% reduction in fuel consumption. The largest reduction which occurs when the speed is halved, is 22 tons of fuel. This corresponds to 70 tons of CO₂ reduction, a reduction of 75%. The effect of slow steaming is therefore indeed significant. So an effective contribution can be made during pilotage based on choices about speed made during the piloted process.

Inhoud

Lijst figuren	i
Lijst tabellen.....	iii
Lijst vergelijkingen	v
Lijst afkortingen	vi
1 Inleiding	1
2 Uitstoot.....	2
2.1 Maatregelen	3
2.1.1 <i>Energy Efficiency Design Index – EEDI</i>	4
2.1.2 <i>Energy Efficiency Existing Ship Index – EEXI</i>	5
2.1.3 <i>Carbon Intensity Indicator – CII</i>	5
2.2 Alternatieve brandstoffen	5
2.2.1 LNG	6
2.2.2 Waterstof.....	6
2.2.3 Ammoniak.....	7
2.2.4 Windenergie	7
2.3 Alternatieve aanpakken.....	8
3 Slow steaming.....	10
3.1 Concept.....	10
3.2 Modelmatige beschrijving van slow steaming	10
3.3 Factoren.....	19
4 Onderzoeksvraag	23
5 Materiaal en methoden.....	24
5.1 Het beschouwde Scheldetraject.....	24
5.2 Verzamelen cijfermateriaal	31
5.3 Uitwerking gegevens	36

5.3.1	Methode volgens Lindstad et al. (2011).....	39
5.3.2	Methode volgens Corbett et al. (2009) en Chang et al. (2014).....	40
5.3.3	Methode volgens Cariou (2011)	41
5.3.4	Omzetting naar CO ₂	41
6	Resultaten en discussie	43
6.1	Resultaten.....	43
6.1.1	Invloed SFOC en EL	43
6.1.2	Brandstofverbruik volgens methode van Linstad et al. (2011)	44
6.1.3	Brandstofverbruik volgens methode van Corbett et al. (2011) en Chang et al.(2014).....	45
6.1.4	Brandstofverbruik volgens methode van Cariou (2011)	51
6.1.5	Vertaling naar CO ₂ uitstoot.....	52
6.2	Discussie	53
7	Conclusie.....	56
8	Bibliografie.....	57

Lijst figuren

Figuur 1 Wereldwijde CO ₂ -emissies veroorzaakt door verschillende vormen van transport	1
Figuur 2 Procentuele stijging van C _F en P _E waarden van een containerschip van 230 meter met betrekking tot de conditie van de gladde romp	9
Figuur 3 Emissie en kosten als functie van de snelheid van het schip	13
Figuur 4 Vergelijking van scenario 1 en 2 voor de optimale snelheidsvermindering en de corresponderende CO ₂ reductie bij verschillende brandstofprijzen.....	15
Figuur 5 Invloed van brandstofaccijnzen op de CO ₂ reductie	16
Figuur 6 Loodstrajecten van het Scheldetraject. 1: Belgische loodstation, de Wandelaar. 2: Nederlandse loodstation, Steenbank. 3: Antwerpse haven. 4: Gentse haven.	25
Figuur 7 De Wielingen, Zeetraject voor schepen tot 6 meter diepgang. Traject vertrekt ter hoogte van de Songa boei (paarse bol) en loopt tot het Wandelaar loodstation (bol met vlag). Gebruik gemaakt van software van Navionics.	26
Figuur 8 De Scheur , Zeetraject voor schepen tot 13 meter diepgang. Traject vertrekt ter hoogte van de Songa boei (paarse bol) en loopt tot het Wandelaar loodstation (bol met vlag). Gebruik gemaakt van software van Navionics.	26
Figuur 9 De Vaargeul, Zeetraject voor schepen vanaf 13,1 meter diepgang. Traject vertrekt ter hoogte van de Songa boei (paarse bol) en loopt tot het Wandelaar loodstation (bol met vlag). Gebruik gemaakt van software van Navionics.	27
Figuur 10 Oostgat , Zeetraject voor minder diepe schepen, 7,5 meter bij laagwater en 9,5 meter bij hoogwater. Traject vertrekt ter hoogte van de Songa boei (paarse bol) en loopt tot het Steenbank loodstation, dat nog verder ten Noorden buiten de kaart ligt in lijn met de lichtenlijn. Gebruik gemaakt van software van Navionics.	27
Figuur 11 Westrond, Zeetraject voorschepen dieper dan 7,5 meter bij laagwater en 9,5 meter bij hoogwater. Traject vertrekt ter hoogte van de Songa boei en loopt tot het Steenbank loodstation, dat nog verder ten Noorden buiten de kaart ligt, Westpit following. Gebruik gemaakt van software van Navionics.	28
Figuur 12 verduidelijking ligging Songa boei en SS1 boei door behulp van software van Navionics. Afstanden van trajecten voor Zeetraject vertrekken van Songa boei. Afstanden	

voor Riviertraject vertrekken vanaf SS1 boei. Hiertussen ligt een afstand van 2,5 nautische mijl. Schaal 1 cm = 0,369 km.	29
Figuur 13 weergave op kaart van boei 85A Noordzeeterminal, Zandvlietsluis, Berendrechtsluis. Gebruik gemaakt van software van Navionics.	30
Figuur 14 Weergaven van Boudewijnsluis, Van Cauwelaertsluis, Deurganckdok, Kieldrechtsluis op kaart. Gebruik gemaakt van software van Navionics.	30
Figuur 15 Weergave Kallosluis met behulp van software van Navionics. Boudewijnsluis en Van Cauwelaertsluis als referentie.	31
Figuur 16 invloed Specific Fuel Oil Consumption (SFOC) en Engine Load (EL) op het brandstofverbruik. Berekend met de waardes van het schip MSC Altair. De minimale SFOC bedraagt 160 g/kWh, de maximale SFOC bedraagt 240 g/ KWH, de gemiddelde waarde voor de SFOC bedraagt 200 g/kWh. Hierbij werd een EL 0,95 gebruikt. De EL loopt van 70% tot 95%. Hierbij werd de gemiddelde SFOC gebruikt. De blauwe lijn geeft het verschil aan voor de ontwerpsnelheid van MSC Altair. De oranje lijn geeft het verbruik aan manoeuvreer-snelheid weer. De grijze lijn is aan een snelheid 30% trager dan de manoeuvreer-snelheid. Deze snelheid bedraagt 11,2 knopen.	44
Figuur 17 Brandstofverbruik aan ontwerpsnelheid volgens de methode van Lindstad et al., per schip met de gegeven waardes van het Loodswezen. Per schip werd met verschillende Specific Fuel Oil Consumption (SFOC). . De minimale SFOC bedraagt 160 g/kWh, de maximale SFOC bedraagt 240 g/ KWH, de gemiddelde waarde voor de SFOC bedraagt 200 g/kWh.	45
Figuur 18 Brandstofverbruik volgens methode van Corbett et al. (2011) en Chang et al.(2014) per snelheid per schip berekend met de waardes van het Loodswezen. Resultaten per snelheid weergegeven vanaf de manoeuvreer-snelheid van het schip. Bron: eigen werk.....	47
Figuur 19 Brandstofverbruik volgens methode van Corbett et al. (2011) en Chang et al.(2014) per snelheid per type schip berekend met de waardes van het MEPC.	50
Figuur 20 Brandstofverbruik in gram berekend volgens de methode van Cariou (2011) aan ontwerpsnelheid (blauw) en 30% tragere snelheid (oranje). Berekend met de gegevens van het Loodswezen.	51

Lijst tabellen

Tabel 1 Het resultaat van de optimale snelheidsvermindering bij de vier verschillende scenario's.	19
Tabel 2 Vergelijking van de verschillende modellen	20
Tabel 3 afstanden in nautische mijl van coordination point (CP) tot ligplaatsen in de Antwerpse haven. De afstanden van de sluizen werden genomen tot de ingang van de sluis. De afstand tot de Noordzeeterminal werd genomen tot het midden van de terminal. De afstand van het Deurganckdok werd genomen tot het midden van het dok.	29
Tabel 4 gegevens per schip verkregen van Belgische Loodswezen, nodig om de modellen te vervolledigen.	33
Tabel 5 gegevens Marine Environment Protection Committee (MEPC) uitgegeven door IMO. Hier werd voor het brandstofverbruik de verschillende soorten brandstoffen samen geteld tot een algemeen verbruik.	35
Tabel 6 verwerking gegevens MEPC. De gegevens uit Tabel 5 werden gebruikt om verder te rekenen om een gemiddelde snelheid en gemiddeld verbruik te berekenen. Verder werd door de afstand van het Scheldetraject het verbruik van dat traject berekend met die gemiddelde snelheid en gemiddeld verbruik.	35
Tabel 7 Excel verwerking gegevens Belgische Loodswezen nodig voor de modellen te vervolledigen. Hiermee wordt Berekening 1 uitgevoerd.	38
Tabel 8 Excel verwerking gegevens MEPC. De waarden worden weergegeven voor 4 type schepen. Hiermee wordt berekening 2 uitgevoerd.	39
Tabel 9 uitstootfactor per brandstof gebaseerd op de hoeveelheid koolstof aanwezig in de brandstof. Berekend aan de hand van molaire massa van koolstof en zuurstof.	42
Tabel 10 Effect van snelheidsdaling van 10%-30%-50% ten opzichte van manoeuvreer-snelheid op het brandstofverbruik van elk van de gegeven schepen. De procentuele verlaging in het brandstofverbruik ten opzichte van het brandstofverbruik aan manoeuvreer-snelheid wordt gegeven. Deze is voor alle schepen dezelfde. Alsook de snelheid (blauw) waarmee dit overeen komt wordt weergegeven. Het brandstofverbruik wordt uitgedrukt in gram (g). De snelheid wordt uitgedrukt in knopen.	47

Tabel 11 Effect van snelheidsdaling van 10%-30%-50% ten opzichte van manoeuvreer-snelheid op hoeveel tijd meer over het traject gedaan wordt aan deze vertraagde snelheid. De tijd wordt uitgedrukt in uur (h). Ook de huidige werkelijke tijd wordt weergegeven. De procentuele verandering werd genomen ten opzichte van de tijd aan manoeuvreer-snelheid.	48
Tabel 12 Brandstofverbruik van het Scheldetraject, het percentage tussen verschillende scheepstype. De percentageverschillen worden uitgedrukt ten opzichte van het andere type schip, bovenaan de tabel.....	50
Tabel 13 snelheid van schepen aan 30% tragere snelheid dan de manoeuvreer-snelheid. Rood geeft aan dat de 30% tragere snelheid hoger ligt dan de manoeuvreer-snelheid....	52
Tabel 14 Omzetting brandstofverbruik naar CO ₂ uitstoot, uitgedrukt in ton. Omzettingsfactor die gebruikt wordt bedraagt 3,15 ton per ton gebruikte brandstof, de omzettingsfactor van HFO.	53

Lijst vergelijkingen

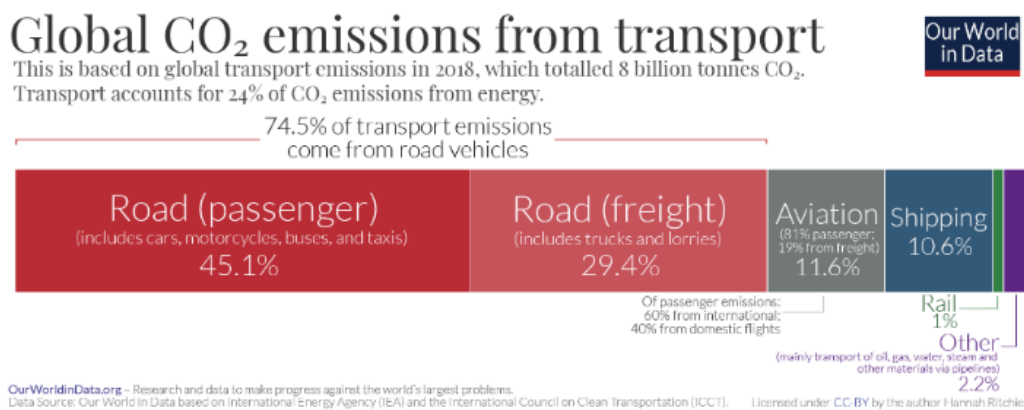
Vergelijking 1 Motorkracht model	11
Vergelijking 2 Het brandstofverbruik van een rondreis	11
Vergelijking 3 Kosten per nautische mijl (nm).....	12
Vergelijking 4 De winst maximaliserende snelheid	14
Vergelijking 5 Brandstofverbruik per reis.....	14
Vergelijking 6 Het break-even punt van de bunkerprijs waarvoor een reductie duurzaam is.....	16
Vergelijking 7 Verschil in brandstofverbruik voor verminderde snelheid voor een dienst van n aantal schepen	17
Vergelijking 8 Brandstofverbruik van de hoofdmotor op zee	17
Vergelijking 9 Het effect van snelheidsvermindering	18
Vergelijking 10 Reactie verbranding koolstof met Avogadro's getallen.	42

Lijst afkortingen

Afkorting	Definitie
CII	<i>Carbon Intensity Indicator</i>
COPD	<i>Chronic Obstructive Pulmonary Disease</i>
ECA	<i>Emission Control Areas</i>
EEDI	<i>Energy Efficiency Design Index</i>
EEXI	<i>Energy Efficiency Existing Ship Index</i>
GT	<i>Gross Tonnage</i>
HFO	<i>Heavy Fuel Oil</i>
IMO	<i>International Maritime Organisation</i>
LNG	<i>Liquefied Natural Gas</i>
RoRo	<i>Roll on Roll off</i>
SFOC	<i>Specific Fuel Oil Consumption</i>
TEU	<i>Twenty Foot Equivalent Unit</i>
W	Wandelaar
SB	Steenbank
CP	<i>Coordination point</i>
RTA	<i>Requested time of arrival</i>
NZT	Noordzeeterminal
ZV	Zandvlietsluis
BE	Berendrechtsluis
BO	Boudewijnsluis
DGD	Deurganckdok
KI	Kieldrechtsluis
KA	Kallosluis
CTN	Container vaarttuig
PCC	<i>Pure car carrier</i>
MEPC	<i>Marine environment protection committee</i>
MCR	<i>Maximum continues rate</i>

1 Inleiding

De scheepvaartsector wordt gezien als de ruggengraat van de internationale handel. Deze sector zorgt voor 80% van die internationale handel (Yan et al., 2021). Hieraan gelinkt zorgt de scheepvaart voor een groot deel van de wereldwijde uitstoot. Hoewel schepen relatief gezien minder uitstoten in vergelijking met de alternatieve transportmethodes zoals luchtvaart en wegverkeer (Figuur 1), kan hun invloed zeker niet onderschat worden (*Emissions from Planes and Ships*, 2019).



Figuur 1 Wereldwijde CO₂-emissies veroorzaakt door verschillende vormen van transport

Bron: *Cars, planes, trains: where do CO₂ emissions from transport come from?* (2020, oktober 6)

In 2007 bedroeg de uitstoot veroorzaakt door schepen voor 2.7% van de wereldwijde CO₂-uitstoot, wat overeenkomt met 870 miljoen ton (Psaraftis & Kontovas, 2013). In 2018 bedroeg de totale CO₂-uitstoot van schepen van 1056 miljoen ton (*Fourth Greenhouse Gas Study 2020*, z.d.). De uitstoot van schepen blijft groeien. Dit is een logisch gevolg van de groei van het wereldvloot, die over de voorbije jaren jaarlijks gestegen is met 7.4% (*World Fleet to Grow by 6.4% over the Coming Five Years, down from 7.4% in Previous 5 Years*, 2021).

In deze scriptie wordt onderzocht hoe de impact op uitstoot van schepen tijdens het beloodste traject op de Schelde verkleint kan worden. Hiervoor wordt eerst de uitstoot van schepen besproken met de huidige maatregelen en alternatieve aanpakken om de uitstoot te minimaliseren (H2). Hierna worden bestaande onderzoeksmethode naar *slow steaming* op lange trajecten geanalyseerd (H3Slow steaming). Als laatste werden de modellen van *slow steaming* toegepast op het beloodste Scheldetraject (H5, H6).

2 Uitstoot

Schepen stoten veel vervuilende gasen uit. De meest gekende zijn stikstofoxiden (NO_x), zwaveloxiden (SO_x) en kooldioxiden (CO_2). Deze gasen worden onderverdeeld in verschillende categorieën. De bekendste zijn de broeikasgassen. Deze gasen komen van nature voor en zorgen voor het natuurlijk broeikaseffect en houden warmte op aarde vast. Hierdoor is de gemiddelde temperatuur aan het aardoppervlak 15°C in plaats van -18°C . Door menselijke activiteiten is het aandeel van deze broeikasgassen sterk gestegen. Het gevolg hiervan is dat het aardoppervlak opwarmt met 0.3°C per jaar (Khandekar et al., 2005). Ook de zeewatertemperaturen stijgen. Deze opwarming heeft wereldwijde gevolgen en leidt onder andere tot het smelten van de polen, het stijgen van het zeeniveau en het extremer worden van het weer. Op land zal dit gaan over droogtes, stormen en overstromingen. Verder zal de stijging van het zeeniveau stukken land doen verdwijnen. Op de gebieden die hiervoor kwetsbaar zijn, woont 10% van de wereldbevolking. Deze gebieden liggen op minder dan 10 meter boven de zeespiegel. Bijkomend versterkt de verhoogde zee temperatuur de kracht van orkanen. Voorts zal de afwezigheid van koud weer de mogelijkheid geven dat ziektes zich meer verspreiden. Koud weer voorkomt dit door de dragers van ziektes zoals malaria (muggen) te doden (Kumar et al., 2012). Koolstofdioxide (CO_2), methaan (CH_4), distikstofmonoxide (N_2O) zijn de belangrijkste broeikasgassen die aan het stijgen zijn (*Greenhouse Gases*, 2017). Deze gasen komen onder andere vrij bij de productie en consumptie van fossiele brandstoffen.

Meer en meer aandacht wordt ook gegeven aan stikstofoxiden (NO_x) en zwaveloxiden (SO_x), vanwege hun negatieve effecten op het milieu, de gezondheid van de mens en het biologisch ecosysteem. Stikstofoxiden ontstaan van nature in kleine hoeveelheden doordat stikstof reageert met zuurstof. Zwaveloxiden ontstaan op eenzelfde manier, door de reactie van zwavel met zuurstof. Schepen, en ook andere vervoersmiddelen, stoten deze stoffen in grotere hoeveelheden uit. Ze komen vrij bij de verbranding van fossiele brandstoffen.

Voor de gezondheid van de mens komt het gevaar van zwaveloxiden voor in de vorm van fijnstof. Fijnstof zijn heel kleine deeltjes. Fijnstof kan worden verdeeld in twee groepen. Primair fijnstof dat het directe gevolg is van de verbranding van fossiele brandstoffen. Roet

is hier een voorbeeld van. Secundair fijnstof ontstaat door chemische reacties van zure gassen, zoals NO_x en SO_x, in de atmosfeer (Fuzzi et al., 2015). Door de grootte van fijnstof, kleiner dan 10 micrometer, worden ze niet tegengehouden door onze natuurlijke beschermingsmiddelen (bv. haartjes). Het gevolg is dat ze gemakkelijk in onze longen terecht komen. Dit heeft een schadelijk effect op onze longen. Patiënten met *Chronic Obstructive Pulmonary Disease* (COPD) en astma zijn hier extra gevoelig aan. Fijn stof verergert hun klachten en verkleint hun longcapaciteit ('Health Effects of Outdoor Air Pollution. Committee of the Environmental and Occupational Health Assembly of the American Thoracic Society.', 1996a). Het inademen van fijnstof verstoort bovendien de normale hartslag (Peters et al., 1999). Hierdoor zijn patiënten met hart- en vaataandoening ook gemakkelijker een slachtoffer van fijnstof; bij hen worden de symptomen van hun aandoening verergerd.

Het effect van stikstofoxiden en zwaveloxiden op het biologisch ecosysteem is dat het bijdraagt aan de verzuring van ons ecosysteem waardoor verzwakkingen in de ecosysteemresistentie optreden. Dit fenomeen gebeurt in de vorm van zure regen. Deze term verwijst naar verschillende vormen van verzuring van het milieu. De term omvat regen, sneeuw, mist, stof in natte of droge vorm dat zuur is. Zure regen wordt verkregen wanneer de vervuilende stoffen die aanwezig zijn in de atmosfeer oplossen in regen. Hierdoor stijgt de zuurtegraad van deze regen. De zuurtegraad wordt bepaald door de pH-waarde. Normale regen heeft een pH waarde van 5,6. Bij zure regen ligt deze waarde tussen de 3,5 en 5 (Menz & Seip, 2004). Zwaveloxiden en stikstofoxide als secundair fijnstof reizen honderden kilometers waardoor ze gebieden, op grote afstand van de plekken waar ze worden uitgestoten, vervuilen.

2.1 Maatregelen

Meer en meer wordt nagedacht hoe de maritieme uitstoot verminderd kan worden. Alternatieve brandstoffen, beleidsprogramma's en alternatieve manieren worden gezocht om dit probleem aan te pakken. Zo worden op beleidsvlak programma's vastgelegd, met in Europa de *European Green Deal*. Hieronder valt *Fit For 55*; die houdt in dat tegen 2030 de netto-uitstoot van broeikasgassen met ten minste 55% moeten verminderen in vergelijking met 1990. Het uiteindelijke doel is om tegen 2050 het eerste klimaatneutrale continent te

zijn. Hiermee wordt bedoeld dat de netto-uitstoot van broeikasgassen nul bedraagt (*Een Europese Green Deal*, 2021). Vanuit de *International Maritime Organisation* (IMO) werden doorheen de jaren al verschillende internationale regels opgelegd om zo de vervuiling van schepen te voorkomen. De conventie die de preventie van vervuiling door schepen beschrijft in vorm van voorschriften is *The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships* (MARPOL). Een onderdeel van de MARPOL bestaat uit het bepalen van de toegelaten NO_x en SO_x scheepsuitlaat in bijzonder gevoelige zeegebieden (*Particularly Sensitive Sea Areas*, PSSA) alsook de rest van de zee. Om de PSSA-gebieden te beschermen behoren ze tot de *Emission Control Areas* (ECA-zones) waar de uitstoot regulatie veel strenger is dan andere zeegebieden. Zo is deze voor zwaveloxiden in de ECA-zone 0.1% zwaveloxide in de brandstof in vergelijking met 0.5% zwaveloxide in de brandstof globaal gezien. Voor stikstofoxiden is de waarde afhankelijk van het bouwjaar van de motor en de motorsnelheid (Perera & Mo, 2016). Voorts worden vanuit de IMO ook verschillende indexen opgesteld zoals de *Energy Efficiency Design Index* (EEDI), *Energy Efficiency Existing Ship Index* (EEXI) en de *Carbon Intensity Indicator* (CII) (zie respectievelijk paragraaf 2.1.1, 2.1.2 en 2.1.3). Dit zijn indexen voor onder andere de efficiëntie van schepen, waaraan schepen moeten voldoen.

2.1.1 *Energy Efficiency Design Index* – EEDI

Schepen die nieuw gebouwd worden, moeten sinds 2013 voldoen aan de EEDI. Het doel is het gebruik van efficiëntere motoren en apparatuur te promoten met als gevolg minder vervuiling. De EEDI is specifiek voor elk schip en wordt uitgedrukt in gram kooldioxide per capaciteitsmijl van het schip. Voor elk type schip wordt aan referentie level bepaald waaronder de schepen moeten zitten om te voldoen aan de EEDI. Deze waarde daalt met grotere *deadweight*, aangezien grotere schepen efficiënter zijn. Deze referentie wordt uitgedrukt in een verminderd percentage CO₂ ten opzichte van schepen hun efficiëntie die gebouwd werden tussen 2000 en 2010. Om voor voortdurende verbetering te zorgen, wordt het percentage om de vijf jaar verhoogd. Zo wordt er een reductie van 30% verwacht bij schepen die na 2025 gebouwd worden. Een lagere EEDI-waarde betekent een efficiënter schip. Hoe deze EEDI bereikt wordt, is vrij in te vullen door technische en ontwerp gebaseerde maatregelen. Deze maatregelen dienen bij te dragen aan een verminderd brandstof gebruik (*Energy Efficiency Measures*, z.d.).

2.1.2 *Energy Efficiency Existing Ship Index – EEXI*

Ook bestaande schepen dienen te voldoen aan een minimum energie efficiëntie waarde. Indien het schip niet aan deze waarde voldoet, dienen er maatregelen genomen te worden. Aangezien er op technisch vlak geen grote veranderingen kunnen gedaan worden na de bouw van een schip, worden om aan de EEXI te voldoen hoofdzakelijk operationele maatregelen genomen. Ook de EEXI waarde is, zoals de EEDI, specifiek voor elk type schip en dient niet overschreden te worden. De EEXI van een schip wordt berekent op basis van haar technische en apparatuur gegevens. Hoe kleiner de EEXI, hoe efficiënter het schip en dus hoe minder uitstoot. EEXI is sinds 1 november 2022 in werking getreden en verplicht voor schepen groter dan 400 GT.

2.1.3 *Carbon Intensity Indicator – CII*

De CII wordt sinds 1 januari 2023 gegeven aan schepen boven de 5000 GT. De CII wordt bepaald aan de hand van het brandstofgebruik gedurende één jaar. Het doel hiervan is om de koolstofintensiteit te verbeteren door de operationele prestaties van bestaande schepen te verbeteren. Schepen worden verdeeld in klasse gaande van A tot E. Een actieplan wordt vereist van schepen die drie opeenvolgende jaren klasse D behalen of 1 jaar klasse E. Dit actieplan moet aantonen hoe het schip klasse C of hoger gaat bereiken. Een verbetering in klasse kan bereikt worden door een lagere koolstofbrandstof maar ook door operationele en technologische aanpakken waaronder snelheid- en route optimalisatie; schoonmaken van de romp; trim, ballast en diepgang optimalisatie (*EEXI and CII - ship carbon intensity and rating system, z.d.*).

2.2 Alternatieve brandstoffen

Om aan deze doelen te komen, gebeurt er veel onderzoek naar alternatieve brandstoffen. Veel van deze brandstoffen lijken op eerste zicht veelbelovend. Vaak hebben ze bij het verbruik een verminderde CO₂-uitstoot ten opzichte van de oorspronkelijke brandstoffen, aardgas en diesel. Echter dient gekeken te worden naar de netto-uitstoot van deze alternatieven en dient de volledige levenscyclus geanalyseerd te worden. Bij enkele alternatieven is er een vermindering van CO₂-uitstoot maar gaat dit ten koste van de uitstoot van andere schadelijke broeikasgassen als NO_x en SO_x. LNG, waterstof, ammoniak en windenergie zijn enkele voorbeelden van alternatieven die onderzocht worden.

2.2.1 LNG

Liquefied Natural Gas (LNG) is een fossiele brandstof, namelijk vloeibaar aardgas. Het bestaat hoofdzakelijk uit methaan (CH_4). Verder bevat LNG ook ethaan, propaan en stikstof. Het gas wordt vloeibaar gemaakt door het bij atmosferische druk te koelen tot -162°C . Dit maakt de dichtheid veel groter waardoor het makkelijker vervoerbaar is in grote hoeveelheden.

LNG werd eerst gezien als een goede alternatieve brandstof vanwege zijn verminderde uitstoot van CO_2 , SO_x en NO_x ; LNG heeft zo een lage uitstoot aan broeikasgassen. Deze bedragen ten opzichte van diesel 99% minder in SO_x , 80% minder in NO_x en 20% minder in CO_2 (Pfooser et al., 2018). Hierdoor wordt LNG gezien als een interessant alternatief voor schepen die in ECA-zones varen. Bovendien is LNG ten op zichte van bv diesel efficiënter aangezien het meer energie per kilo bevat. Echter zouden de broeikasgassen niet verminderen over de gehele levenscyclus van LNG. Het grote nadeel van LNG is het methaanslip. Hiermee wordt onverbrand methaan dat vrij komt bedoeld. Methaan houdt 86 keer meer warmte vast dan dezelfde hoeveelheid CO_2 . Wanneer er zelfs maar een kleine hoeveelheid methaan vrij komt tijdens de levenscyclus van LNG, heeft dit een groter effect op het broeikaseffect dan andere brandstoffen (Pavlenko et al., z.d.). Verder is LNG ook eindig aangezien het verbruik van fossiele brandstoffen hoger ligt dan de productie door de natuur ervan.

2.2.2 Waterstof

Waterstof als brandstof gebruiken, heeft als groot voordeel dat bij de verbranding water vrijkomt. Een direct positief effect is dat er geen CO_2 vrijkomt. In vergelijking met de conventionele brandstoffen, diesel en *heavy fuel oil*, genereert waterstof meer energie per massa (Bicer & Dincer, 2018). Echter waar het waterstof vandaan komt, is het addertje onder het gras. Waterstof dient geproduceerd te worden. Het komt in de natuur niet in bruikbare vorm voor. Het is dan ook dit productieproces waar rekening mee gehouden wordt om de duurzaamheid van waterstof te bepalen.

Waterstof wordt algemeen onderverdeeld in drie categorieën naargelang hoe het geproduceerd wordt. Deze categorieën worden volgens een kleurencode weergegeven:

grijs waterstof, blauw waterstof en groen waterstof. Waarbij grijs de meest vervuilde categorie is. Het productieproces van grijs waterstof zorgt voor een grote hoeveelheid CO₂ die vrijkomt. Deze uitstoot is het gevolg van stoomreforming van aardgas. Het is vanwege het gebruik van fossiele grondstoffen dat er een proces gerelateerd CO₂-emissie ontstaat. Op dezelfde methode wordt blauw waterstof geproduceerd. Het verschil is dat de CO₂ die vrijkomt bij het productieproces onder de grond wordt opgeslagen. Hierdoor wordt het grootste deel van de CO₂ emissie vermeden (Hermesmann & Müller, 2022). Bij groen waterstof wordt water opgesplitst in waterstof en zuurstof door middel van groene energie, zonne-of windenergie (Atilhan et al., 2021). Hierbij worden er geen fossiele grondstoffen gebruikt en komt er dus geen proces gerelateerde CO₂ vrij.

2.2.3 Ammoniak

In de laatste jaren werd ammoniak een populairdere alternatieve brandstof. Ammoniak bestaat uit één stikstofatoom en drie waterstofatomen, NH₃. Hierdoor zal bij verbranding geen koolstof of sulfer worden uitgestoten. Wel kan bij verbranding in de juiste omstandigheden NO_x vrijkomen. Een groot nadeel is de vorming van N₂O emissie. Deze emissie heeft een 300 keer groter effect op het broeikaseffect dan de emissie van CO₂. Dit kan vermeden worden met de juiste verbrandingsstrategie. Verder is ook het slip van ammoniak een belangrijk probleem vanwege zijn toxiciteit (Zincir, 2020).

2.2.4 Windenergie

Wind als voorstuwingsmiddel voor schepen wordt al eeuwenlang gebruikt. De eerste zeilschepen dateren uit de Oudheid. De industriële revolutie en het streven naar hogere efficiëntie van schepen, maakte hier een eind aan. Die verandering dateert uit de 19^{de} eeuw, met de opkomst van stoomschepen. Dit hoofdzakelijk omdat de reisduur sterk verminderde. Bovendien werden de reizen met stoomschepen onafhankelijk van de wind- en stroomcondities (Chin et al., 2006). Met deze reden werden schepen op windenergie niet langer meer gebruikt. Het is met de vooruitzichten op decarbonisatie dat de interesse naar schepen op windenergie terug begon te groeien.

Er wordt dan ook onderzoek wordt gedaan naar hoe windenergie gebruikt kan worden in de huidige maritieme situatie. Verschillende methodes worden onderzocht om met behulp

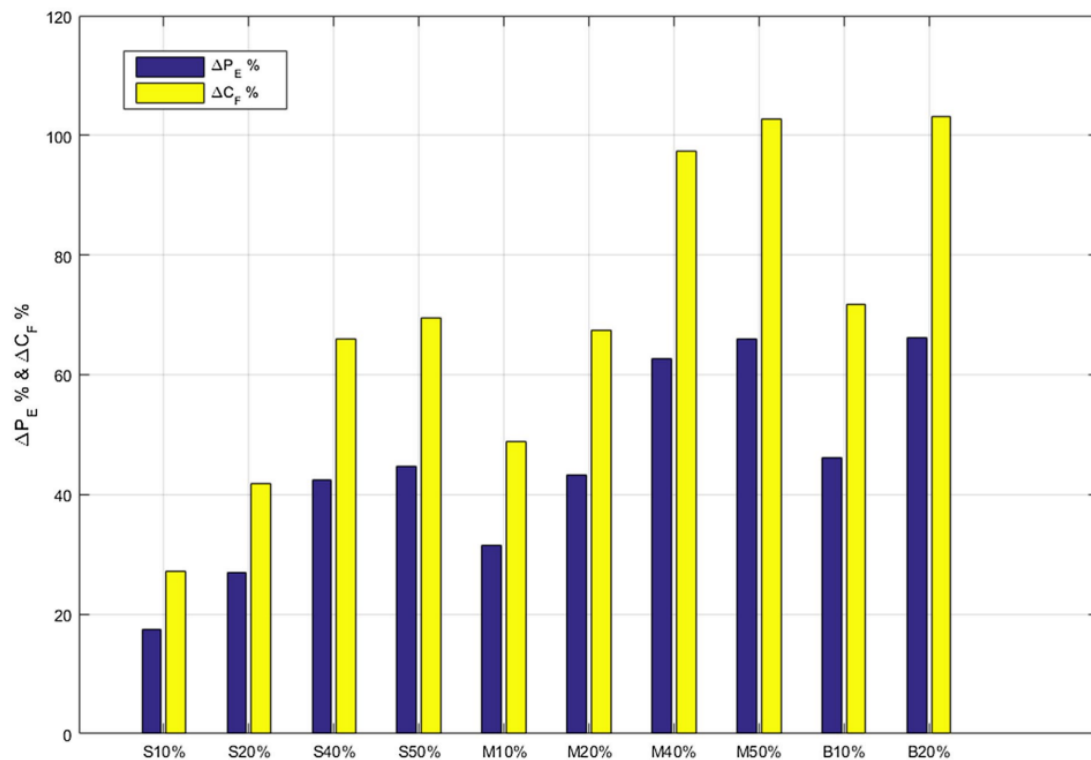
van windenergie, de voortstuwing door de motor van schepen te verminderen. Lele en Rao vermelden de vijf meest belovende technieken: windkites, vleugelzeilen (wing sails), Flettner rotor, windturbines en windturbines in de lucht (Lele & Rao, 2016). Verder onderzoek is nodig naar het commerciële toepassing ervan. Het is vanwege de hoge kosten dat het onderzoek vertraagt. Verder willen scheepseigenaars hier ook een economisch voordeel uithalen. De koolstofuitstoot vermindert bij schepen die varen met behulp van windenergie. Dit is het gevolg van varen bij verminderde motorkracht bij eenzelfde snelheid. Volledig terug op windenergie varen is commercieel niet mogelijk. Windenergie kan een aansluitende maatregel zijn om in combinatie met andere alternatieven te gebruiken. Op deze manier kan een zo hoog mogelijke reductie van uitstoot bereikt worden (Chou et al., 2021).

2.3 Alternatieve aanpakken

Bij de nieuwbouw van schepen moet er ook op een aantal technische aspecten gelet worden, zoals het volgen van een energiezuinig ontwerp, het installeren van verbeterde voorstuwing (propellor) en aandrijfsysteem, en de keuze van de brandstofopties. Eens het schip in werking is, kan hier weinig aan veranderd worden. Voorstuwingsmechanismen worden voortdurend verbeterd om een zo hoog mogelijke efficiëntie te bereiken (Tadros et al., 2021). Bij een energiezuinig ontwerp wordt vooral gekeken naar de optimalisatie van de scheepsweerstand zoals met behulp van een bulbsteven. Hoe kleiner de weerstand, hoe minder brandstof gebruikt dient te worden om aan eenzelfde snelheid te varen. Bij het ontwerp wordt ook gekeken naar de schaalvoordelen. Grotere schepen zijn energie-efficiënter per vrachteenheid dan eenzelfde capaciteit met kleinere schepen te bereiken (Bouman et al., 2017).

Operatieve maatregelen om uitstoot te verminderen, gaan over maatregelen terwijl het schip operationeel is. Zo kunnen er operatieve maatregelen worden genomen om een verminderde weerstand te creëren. Door de optimale trim en het vermijden van aangroei kan de weerstand verkleind worden. Een lagere voorstuwingskracht voor eenzelfde snelheid kan bereikt worden indien men vaart met de optimale trim. Met deze optimale trim kan een 8,7% hogere efficiëntie bereikt worden (Ahmed Helmy Abouelfadl & Essam Eldin Youssef Abdelraouf, 2016). Aangroei heeft een groot effect op de weerstand van een

schip (Figuur 2). Hierbij is er een procentuele stijging van het effectief vermogen P_E dat nodig is voor met eenzelfde snelheid te varen die het gevolg van de procentuele stijging van de wrijvingsweerstandscoefficiënt C_F is. De wrijvingsweerstandscoefficiënt werd weergegeven voor verschillende grootte van aangroei (B = groots, M = middelgroot, S = klein) met het percentage dat ze de platen bedekken. Door een aangroei werende laag aan te brengen aan de bodem van een schip, kan de stijging van dit brandstofverbruik tegengegaan worden (Demirel et al., 2017). Er kan ook rekening gehouden worden met het weer en naargelang de omstandigheden kan een gunstigere route gekozen worden. Verder is snelheidsvermindering (zie paragraaf 3) een operationele maatregel die steeds meer aandacht krijgt vanwege de vermindering in uitstoot (Bouman et al., 2017).



Figuur 2 Procentuele stijging van C_F en P_E waarden van een containerschip van 230 meter met betrekking tot de conditie van de gladde romp

Bron: Demirel et al. (2017) Slow steaming

3 Slow steaming

3.1 Concept

In de scheepvaart werd “sneller” lang als “beter” gezien. Dit om de wachttijd van goederen zo klein mogelijk te houden. Het gebruik van steeds snellere schepen is de reactie op de sterke groei van de wereldhandel (Psaraftis & Kontovas, 2013). Door nieuwe ontwerpen en betere technologie werd het effectief mogelijk steeds sneller te varen. Het idee achter slow steaming is in eerste instantie ontstaan om de hoge energiekost vanwege verhoogde brandstofprijzen te verminderen. Tegenwoordig wordt bij slow steaming gezocht naar de optimale snelheid waarbij rekening gehouden wordt met het aankomst slot van een ligplaats in de haven en de vermindering van brandstof gebruik. Slow steaming is varen aan een snelheid die lager is dan de maximale snelheid. Hierbij is de snelheid een beslissingsvariabele. Het positief effect hiervan is dat het brandstofverbruik van schepen vermindert wat rechtstreeks een vermindering van CO₂-uitstoot betekent. Reders hebben nog andere redenen om te kiezen slow steaming toe te passen. Zo is het ook een goede manier om het overaanbod van de scheepscapaciteit en de verhoging van de bunkerprijs op te vangen (Yin et al., 2014). Dit laatste is van groot belang bij reders omdat energie een groot deel van de kost is.

3.2 Modelmatige beschrijving van slow steaming

Verschillende onderzoekers bestudeerden al de effecten van slow steaming. Lindstad et al. (2011) onderzochten bijvoorbeeld de kostenverlaging in vergelijking met de vermindering in broeikasgasuitstoot bij varen aan een verminderde snelheid. Hierbij vergeleken ze het brandstofverbruik met de kosten hieraan gerelateerd door behulp van modellen (Vergelijking 1, Vergelijking 2, Vergelijking 3). Met deze modellen konden ze kosten en emissies voor verschillende scheepsklassen berekenen. De volgende scheepsklassen werden hiervoor onderzocht: RoRo vaartuigen, container vaartuigen, vrachtschepen en andere vaartuigen, met als doel kosten- en emissieminimalisatie.

$$P = \underbrace{\frac{1}{\eta(j + k\sqrt{v/v_d})}}_K \left(\underbrace{\left(\frac{\rho C_T S v^3}{2} \right)}_{P_s} + \underbrace{\left(\frac{1}{2} \frac{C_{aw} \rho g (H_{1/3}/2)^2 B^2}{L} (v + u) \right)}_{P_w} \right) + \underbrace{P_{aux}}_{P_{aux}}$$

Vergelijking 1 Motorkracht model
Bron: Lindstad et al. (2011)

Deze vergelijking bestaat uit vier onderdelen: de propellerefficiëntie K , de stilstaande waterkracht P_s de kracht van de golven P_w en de kracht van de hulpmotor P_{aux} . De propellerefficiëntie K wordt hierbij weergegeven als functie van de snelheid van het vaartuig v en de efficiëntie η bij de ontwerpsnelheid v_d . De propellerefficiëntie daalt volgens de constanten j en k wanneer de snelheid v verlaagd wordt. De stilstaande waterkracht P_s wordt bepaald door de dichtheid van het water ρ , de totale weerstandscoefficiënt C_T , het natte oppervlak S en de snelheid v . De kracht van de golven P_w wordt uitgedrukt door het gemiddelde van de golfkracht dat een vaartuig ondergaat gedurende een typische rondreis, vandaar de factor $\frac{1}{2}$. Om deze kracht te bepalen wordt de dichtheid van het water ρ , de weerstandscoefficiënt voor de golven C_{aw} , de verticale kracht g , de significante golfhoogte waarvan de amplitude de helft van de hoogte is $H_{1/3}$, de breedte van het schip ter hoogte van de waterlijn B , de lengte van het schip ter hoogte van de waterlijn L , de snelheid v die overeenkomt met de snelheid van de golven ten opzichte van die van het vaartuig in rekening gebracht.

$$F = F_s + F_{p\&s} = K_f \left(\left(\frac{PD}{v} \right) + (P_{p\&s} T_{p\&s}) \right)$$

Vergelijking 2 Het brandstofverbruik van een rondreis
Bron: Lindstad et al. (2011)

Het brandstofgebruik voor een rondreis bevat het brandstofgebruik tijdens het varen F_s en het brandstofgebruik in de haven en trage zones $F_{p\&s}$. Dit wordt bepaald door de vereiste motorkracht P , de afstand van de rondreis D , de werkelijke snelheid van het vaartuig v , de hoeveelheid brandstof (in gram) per geproduceerde kWh K_f , de motorkracht nodig in de haven en trage zones $P_{p\&s}$ en is de tijd in de haven en trage zones per rondreis $T_{p\&s}$.

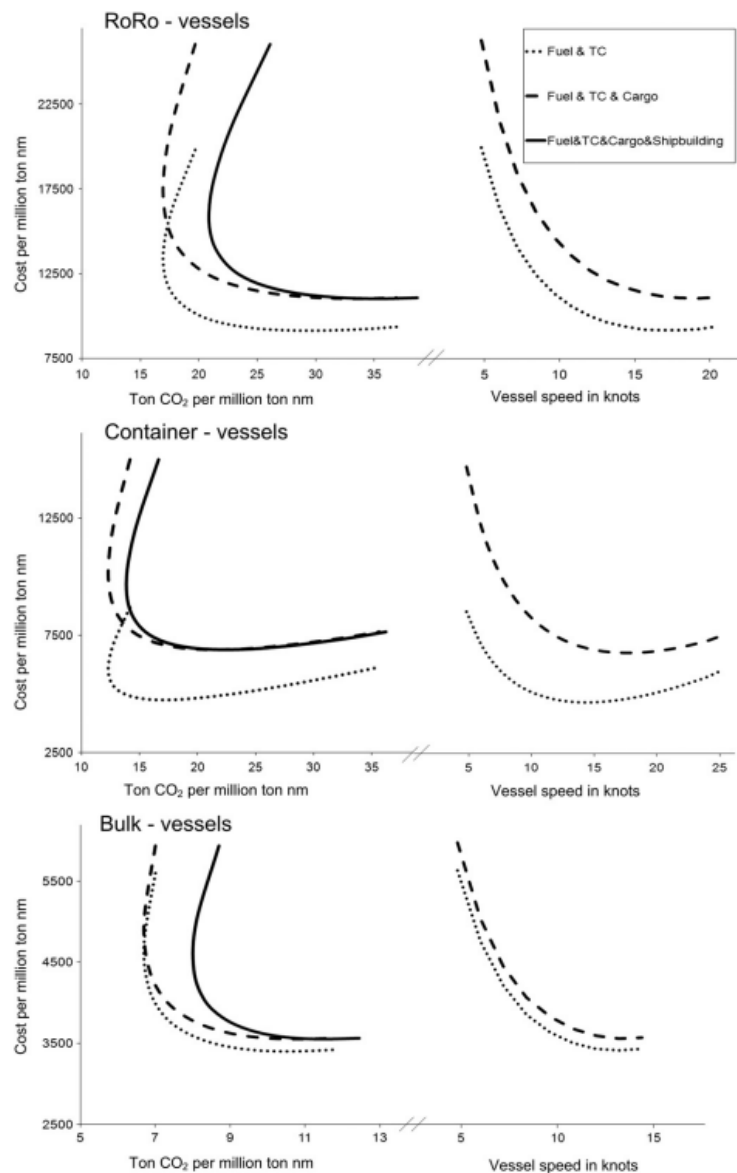
$$C = \frac{1}{DM} \left((F_s C_{HFO} + F_{p\&s} C_{MDO}) + TCT + \left(MC_M \frac{1}{2} T \left(1 + \frac{C_{IR}}{365} \right) \right) \right)$$

Vergelijking 3 Kosten per nautische mijl (nm)
Bron: Lindstad et al. (2011)

Om de vrachtkost van verschillende type en grote van schepen over verschillende routes te vergelijken wordt met de eerste term $\frac{1}{DM}$ de totale kost per rondreis omgezet naar de kost per nautische mijl. Hierbij is D de afstand van de rondreis en M het gemiddelde gewicht van de lading (in ton) van een gegeven rondreis. De brandstofprijs wordt berekend door de hoeveelheid die verbruikt wordt tijdens de reis F_s te vermenigvuldigen met de kostprijs van *heavy fuel oil* C_{HFO} . Hierbij wordt de hoeveelheid die verbruikt werd in de haven en trage zones $F_{p\&s}$ vermenigvuldigd met de kostprijs van marine dieselolie C_{MDO} . De *time charter*-kost TC wordt berekend per dag door deze te vermenigvuldigen met de lente van de reis T die gegeven wordt in dagen. De kapitaal kost van de getransporteerde goederen wordt gegeven door de gemiddelde hoeveelheid getransporteerde goederen M , de exportwaarde van deze getransporteerde goederen C_M , de tijd van een enkele reis $\frac{1}{2} T$ en de lineair verdeelde kapitaalkosten van vervoerde goederen $1 + \frac{C_{IR}}{365}$.

Door middel van grafieken (Figuur 3 **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**) werd een compromis voorgesteld tussen de kost en uitstoot in functie van de snelheid van het schip. In het onderzoek werd geconcludeerd dat een reductie van de snelheid, lager dan de ontwerpsnelheid, de uitstoot vermindert. Deze uitstootreductie vermindert snel voor de eerste snelheidsvermindering maar is geen lineair dalende curve. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de marginale emissiereductie geleidelijk aan kleiner wordt tot het voor een bepaalde snelheid nul bereikt. Verdere reductie onder deze bepaalde snelheid zou zelfs leiden tot een stijging van de uitstoot. Echter steeg de kostprijs bij snelheidsreductie. Hiervoor werd een uitstootvermindering gezocht voor eenzelfde kost als die bij ontwerpsnelheid zou zijn. Het resultaat is een reductie van 28% van de CO₂-uitstoot door middel van het verlagen van snelheden. De snelheidsvermindering waarbij die bereikt wordt is voor RoRo 17,7 knopen (13%), voor vrachtschepen 12,5 knopen (13%) en voor containerschepen 12 knopen (52%). Zijn onderzoek voor de container- en RoRo-schepen werd uitgevoerd voor de handelsroutes tussen Azië en Amerika voor een afstand

van 11 000 tot 12 000 nautische mijl. Voor vrachtschepen analyseerde hij een route tussen Australië en China, waarbij de afstand 4500 nautische mijl bedroeg (Lindstad et al., 2011).



Figuur 3 Emissie en kosten als functie van de snelheid van het schip
Bron: Lindstad et al. (2011)

Ook Corbett et al. (2009) onderzochten kost effectieve opties als reductie voor CO₂ door middel van een model. Het model beschrijft de winstmaximaliserende snelheid van het schip (Vergelijking 4).

$$S_{1k} = \left(\frac{(C_k + P * AF_k) * S_{0k}^3}{2P * MF_k} \right)^{1/3}$$

*Vergelijking 4 De winst maximaliserende snelheid
Bron: Corbett et al. (2009)*

De winstmaximaliserende operatiesnelheid S_{1k} van een schip k wordt bepaald door de vaste kosten per dag C_k , de brandstofprijs in dollar per metrische ton olie P , de design speed S_{0k} en de dagelijkse brandstofverbruik van zowel de hoofdmotor MF_k als hulpmotor AF_k .

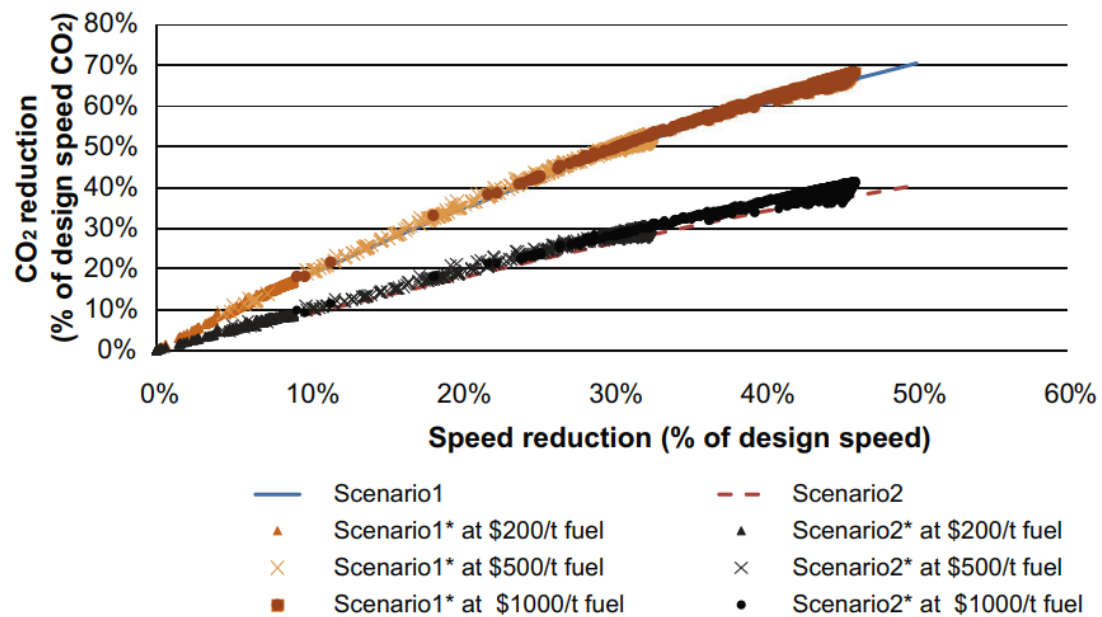
Het gerelateerde brandstofverbruik F_{ijk} bij een snelheidsvermindering werd vastgelegd rekening houdend met de derdemachtsvergelijking van de snelheidsverhouding tussen de ontwerpsnelheid S_{0k} en de operationele snelheid S_{1k} , het brandstofverbruik van hoofd- en hulpmotor MF_k en AF_k en de afstand afgelegd d_{ij} . De factor 24 werd gebruikt om de snelheden, die in mijl per uur staan, om te zetten naar mijl per dag. Het brandstofverbruik van MF en AF wordt bepaald door de motorkracht, de SPOC en de motorbelasting (Vergelijking 5).

$$F_{ijk} = \left(MF_k \left(\frac{S_{1k}}{S_{0k}} \right)^3 + AF_k \right) \frac{d_{ij}}{24S_{1k}}$$

*Vergelijking 5 Brandstofverbruik per reis
Bron: Corbett et al. (2009)*

Hun onderzoek speelde zich af voor schepen die naar Amerikaanse havens voeren, bijvoorbeeld Azië-Amerika route. Bovendien was hun onderzoek specifiek over containerschepen. Dieper onderzoek werd gedaan naar een brandstofaccijnzen en snelheidsmandaat. In de analyse werden twee scenario's als gevolg van de snelheidsvermindering aangehaald. De eerste is dat schepen meer vervoeren om dezelfde capaciteit te hebben. Hierbij zijn er minder frequente aankomsten in de havens vanwege de verminderde snelheid. Om de minder frequente aankomsten op te vangen, wordt in het tweede scenario meer schepen toegevoegd aan een bepaalde route. Hierdoor blijven de aankomsten in de haven hetzelfde. Uit dit onderzoek werd geconcludeerd dat de keuze voor snelheidsvermindering sterk afhangt van de brandstofprijzen (Figuur 4Figuur 4).

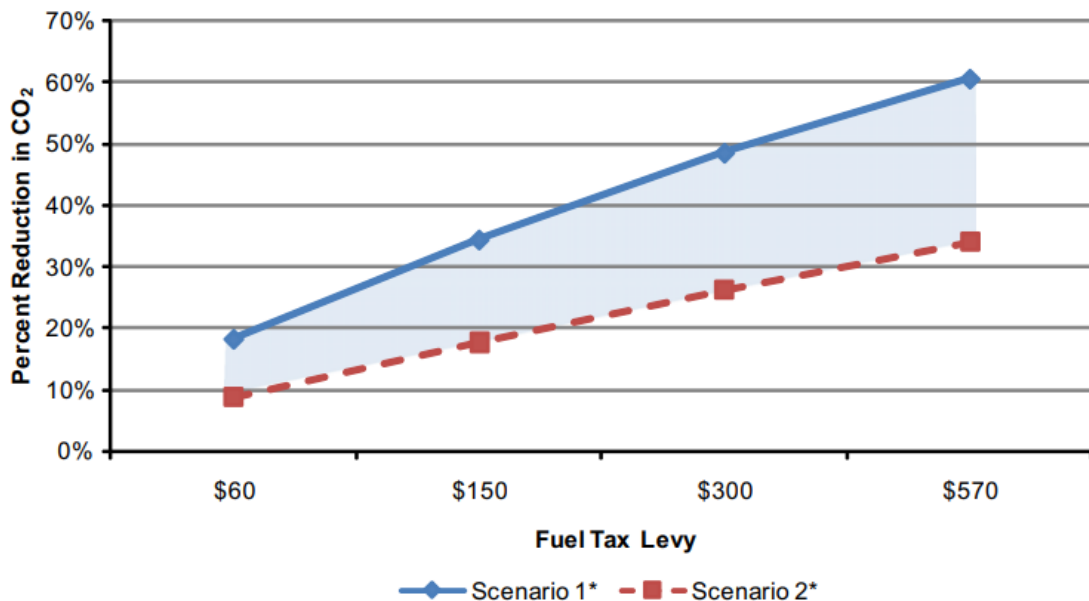
Indien de brandstofprijs hoog ligt, zijn schippers eerder geneigd trager te varen om zo de brandstofkost te verminderen.



Figuur 4 Vergelijking van scenario 1 en 2 voor de optimale snelheidsvermindering en de corresponderende CO₂reductie bij verschillende brandstofprijzen.

Bron: Corbett et al. (2009)

Bovendien heeft het verhogen van brandstofaccijnzen een positieve invloed op de CO₂-reductie. Zo zorgen brandstofaccijnzen van 150 dollar per ton door deze snelheidsreductie voor een CO₂-reductie van 20-30% (Figuur 5) (Corbett et al., 2009).



Figuur 5 Invloed van brandstofaccijnzen op de CO₂reductie
Bron: Corbett et al. (2009)

Cariou onderzocht specifiek voor containerschepen aangezien zij aan grote snelheden van +/- 25 knopen varen. Hij zoekt naar de *bunker break even price* om zo te zien wanneer *slow steaming* op lange termijn duurzaam is om toe te passen. Zolang de bunkerprijs beduidend hoger is dan de *bunker break even price* BP^* is *slow steaming* realistisch (Vergelijking 6).

$$BP^* \geq \frac{\Delta OC_{ds \rightarrow ss} + \Delta Rot_{ds \rightarrow ss} IC_{teu}}{\Delta FC_{ds \rightarrow ss}}$$

Vergelijking 6 Het break-even punt van de bunkerprijs waarvoor een reductie duurzaam is.
Bron: Cariou (2011)

Bij het bepalen van dit *break-even* punt werd in rekening gebracht dat de rotatie Rot verlengd wordt wanneer men de snelheid verandert van de ontwerpsnelheid ds naar *slow steaming* ss . Verder vergroten de operatiekosten voor het uitbreiden van de vloot ΔOC met n aantal schepen om dezelfde capaciteit te behouden en is hieraan een verandering van de inventaris kosten IC gelinkt. Cariou gebruikte een model (Vergelijking 7) om de het verschil in brandstofverbruik $\Delta FC_{ds \rightarrow ss}$ voor verminderde snelheid voor een dienst van n aantal vaartuigen van een specifiek schip k vast te leggen.

$$\Delta FC_{ds \rightarrow ss} = \sum_{k=1}^n (ME_{k,sea} D_{k,sea} + ME_{k,port} D_{k,port})$$

Vergelijking 7 Verschil in brandstofverbruik voor verminderde snelheid voor een dienst van n aantal schepen

Met $ME_{k,sea} = SFOC_k * EL_k * kW$

Vergelijking 8 Brandstofverbruik van de hoofdmotor op zee

Bron : Cariou (2011)

Hier werd het brandstofverbruik gegeven door de brandstofverbruik van de hoofdmotor op zee $ME_{k,sea}$ en in de haven $ME_{k,port}$ te vermenigvuldigen met het aantal dagen dat het schip respectievelijk op zee $D_{k,sea}$ en in de havens $D_{k,port}$ zijn. Het is het brandstofverbruik van de hoofdmotor die zal beïnvloed worden door een snelheidsvermindering. Het brandstofverbruik van de hoofdmotor (Vergelijking 8) op zijn beurt werd bepaald door het product van de *Special fuel oil consumption* $SFOC_k$, de motorbelasting EL_k en de motorkracht kW . Er werd vanuit gegaan dat de $ME_{k,port}$ 5% van de hoofdmotor op ontwerpsnelheid bedraagt. Het is vooral de motorbelasting die zorgt voor een sterke daling van het brandstofverbruik. De algemene regel is dat de motorkracht gelinkt is aan de snelheid met één derde. Wanneer de snelheid met 30% daalt, daalt de motorbelasting met 40% van de maximale continue snelheid.

In het totaal werden 2051 vaartuigen bestudeerd. Deze werden verdeeld in vijf klassen, afhankelijk van hun grootte (in TEU). De schepen werden ook ingedeeld afhankelijk van de handsroute die ze varen. Hier ook ging het over verre afstandsroutes zoals van Europa naar het Verre Oosten. Het onderzoek heeft aangetoond dat slow steaming tussen 2008 en 2010 een gevolg van een daling van 11% van de uitstoot had. Ook in dit onderzoek werd aangehaald dat een hoge bunkerprijs een belangrijk aspect is waarom scheepsbedrijven slow steaming wensen toe te passen (Cariou, 2011).

Chang et al stelde een model op om te onderzoeken welke strategie voor snelheidsvermindering het voordeligste is voor zowel de kost als de CO₂-uitstoot minimalisatie (Vergelijking 9). Aangezien dat trager varen als gevolg heeft dat de operationele kosten OP en de opportuniteitskosten verhogen TC , dienen deze in het model opgenomen te worden opgenomen in vergelijking met een daling van de

brandstofkosten. Deze kosten stegen met de tijd T_d uitgedrukt in de hoeveelheid dagen vertraging die opgelopen werd. Deze kan op zijn beurt worden bepaald door het verschil in het aantal dagen dat erover gedaan werd indien aan vertraagde snelheid S^r en het aantal dagen dat erover gedaan werd aan de ontwerpsnelheid S' . Door de afgelegde afstand d te delen door de snelheid, bekomt men het aantal dagen dat de reis aan die bepaalde snelheid duurt. De brandstofkost werd bepaald aan de hand van de brandstofkost van de hoofd- en hulpmotor, MF en AF . De brandstofkost wanneer het vaart aan ontwerpsnelheid is makkelijk te bepalen door het brandstofverbruik te vermenigvuldigen met de kostprijs van die brandstof FP . Het brandstofverbruik aan een tragere snelheid dient gecorrigeerd te worden aangezien het brandstofverbruik lager ligt. Voor de hoofdmotor wordt deze correctiefactor uitgedrukt door de derdemacht van de verhouding van de vertraagde snelheid om de ontwerpsnelheid $\left(\frac{S^r}{S'}\right)^3$. Om *slow steaming* effectief te laten zijn, dient het effect voor een vermindering naar snelheid i positief te zijn

$$E_i = (\Delta MF + \Delta AF) - T_d(OP + TC)$$

$$E_i = \left((MF_0 * FP_{mf} + AF_0 * FP_{af}) - \left(MF_0 * \left(\frac{S^r}{S'}\right)^3 * FP_{mf} + AF_0(1 + T_d) * FP_{af} \right) \right) - \left(\left(\left(\frac{d}{24S^r}\right) - \left(\frac{d}{24S'}\right) \right) * (OP + TC) \right)$$

Vergelijking 9 Het effect van snelheidsvermindering
Bron: Chang et al (2014)

Uit deze berekeningen kon de optimale snelheid gevonden worden waarbij de kosten in vergelijking met de CO₂-uitstoot het voordeligste is. Het onderzoek werd gedaan voor zeven verschillende typen schepen die een afstand van 1600 nautische mijl bedroeg. Er werden vier scenario's uitgewerkt waarbij het effect onderzocht werd. Deze scenario's waren gebaseerd op de snelheid, de brandstofprijzen en de tarieven van de *time charters*. De vier scenario's zijn de volgende: hoge brandstofprijzen en hoge bevrachtingstarieven (1), hoge brandstofprijzen en lage bevrachtingstarieven (2), lage bevrachtingstarieven en hoge bevrachtingstarieven (3) en lage brandstofprijzen en hoge bevrachtingstarieven (4). De resultaten van het onderzoek werden beschreven in vorm van een tabel (**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**). Hieruit werd geconcludeerd dat de brandstofprijs en de

bevrachtingstarieven een sterke invloed hebben op de optimale snelheid en het daarbij horende kostenvoordeel en de CO₂ -vermindering. Bij scenario twee werden de beste resultaten verkregen. Hierbij zorgde een snelheidsvermindering voor een groot kostenvoordeel samen met een sterke daling van de CO₂ -uitstoot (Chang & Wang, 2014).

*Tabel 1 Het resultaat van de optimale snelheidsvermindering bij de vier verschillende scenario's.
Bron: Chang et al (2014)*

Item of scenario		Bulk		Tanker		Container		
		Capesize	Handysize	VLCC	Handysize	Panamax	S-Panamax	Handysize
Scenario 1 (HFHR)	Optimum speed	nil	nil	15.3	13.6	16.96	15.4	15.04
	Max daily cost-benefit	0	0	2053	1703	3658	6172	2622
	CO ₂ reduction	0	0	19%	26.6%	34.9%	42.5%	34.9%
Scenario 2 (HFLR)	Optimum speed	8.28	8.58	9.35	9.6	8.46	8.2	8.46
	Max daily cost-benefit	8214	3510	15,533	4618	14,250	13,394	8784
	CO ₂ reduction	65.4%	61.3%	69.8%	60.5%	77.6%	80.3%	76.4%
Scenario 3 (LFHR)	Optimum speed	nil	nil	nil	nil	nil	nil	nil
	Max daily cost-benefit	0	0	0	0	0	0	0
	CO ₂ reduction	0	0	0	0	0	0	0
Scenario 4 (LFLR)	Optimum speed	nil	nil	nil	nil	15.9	13.94	14.3
	Max daily cost-benefit	0	0	0	0	1262	1262	518
	CO ₂ reduction	0	0	0	0	42.4%	52.4%	41%

3.3 Factoren

Het effect van slow steaming op de vermindering van de CO₂-uitstoot kan worden bepaald aan de hand van verschillende factoren die in rekening gebracht dienen te worden. Uit het literatuuronderzoek (paragraaf 3.2) kunnen verschillende gemeenschappelijke factoren worden gehaald uit de modellen. Algemeen kan worden geconcludeerd dat brandstofverbruik van een reis beschreven kan worden door de eigenschappen/het brandstofverbruik van de hoofdmotor en de afgelegde afstand van die reis. In Tabel 2 wordt een overzicht gegeven hoe de verschillend onderzoekers het brandstofverbruik per reis bepalen. Uit de laatste kolom kan geconcludeerd worden dat wanneer er naar de eenheden gezien wordt, de onderzoekers op hetzelfde niveau zitten. Hieruit kunnen de modellen in twee categorieën worden verdeeld. In de eerste categorie wordt het brandstofverbruik berekend door een berekend brandstofverbruik van de hoofdmotor aan de ontwerpsnelheid te corrigeren voor de vertraagde snelheid zoals bij Corbett et al en Chang et al. In de tweede categorie wordt het brandstofverbruik berekend door het brandstofverbruik ineens aan de vertraagde snelheid te berekenen zoals het geval is bij Cariou en Lindstad et al.

Tabel 2 Vergelijking van de verschillende modellen
Bron: eigen tabel

Onderzoeker	Formule brandstofverbruik per reis	Formule weergegeven in eenheden
Lindstad et al	$F = K_f \left(\left(\frac{PD}{v} \right) + (P_{p\&s} T_{p\&s}) \right)$ Met F = brandstofverbruik van een reis, in gram D = afstand van die reis, in nm V= snelheid , in nm/h P = motorkracht, in kW Kf = de hoeveelheid brandstof per geproduceerde kWh, in g/kWh	$F = \frac{g}{kWh} * \left(\frac{kW * nm}{nm/h} \right)$
Corbett et al	$F_{ijk} = \left(MF_k \left(\frac{S_{1k}}{S_{0k}} \right)^3 + AF_k \right) \frac{d_{ij}}{24S_{1k}}$ Met F = brandstofverbruik van een reis, in gram D = de afstand van die reis, in nm MF = brandstofverbruik aan ontwerpsnelheid (S_0) = P*SPOC*EL $\left(\frac{S_{1k}}{S_{0k}} \right)^3$ = de correctiefactor het brandstofverbruik aan een vertraagde snelheid (S_1) $\frac{d_{ij}}{24S_{1k}}$ = het aantal dagen dat de reis duurt aan vertraagde snelheid	$F = kW * \frac{g}{kWh} * \frac{nm}{nm/h}$
Cariou	$F = ME_{k,sea} D_{k,sea} + ME_{k,port} D_{k,port}$ Met F = brandstofverbruik van een reis, in gram D= tijd die de reis duurt, in h ME= brandstofverbruik die wordt berekend aan de vertraagde snelheid door $ME_{k,sea} = SFOC_k * EL_k * kW$	$F = \frac{g}{kWh} * kW * h$
Chang et al	$F = MF_0 * \left(\frac{S^r}{S'} \right)^3$ Met F = brandstofverbruik van een reis, in gram MF_0 = het brandstofverbruik aan ontwerpsnelheid S' van een reis, in g	$F = g$

	$\left(\frac{S^r}{S^r}\right)^3$ = de correctiefactor het brandstofverbruik aan een vertraagde snelheid S^r	
--	---	--

Bij brandstofverbruik wordt direct een link gelegd met de motor. Het is dus logisch dat de karakteristieken van de hoofd- en hulpmotor in rekening dienen te worden gebracht. Het dagelijks verbruik van de hoofdmotor wordt bepaald de *Specific Fuel Oil Consumption* (SFOC), de motorbelasting en de motorkracht. De SFOC geeft de massa brandstof die per tijdseenheid wordt verbruikt om kW te produceren en wordt gebruikt om de efficiëntie van de motor te bepalen (T, 2021). De SFOC wordt uitgedrukt in g/kWh. De motorbelasting geeft de capaciteit van de motor om vermogen te produceren. Een motor is gemaakt voor een maximale belasting die bij een specifieke snelheid wordt behaald. De motorkracht wordt uitgedrukt in kW. Het brandstofverbruik is gelinkt aan de belasting. Omdat wanneer de motorbelasting stijgt, de snelheid van de motor vermindert. Echter om dit te voorkomen, wordt er meer brandstof verbruikt om aan dezelfde snelheid te kunnen varen (Etukudo, 2022). De motorbelasting wordt weergegeven door het procent van de maximale continue snelheid. Deze karakteristieken samen, geven hoeveel brandstof de motor verbruikt bij ontwerpsnelheid in gram per uur.

De afgelegde afstand in nautische mijl wordt gebruikt om het brandstofverbruik van een reis vast te leggen. De afstanden uit het literatuuronderzoek variëren tussen 1600 nautische mijl en 12 000 nautische mijl. Bij een snelheidsvermindering is het brandstofverbruik per uur minder maar wordt er langer over eenzelfde afstand gevaren. Er dient dus gekeken te worden naar deze extra tijd dat het schip vaart omdat er in tijd gezien langer wordt uitgestoten. De afstand is daarom van belang in rekening te brengen aangezien het, samen met de operationele snelheid, de tijd geeft die het duurt om de reis af te leggen aan de vertraagde snelheid en hierbij dus de extra tijd dat er brandstof verbruikt wordt.

Tot slot komen we bij de beslissingsvariabele, de snelheid. In de eerste categorie wordt de relatie tussen de snelheid en het brandstofverbruik wordt vastgesteld met de derdegraads-macht, de *cubic rule*. Deze vergelijking houdt in dat het brandstofverbruik evenredig is met

de derde macht van de snelheid. Een kleine stijging van de snelheid heeft als gevolg een grote stijging van het brandstofverbruik. Hierdoor heeft een vermindering van snelheid direct invloed op de vermindering van brandstofverbruik. Aangezien het brandstofverbruik van de hoofdmotor wordt gegeven voor de ontwerpsnelheid, dient de snelheidsvermindering in rekening worden gebracht door de verhouding tussen de verlaagde/operationele snelheid en de ontwerpsnelheid. Bij de tweede categorie wordt de snelheidsvermindering in rekening gebracht bij het bepalen van het verbruik van de hoofdmotor. Bij een snelheidsvermindering is het de motorbelasting die sterk daalt.

4 Onderzoeksvraag

Verschillende methodes kunnen worden toegepast om het aandeel van CO₂-uitstoot van schepen te verminderen. *Slow steaming* wordt al vaak toegepast op overzeese trajecten met lange afstanden. Door deze grote afstanden is er een groot verschil in brandstofverbruik tussen varen aan ontwerpsnelheid en *slow steaming*. Verschillende onderzoekers bekeken de effecten aan de hand van modellen. In het voorliggend onderzoek wordt het nut van *slow steaming* op kleine afstanden onderzocht, door middel van kwantitatief onderzoek met behulp van een brandstofverbruik model. Zo wordt ingegaan op de mogelijke vermindering van brandstofverbruik op korte trajecten, zoals de beloodste trajecten op de Schelde. Dit zal gedaan worden door de verschillende modellen zo goed mogelijk in te vullen. Hieruit zal een brandstofverbruik per vertraagde snelheid uitkomen wat nadien kan omgezet worden naar CO₂-uitstoot. Verder wordt bekeken in hoeverre de snelheidsvermindering toegepast kan worden, rekening houdend met de vertraging die dit met zich meebrengt.

5 Materiaal en methoden

5.1 Het beschouwde Scheldetraject

In dit onderzoek wordt gefocust op het beloodste gedeelte van het Scheldetraject als gebied. De Schelde ontspringt in Frankrijk en loopt door België en Nederland, waar ze na 320 kilometer in de Noordzee uitmondt. De Schelde is een druk bevaren rivier waar jaarlijks 110.000 beloodste schepen en is de verbindingsweg tussen de Noordzee en 4 havens (*'De Schelde is 's werelds meest beveiligde rivier'*, 2017). Voor Nederland is dit Vlissingen en Terneuzen, voor België Antwerpen en Gent. Op de Schelde heerst er een loodsplicht voor alle zeeschepen van langer dan 80 meter. De loodsplicht geldt zowel voor de opvaart als de afvaart. De loodsen kennen het Scheldetraject met de bijkomende stromingen, wrakken, zandbanken en andere obstakels. Ze adviseren zeeschepen, vanop de navigatiebrug, hoe veilig te navigeren door deze wateren.

Het gedeelte van de Schelde dat beloodst wordt, heet de Zeeschelde. Dit gedeelte loopt van Gent en van Antwerpen tot de Nederlandse grens. De naam verwijst naar de link tussen de getijden van de rivier en de getijden van de Noordzee. Hierachter volgt de Westerschelde die tot in de Noordzee uitvloeit. De Zeeschelde en de Westerschelde samen vormen een rivier van 160 km lang. Dit komt overeen met 86,39 nm. De trajecten die in dit onderzoek worden gebruikt, verschillen afhankelijk van waar de loods aan boord komt en waar het schip dient te geraken, met als gevolg dat de afstand hiervan kan variëren. Algemeen lopen de trajecten van het Vlaams loodstation “de Wandelaar (1)”, of het Nederlands loodstation “Steenbank (2)”, tot hun ligplaats in de Antwerpse (3) of Gentse haven (4) (



Figuur 6). Afhankelijk van de ligplaats zijn er verschillende trajecten, Zeetraject, Kunsttraject, Riviertraject, Kanaaltraject, die het schip gedurende zijn vaart over de Schelde volgt. Elk traject werkt met eigen loodsen. Zo komt de Zeeloods bij de Wandelaar aan of van boord van het zeeschip. Ter hoogte van Vlissingen gebeurt er een loodswissel tussen een zeeloods en een rivierloods, die de tocht naar de haven van Antwerpen verderzet, of een kanaalloods, die de tocht naar de Gentse haven verderzet. Voor dit onderzoek werden de gegevens verzameld die Antwerpen als bestemming of vertrekplaats hebben; het traject bestaat dus uit de combinatie van het Zeetraject en het Riviertraject.

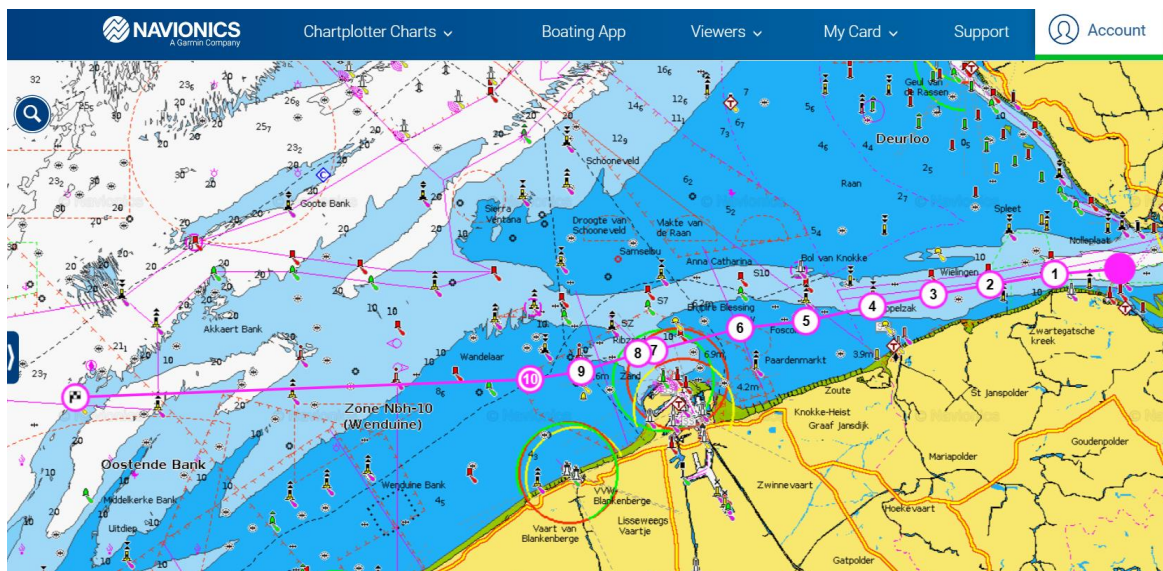


Figuur 6 Loodstrajecten van het Scheldetraject. 1: Belgische loodstation, de Wandelaar. 2: Nederlandse loodstation, Steenbank. 3: Antwerpse haven. 4: Gentse haven.
Bron: (Loodsen, z.d.)

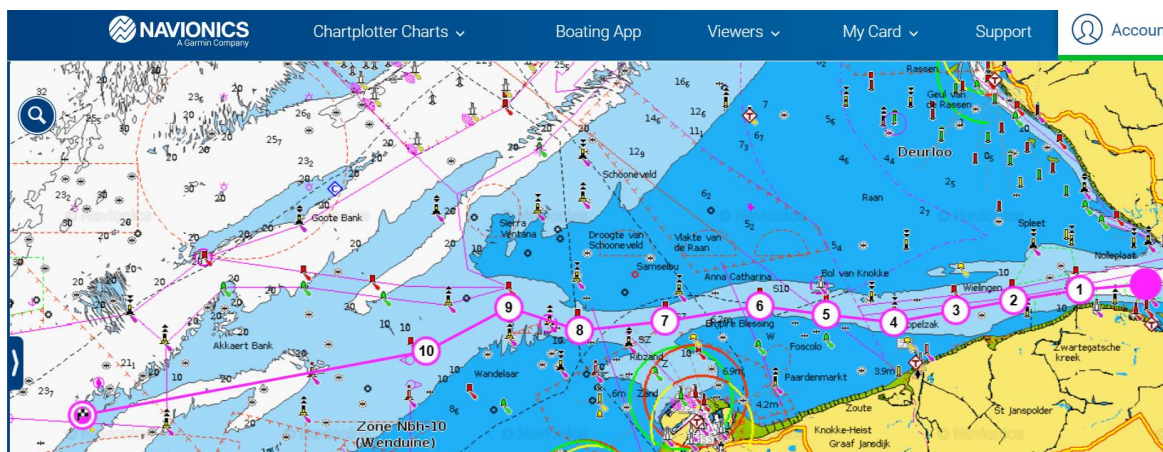
Bij het Zeetraject zijn er, om naar de Wandelaar (W) te geraken, 3 verschillende trajecten, om tot Steenbank (SB) te geraken zijn er 2 trajecten. De trajecten worden afhankelijk van de diepgang van het schip wordt gekozen. De trajecten worden hieronder beschreven en geïllustreerd door middel van Navionics. Navionics is een Duits bedrijf dat elektronische kaarten van mariene gebieden, rivieren en meren voor pleziervaart publiceert. Door middel van hun *chart viewer* is het mogelijk om via *waypoints* op de elektronische kaart te plaatsen, routes uit te stippelen. De Schelde zit ook in dat systeem. Hiermee kan een traject uitgezet worden in dit online kaartsysteem waardoor de afstand van dat traject weergegeven wordt. Belangrijk is op te merken dat de afstand gegeven wordt in km. De omzetting naar nm mag niet vergeten worden vooraleer deze in de modellen toe te passen.

Het traject zeewaarts begint ter hoogte van de Songa boei (Figuur 7, paarse bol) en loopt tot de Wandelaar (Figuur 7, bol met vlag). Dit traject bedraagt 32 nm en verschilt niet in afstand voor de 3 verschillende trajecten. De trajecten zijn vernoemd naar de bijhorende plekken waar ze door varen. De boeien, die ervoor dienen gevolgd te worden dragen de naam van de plek. De Wielingen (Figuur 7) gaat zoals de naam doet vermoeden door de Wielingen en wordt gebruikt voor schepen tot een diepgang van ongeveer 6 meter. De Scheur (Figuur 8) loopt het eerste gedeelte hetzelfde maar loopt vanaf de boei Wielingen

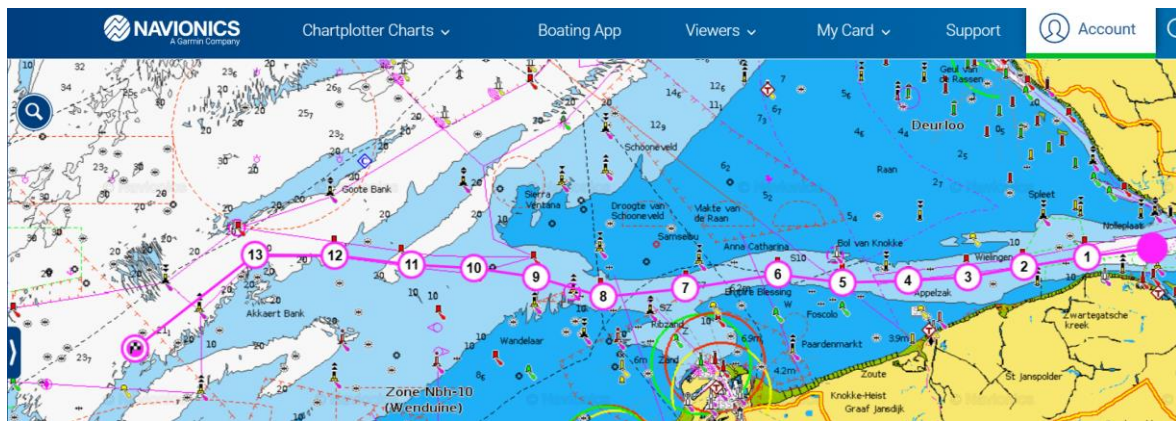
3 naar de Scheur. Via dit traject kunnen schepen tot 13 meter diepgang. Wanneer de schepen dieper dan 13,1 meter liggen wordt vanaf boei Scheur 3 langs de Vaargeul naar de Wandelaar gevaren (Figuur 9). Deze beschrijvingen zijn voor het afwaarts traject. Voor het opwaarts traject geldt dezelfde route in omgekeerde richting.



Figuur 7 De Wielingen, Zeetraject voor schepen tot 6 meter diepgang. Traject vertrekt ter hoogte van de Songa boei (paarse bol) en loopt tot het Wandelaar loodstation (bol met vlag). Gebruik gemaakt van software van Navionics. Bron: eigen werk.

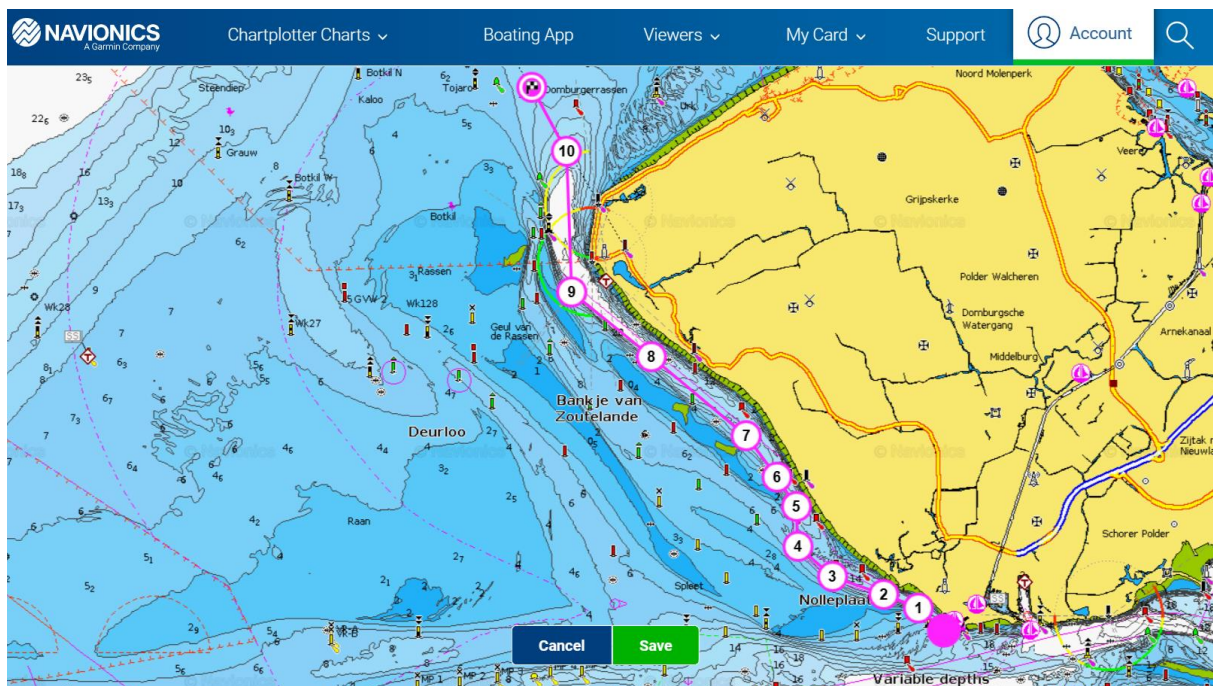


Figuur 8 De Scheur, Zeetraject voor schepen tot 13 meter diepgang. Traject vertrekt ter hoogte van de Songa boei (paarse bol) en loopt tot het Wandelaar loodstation (bol met vlag). Gebruik gemaakt van software van Navionics. Bron: eigen werk.

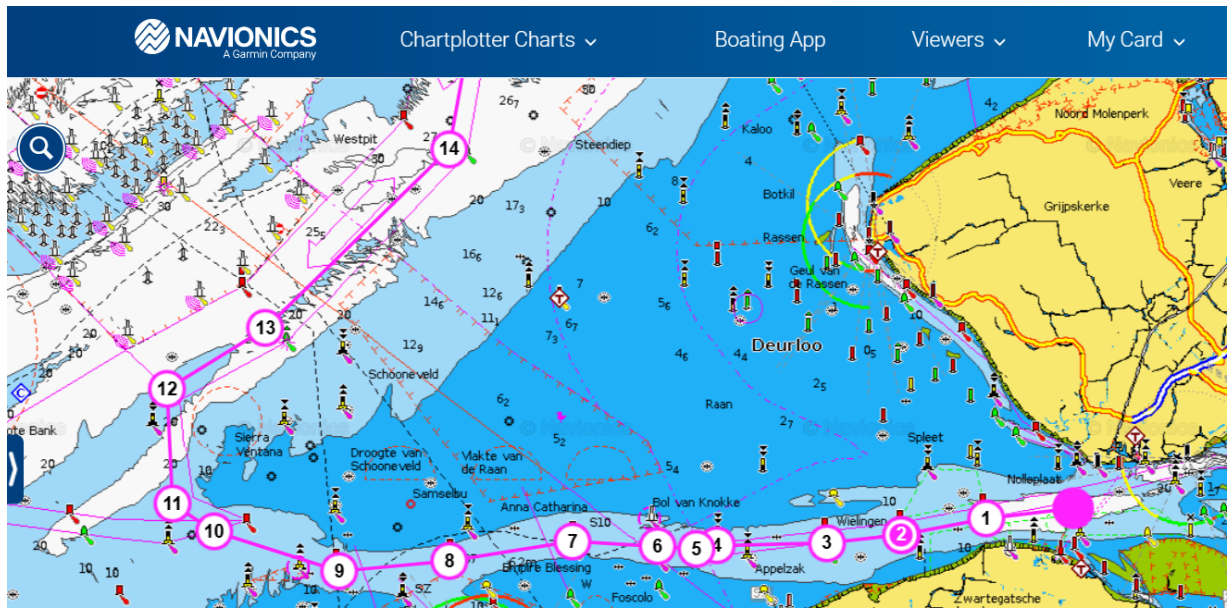


Figuur 9 De Vaargeul, Zeetraject voor schepen vanaf 13,1 meter diepgang. Traject vertrekt ter hoogte van de Songa boei (paarse bol) en loopt tot het Wandelaar loodstation (bol met vlag). Gebruik gemaakt van software van Navionics.
Bron: eigen werk.

Het traject tot Steenbank voor minder diepe schepen die via Oostgat varen, bedraagt 23 nm (Figuur 10). Het traject voor diepere schepen, genaamd 'Westrond' bedraagt 45 nm (Figuur 11). Hiermee wordt onder minder diepe schepen bij laagwater 7,5 meter en bij hoogwater 9,5 meter begrepen.

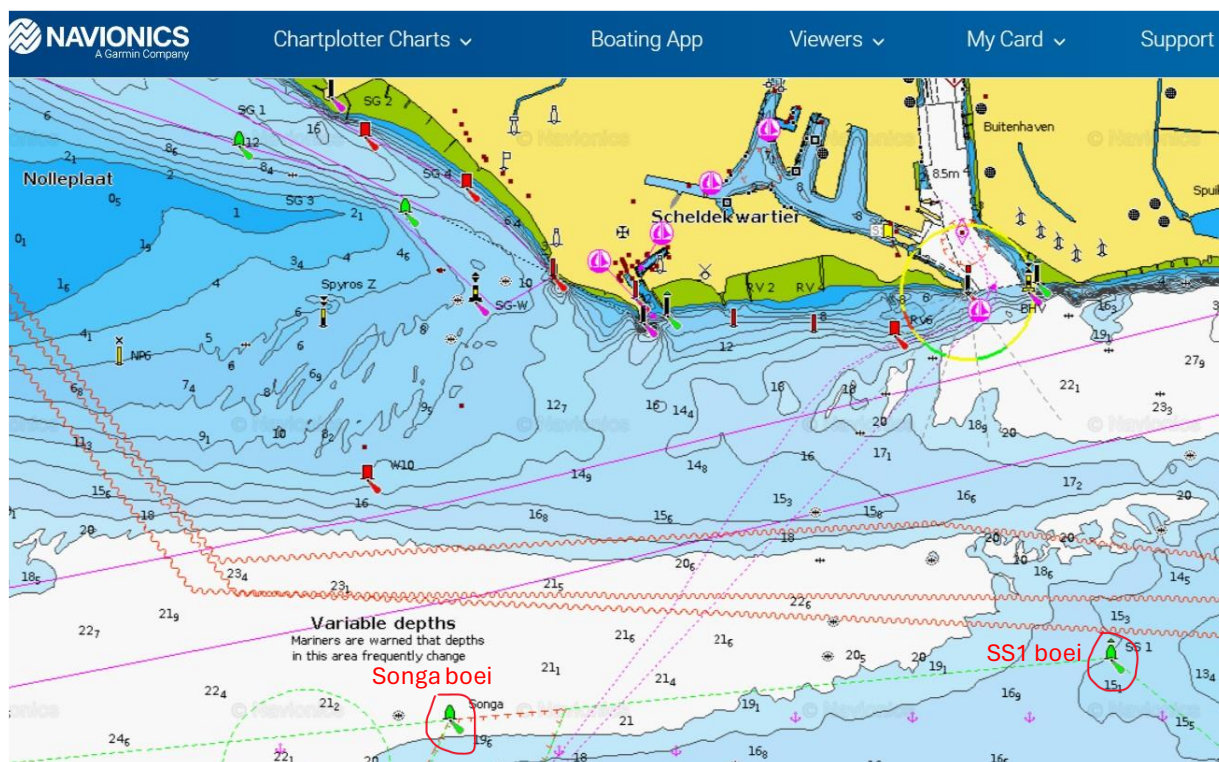


Figuur 10 Oostgat, Zeetraject voor minder diepe schepen, 7,5 meter bij laagwater en 9,5 meter bij hoogwater. Traject vertrekt ter hoogte van de Songa boei (paarse bol) en loopt tot het Steenbank loodstation, dat nog verder ten Noorden buiten de kaart ligt in lijn met de lichtenlijn. Gebruik gemaakt van software van Navionics.
Bron: eigen werk.



Figuur 11 Westrond, Zeetraject voorschepen dieper dan 7,5 meter bij laagwater en 9,5 meter bij hoogwater. Traject vertrekt ter hoogte van de Songa boei en loopt tot het Steenbank loodstation, dat nog verder ten Noorden buiten de kaart ligt, Westpit volgend. Gebruik gemaakt van software van Navionics.
Bron: eigen werk.

Het Riviertraject en het Zeetraject gaan over in elkaar bij Rede van Vlissingen. De afstanden van het Zeetraject beginnen te tellen ter hoogte van boei Songa richting Noordzee (Figuur 12). Voor het Riviertraject begint dit ter hoogte van boei SS1 stroomopwaarts op de Schelde (Figuur 12). Hiertussen ligt 2 nm die niet vergeten mag worden en waar bovendien de loodswissel plaatsvindt. Het Riviertraject loopt verder stroomopwaarts tot het *coordination point* (CP) 37 nm verder Schelde opwaarts. Dit punt ligt ter hoogte van boei 85A (Figuur 13) en wordt gebruikt om een *requested time of arrival* (RTA) te kunnen bepalen. Vanaf hier worden de schepen verder beloodst naar, in de meeste gevallen, één van de sluizen in Tabel 3. Deze worden weergegeven in Figuur 13 en Figuur 14. De afstand van het gehele traject hangt dus voornamelijk af van de ligplaats in de haven; bij het Zeetraject is de diepgang van het schip bepalend.



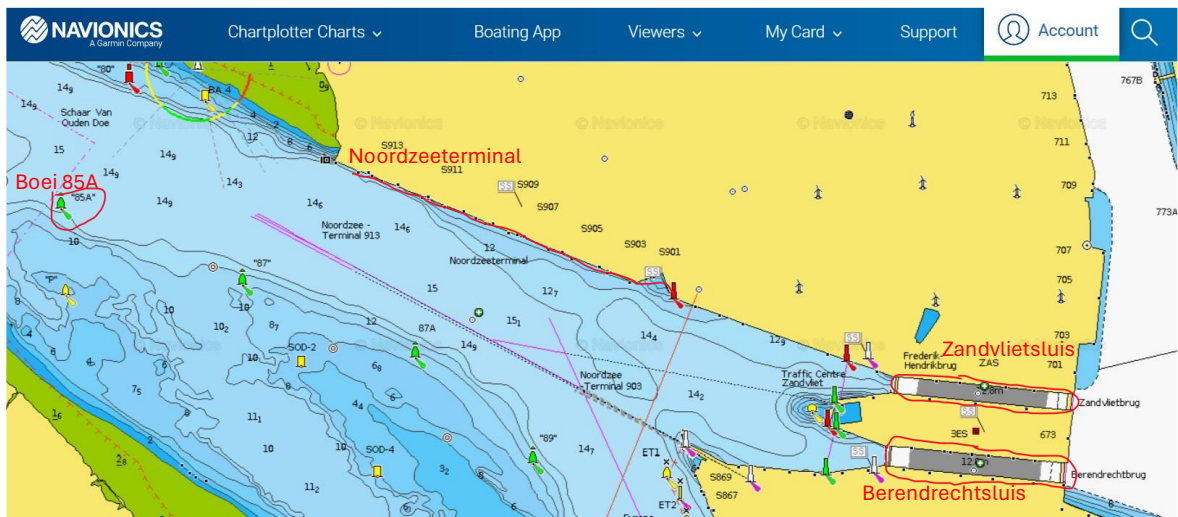
Figuur 12 verduidelijking ligging Songa boei en SS1 boei door behulp van software van Navionics. Afstanden van trajecten voor Zeetraject vertrekken van Songa boei. Afstanden voor Riviertraject vertrekken vanaf SS1 boei. Hiertussen ligt een afstand van 2,5 nautische mijl. Schaal 1 cm = 0,369 km.

Bron: eigen werk

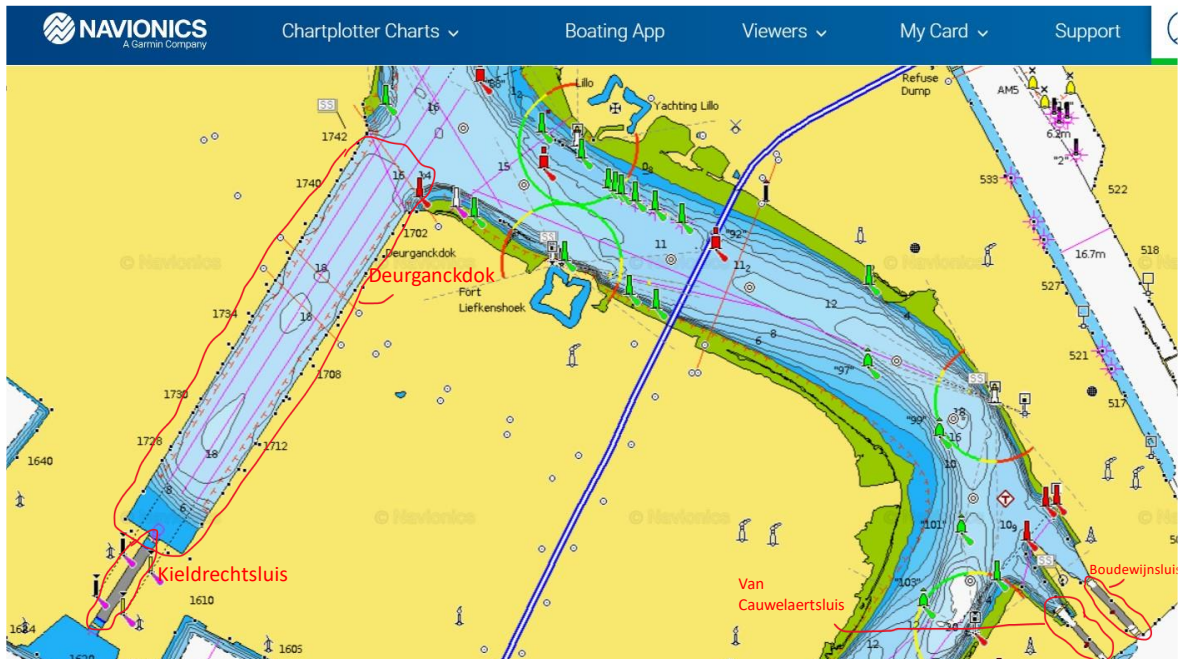
Tabel 3 afstanden in nautische mijl van coordination point (CP) tot ligplaatsen in de Antwerpse haven. De afstanden van de sluisen werden genomen tot de ingang van de sluis. De afstand tot de Noordzeeterminal werd genomen tot het midden van de terminal. De afstand van het Deurganckdok werd genomen tot het midden van het dok.

Bron: eigen werk

Naam	Afkorting	Afstand vanaf CP tot sluis (nm)
Noordzeeterminal	NZT	0,70
Zandvlietsluis	ZV	1,55
Berendrechtsluis	BE	1,58
Boudewijnsluis	BO	6,15
Van Cauwelaertsluis	/	6,25
Deurganckdok	DGD	4,38
Kieldrechtsluis	KI	5,00
Kallosluis	KA	7,90



Figuur 13 weergave op kaart van boei 85A Noordzeeterminal, Zandvlietluis, Berendrechtluis. Gebruik gemaakt van software van Navionics.
Bron: eigen werk.



Figuur 14 Weergaven van Boudewijnsdijk, Van Cauwelaertsluis, Deurganckdok, Kieldrechtluis op kaart. Gebruik gemaakt van software van Navionics.
Bron: eigen werk



Figuur 15 Weergave Kallosluis met behulp van software van Navionics. Boudewijnsluis en Van Cauwelaertsluis als referentie.

Bron: eigen werk

5.2 Verzamelen cijfermateriaal

Om de modellen toe te passen op het Scheldetraject zijn de gegevens weergegeven Tabel 2 nodig van de schepen die dit traject of een deel ervan afleggen. In de eerste stap werd contact gelegd met het Loodswezen. Hieruit kwam dat het Loodswezen beschikt over een database met uitgebreide informatie over schepen die de loodsactiviteiten op Schelde benutten. Informatie over de tocht en de schepen wordt uitgebreid verzameld. Deze database is echter niet publiekelijk beschikbaar. Desondanks was het mogelijk om enkele nuttige gegevens van de schepen te verkrijgen. Tabel 4 geeft het deel van deze informatie die het Loodswezen beschikt, dat nodig is om de modellen van dit onderzoek te vervolledigen. Gegevens van verschillende type schepen, die als gevolg verschillende volle zeevaart hebben, werden gekozen voor dit onderzoek. Dit om de variatie in uitstoot tussen de verschillende type schepen te bestuderen. Deze schepen hebben recentelijk gebruik gemaakt van de loodsactiviteiten op de Schelde. In Tabel 4 werd het element 'gemiddelde snelheid' berekend aan de hand van de verkregen gegevens. Deze werd berekend over het traject, door de afstand van het afgelegde traject te delen door de duur van de reis. De gegevens van het Loodswezen waren uitgebreider, ook enkele andere details die invloed hebben op hebben op het brandstofverbruik waren beschikbaar. Voor de volledigheid

zouden deze factoren, zoals gebruik van een boegschroef en de geladen conditie, in rekening gebracht moeten worden. Omdat dit veel complexere berekeningen vraagt, wordt in dit onderzoek een versimpelde benadering uitgevoerd die deze factoren buiten beschouwing houdt.

In de volgende stap werd nagekeken hoe met deze gegevens verder gewerkt kon worden. Hiermee kwam een ontbrekend gegeven aan het licht. De modellen, weergegeven in Tabel 2, baseren zich op het gegeven, SFOC. Dit gegeven is scheepseigen en afhankelijk van de belasting. Het geeft, samen met de motorkracht, een idee van het basisverbruik van een schip per uur. Om verder te rekenen is kennis over dit basisverbruik nodig. Die data zijn moeilijk te verkrijgen. Uit beschrijving van Chandrasekhar (2021) blijkt dat een methode om dit gegeven te verkrijgen is, om over een bepaalde periode de verbruikte hoeveelheid brandstof te monitoren ter plekke aan boord. Hierbij dient de engine load hetzelfde te blijven gedurende de gemonitorde periode. Deze methode is echter niet mogelijk voor dit onderzoek en aangezien dit gegeven bovendien niet publiekelijk per schip wordt gedeeld, dient een alternatieve benadering gezocht te worden.

Tabel 4 gegevens per schip verkregen van Belgische Loodswezen, nodig om de modellen te vervolledigen.
Bron: Belgische Loodswezen

Naam schip	Type	Volle zeevaart (knopen)	Motorkracht (kW)	Vaarweg	Afstand vaarweg (nm)	Duur van de reis (h)	Gemiddelde snelheid gedurende vaarweg (knopen)
MSC Altair	CTN	24,7	72,240	DGD N1732 => SB (Westrond)	83,5	6,5	12,85
HMM Algeciras	CTN	18,5	60,380	NZT 905 => W	67,5	6,3	10,71
Coral Lophelia	LPG	15,5	4,500	KA => SB (Westrond)	87,5	8	10,94
Grande Detroit	PCC	17,0	11,060	KI => SB (Oostgat)	61,0	6,9	8,84
Nabucco	Chem/oil products	15,0	3,920	INEOS => BO (Shift)	2,0	2,2	0,91
Susanne	General	11,8	1,349	SB => BE (Oostgat)	57,0	6,2	9,19
Al Wathba	Bulker	13,5	8,050	ZV => W	68,0	7,5	9,07
Botnia Enabler	RoRo	20,0	19,800	SB => KI	61,0	4,2	14,52
Timca	RoRo	22,0	25,200	W => KA	74,5	5,1	14,55
Pacific Rawan	Crude Oil	14,0	11,160	W => BE	68,5	8,3	8,25
An Hai Wan	Bitumen Tanker	11,0	3,060	W => Blue Gate	77,0	8,7	8,85
Sti Gladiator	Crude Oil	15,0	11,494	W => BE	68,0	6,7	10,15
Cote D'Ivoirian Star	Refrigerated Fruit	18,0	12,268	W => KI	72,0	6,1	11,80
Sea Star	Crude Oil	14,8	14,290	W => BE	69,0	7,1	9,72

In een tweede stap werd, om dit probleem aan te pakken, het ontbrekende gegeven gezocht in voorgaand onderzoek. Dit zorgde voor de kennismaking met de cijfers die het *Marine Environment Protection Committee* (MEPC) jaarlijks publiceert onder bevoegdheid van het IMO. Hierin wordt per scheepstype het jaarlijks brandstof verbruik gepubliceerd voor schepen groter dan 5000 GT. De scheepstypes worden onderverdeeld afhankelijk van hun *deadweight*. Verder geven ze de afstand en de tijd die de scheepscategorieën afleggen gedurende een jaar weer. In Tabel 5 worden de gegevens die voor verdere berekening nodig zijn weergegeven. De tabel geeft per scheepscategorie het aantal schepen weer met hun gezamenlijk *deadweight*, brandstofverbruik, afgelegde afstand en gevaren uren. Hierbij werden de verschillende types brandstoffen samengeteld om het volledige brandstofverbruik per jaar te weten, zonder verder onderscheid te maken van het type brandstof. Met deze gegevens is het mogelijke een gemiddelde brandstofverbruik aan een gemiddelde snelheid te berekenen per scheepstype. Met behulp van de verhouding van de totale afstand en de tijd hierover gedaan weten we de gemiddelde snelheid aan welke deze categorie heeft gevaren over de tijdspanne van een jaar. De verhouding van het brandstofverbruik op de afstand geeft hoeveel brandstof er nodig is per nautische mijl indien aan deze gemiddelde snelheid gevaren wordt. Met deze 2 gegevens, uitgewerkt in Tabel 6, kan er verder gerekend worden voor de omzetting naar kortere trajecten en kunnen er simulaties worden uitgewerkt met tragere snelheden. De afstand van het afgelegde traject werd afgestemd op kaart en bevestigd door gebruik te maken van Navionics (beschreven in 5.1) Het traject dat werd gebruikt loopt van de Wandelaar tot aan het *coordination point* (CP). Deze afstand bedraagt 71 nm. De praktische werking met de cijfers wordt besproken in 5.3.

In dit onderzoek werd met het meest recent gepubliceerde report van het brandstofverbruik gewerkt. Deze cijfers zijn in 2021 gerapporteerd. Deze methode is niet ideaal omdat het niet met specifieke cijfer per schip werkt. Dit maakt dat berekeningen met deze cijfers mogelijks ver liggen van de werkelijke situatie op de Schelde. Deze cijfers kunnen wel een goede indicatie geven wat een verandering in snelheid te weeg kan brengen op een traject met een afstand als dat van de Schelde.

Tabel 5 gegevens Marine Environment Protection Committee (MEPC) uitgegeven door IMO. Hier werd voor het brandstofverbruik de verschillende soorten brandstoffen samen geteld tot een algemeen verbruik.

Bron: MEPC

Type schip	Aantal schepen	Deadweight tonnage	Brandstof verbruik (ton)	Afgelegde afstand (nm)	Tijd (h)
Bulk carrier	10.232	843.177.129	57.982.229	500.209.242	44.417.985
containerschip	4.645	280.693.031	61.941.907	324.073.727	23.431.955
Cruise passenger schip	244	1.944.460	3.239.560	6.354.837	557.720
Gas carrier	884	34.269.991	8.004.320	57.353.120	4.326.201
General cargo schip	2.172	41.072.894	7.171.930	90.767.451	8.608.256
LNG carrier	519	44.637.721	13.619.069	47.683.545	3.243.714
Tanker	6.766	587.090.654	41.471.492	312.530.675	28.655.364

Tabel 6 verwerking gegevens MEPC. De gegevens uit Tabel 5 werden gebruikt om verder te rekenen om een gemiddelde snelheid en gemiddeld verbruik te berekenen. Verder werd door de afstand van het Scheldetraject het verbruik van dat traject berekend met die gemiddelde snelheid en gemiddeld verbruik.

Bron: eigen werk

	Gemiddelde snelheid (nm/h)	Gemiddeld verbruik (ton/nm)	Afstand Scheldetraject (nm)	Verbruik Scheldetraject aan gemiddelde snelheid (ton)
Bulk carrier	11,5	0,116	71	6,491
Containerschip	14,0	0,191	71	10,734
Cruise passenger schip	11,5	0,510	71	28,629
Gas carrier	13,5	0,140	71	7,838

In de laatste stap werd er gewerkt met het onderzoek van Van Roy et al. (2022). In dit onderzoek werd de uitstoot van SO_x en NO_x in de uitlaat van schepen in het Belgische Noordzeegebied uitgevoerd. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van het vliegtuig van de Belgische kustwacht dat waarden van SO_x en NO_x kan opmeten. Door middel van radiocontact met de bemanning werd, indien mogelijk, de actuele SFOC bepaald van de

onderzochte schepen. Uit het onderzoek blijkt dat de SFOC- waarde van zeeschepen ligt tussen 0.16 kg/kWh en 0.24 kg/kWh. Hiermee werd er aangehaald dat een standaard waarde om het ontbrekende cijfer in te vullen bestaat. In het onderzoek van Roy et al. (2022) werd, indien de actuele waarde niet gekend was, 0.2 kg/kWh genomen als standaard. Op dit gebaseerd, maar om ook het effect van het verschil van de SFOC te bestuderen, wordt later eens gerekend met de kleinste waarde (0.16 kg/kWh), de grootste waarde (0.24 kg/kWh) en een gemiddelde waarde (0.2 kg/kWh) in dit onderzoek. Andere bronnen bevestigen dat de waarde van marine SFOC tussen 0.155 kg/kWh en 0.2 kg/kWh ligt (*SFC — Stories*, z.d.). Aangezien er zo een waarde van de SFOC gekend is, kan dit als theoretisch gegeven worden beschouwd. Hiermee kan verder gewerkt worden met de werkelijke cijfers verkregen van het Loodswezen. Dit zal een benadering geven die dichterbij de werkelijkheid zal liggen. Wel dient er, zoals later aangetoond wordt door de verschillende waardes van de SFOC te gebruiken, rekening mee gehouden te worden dat dit cijfer afwijkt van de actuele waarde, die ongekend is.

5.3 Uitwerking gegevens

Dit is een oplossing om voor alle nodige gegevens, de modellen te vervolledigen. De berekeningen met de cijfers worden via Excel verwerkt. Het Excelbestand bestaat uit 5 tabbladen. In het eerste tabblad worden de nodige gegevens voor de berekeningen opgelijst. Dit bestaat uit de gegevens van het Loodswezen, de gegevens van de MEPC, de gestandaardiseerde SFOC- waardes, de verschillende motorbelastingen en als laatste de simulatie snelheden. In dit onderzoek wordt er gewerkt met simulatie snelheden van 20 knopen tot 0.5 knopen, vertragingen met 0.5 knopen. Deze waarden werden gekozen op basis van de toegestane snelheid op de Schelde, waar aan manoeuvreer-snelheid dient te worden gevaren. De grootste manoeuvreer-snelheid van de verkregen informatie bedraagt 20 knopen. Per schip werd er gerekend vanaf haar eigen manoeuvreer-snelheid tot 0,5 knopen. De berekeningen werden met de 4 verschillende methodes gedaan uit Tabel 2. Zo kon vergeleken worden of de verschillende modellen het hetzelfde resultaat geven en van toepassing kunnen zijn in dit onderzoek. Verder werd bij alle berekeningen met de 2 verschillende gegevens gerekend. Op deze manier kon gezien worden of werken met de gegevens van het MEPC een goede benadering geeft van de werkelijkere situatie. De resultaten werden aan verschillende snelheden berekend. De bevindingen over de

snelheidsvermindering van 10%, 30% en 50% worden verder besproken voor brandstofverbruik, uitstoot en reistijd.

Om verwarring te voorkomen wordt verder gesproken over twee verschillende berekeningen. Hierin zal berekening 1 verwijzen naar alle berekeningen die worden uitgevoerd met de gegevens van het Loodswezen (Tabel 7). Berekening 2 zal verwijzen naar de algemene benadering met de gegevens van het MEPC (Tabel 8). Er zal per model besproken worden hoe de verwerking van de modellen werd toegepast met de beschikbare gegevens.

Tabel 7 Excel verwerking gegevens Belgische Loodswezen nodig voor de modellen te vervullen. Hiermee wordt Berekening 1 uitgevoerd.

Bron: eigen werk gebaseerd op gegevens van het Belgische Loodswezen

naam	type schip	tijdsduur (h)	afgelegde afstand (nm)	huidige gemiddelde snelheid (knopen)	volle vaart (knopen)	motorkracht (kW)	manoeuvree- snelheid (knopen)
MSC Altair	CTN	6,5	83,5	12,8	24,7	72.240	16
HMM Algeciras	CTN	6,3	67,5	10,7	18,5	60.380	16
Coral Lophelia	LPG	8,0	87,5	10,9	15,5	4.500	14,5
Grande Detroit	PCC	6,9	61	8,8	17	11.060	15
Nabucco	Chem/oil products	2,2	2	0,9	15	3.920	13
Susanne	general	6,2	57	9,2	11,8	1.349	10
Al Wathba	Bulker	7,5	68	9,1	13,5	8.050	12
Botnia Enabler	RoRo	4,2	61	14,5	20	19.800	16
Timca	RoRo	5,1	74,5	14,6	22	25.200	20
Pacific Rawan	Crude Oil	8,3	68,5	8,3	14	11.160	11,6
An Hai Wan	Bitumen Tanker	8,7	77	8,9	11	3.060	10,1
Sti Gladiator	Crude Oil	6,7	68	10,1	15	11.494	12
Cote D'Ivoirian Star	Refrigerated Fruit	6,1	72	11,8	18	12.268	13,3
Sea Star	Crude Oil	7,1	69	9,7	14,8	14.290	10

Tabel 8 Excel verwerking gegevens MEPC. De waardes worden weergegeven voor 4 type schepen. Hiermee wordt berekening 2 uitgevoerd.

Bron: eigen werk gebaseerd op gegevens MEPC.

	gemiddelde snelheid (nm/h)	gemiddeld verbruik (ton/nm)	afstand (nm)	tijdsduur (h)	verbruik per uur (g/h)	volle vaart (knopen)
Bulk carrier	11,2614	0,115916	71	6,3	10.293	13,5
Containerschip	13,8304	0,191135	71	5,1	13.820	21,5
Cruise passenger schip	11,3943	0,509779	71	6,2	44.740	20
Gas carrier	13,2572	0,139562	71	5,4	10.527	15

5.3.1 Methode volgens Lindstad et al. (2011)

Lindstad et al. (2011) leek op eerste zicht een duidelijk model om het brandstofverbruik te verkrijgen. De eerste stap bestond uit het brandstofverbruik aan ontwerpsnelheid te berekenen. Deze berekeningen werden gedaan met de verschillende waardes van de SFOC.

Wanneer de simulatie werd uitgevoerd, kwam er een probleem naar boven. Om het model van Lindstad et al. (2011) uit te voeren is de snelheid niet de enige variabele. Aangezien de snelheid in de noemer staat, zal een daling van de snelheid alleen zorgen voor een stijging in brandstofverbruik. Voor dit model is er dus kennis van de verandering van de motorkracht per snelheid nodig. In dit onderzoek is enkel de ontwerp motorkracht van de schepen gekend. Verder wordt er in het onderzoek van Lindstad et al. (2011) de motorkracht berekend met extra factoren zoals de efficiëntie, de dichtheid van het water, golfkracht, enz. Aangezien dit niet overeen komt met de ontwerp motorkracht, en veel uitgebreidere informatie nodig is voor de toepassing van dit model, kan de simulatie met de verschillende snelheden niet uitgevoerd worden.

Voor berekening 2 ontbraken de gegevens om dit model toe te passen. Hier werd het huidig verbruik bekomen door het product te nemen van het gemiddeld verbruik en de afstand. De combinatie van de gegevens van het MEPC en dit model geven niet de mogelijkheid om met de variabele 'snelheid' te simuleren.

5.3.2 Methode volgens Corbett et al. (2009) en Chang et al. (2014)

Corbett et al. (2009) en Chang et al. (2014) vertrekken beiden in hun model vanaf het brandstofverbruik aan ontwerpsnelheid. Deze wordt nadien via een correctiefactor gecorrigeerd voor de vertraagde simulatie snelheden. Aangezien de beide modellen met dezelfde methode werken, en zo dezelfde resultaten geven, worden ze als één beschouwd.

In een eerste stap werd het schip MSC Altair gebruikt om na te gaan wat het invloed is van de uiteenlopende SFOC-waarde alsook het verschil in motorbelasting op het verbruik aan ontwerpsnelheid, manoeuvreer-snelheid en aan een 30% vertraging. De motorbelasting wordt uitgedrukt in percentage van de maximum continue snelheid (MCR). Schepen worden ontworpen om te varen aan 70-95 % van de MCR. Wanneer het brandstofverbruik aan ontwerpsnelheid berekend wordt, kan door te variëren met de SFOC alsook met de motorbelasting, het effect hiervan berekend worden. De grootte van het effect van deze 2 elementen werd bepaald door verschillende waardes te gebruiken voor de berekening van verbruik aan ontwerpsnelheid. Wanneer het effect van de SFOC berekend werd, werd er als motorbelasting een waarde van 90% van MCR genomen. Wanneer het effect van de motorbelasting berekend werd, werd er een SFOC- waarde 200 g/kWh genomen. Het brandstofverbruik aan ontwerpsnelheid wordt voor berekening 1 verkregen met de motorkracht, de gemiddelde SFOC waarde, een motorbelasting van 0,9. Dit geeft ons een waarde in gram per uur. Voor de berekeningen met de andere schepen wordt gerekend met de gemiddelde waarde van de SFOC, 200 g/kWh, en een motorbelasting van 90%. Eens de ontwerpsnelheid gekend was, kon in een volgende stap door de afstand van het traject te delen door de vertraagde snelheid, de tijd die nodig zal zijn om aan die simulatie snelheid het traject af te leggen verkregen worden. Hiermee is het brandstofverbruik van de reis bekend. Als laatste wordt de correctiefactor voor een vermindering in brandstof vanwege de snelheid er aan toegevoegd. Deze methode geeft per simulatie snelheid de hoeveelheid brandstof, uitgedrukt in gram.

Berekening 2 werd op een gelijkende methode uitgevoerd. De gegevens uit Tabel 6 werden genomen als verbruik gegevens aan ontwerpsnelheid. Voor de ontwerpsnelheid zelf werd niet de gemiddelde snelheid genomen aangezien deze veel lager ligt dan de werkelijkheid. Voor deze schepen wordt verondersteld dat hun snelheid gelijk is aan het gemiddelde van

de categorie waartoe ze behoren (Tabel 4). Voor de containerschepen is dit 21,5 knopen, bulk carrier 13,5 knopen, gas carrier 15 knopen. De gegevens voor cruiseschepen is niet gekend. Hiervoor werd 20 knopen gebruikt. Het model en de correctie voor het brandstofverbruik aan ontwerpsnelheid, werden voor het vervolg van de toepassing op dezelfde manier als in berekening 1 gebruikt.

5.3.3 Methode volgens Cariou (2011)

Cariou (2011) werkt op een gelijkaardige methode als Lindstad et al. (2011), waarbij het brandstofverbruik aan vertraagde snelheid gekend wordt door de verandering van de motorkracht, motorbelasting en de SFOC als gevolg van een vertraagde snelheid. In zijn onderzoek staan enkele waardes waarmee gerekend kan worden om een benadering van de verandering in deze gegevens te simuleren. Zoals eerder vermeld (Modelmatige beschrijving van slow steaming, p.17), bestaat er een relatie tussen de snelheid en de motorbelasting. Wanneer de snelheid met 30% vermindert, bedraagt de motorbelasting 40% van de maximale continue snelheid (MCR). Hiermee kon worden gerekend om het brandstofverbruik aan een 30% vertraagde snelheid ten opzichte van de ontwerpsnelheid. De simulatie werd hierdoor beperkt tot 1 bepaalde snelheid. Bovendien is, wanneer deze nieuwe snelheid boven de manoeuvreer snelheid van het schip ligt, de berekening niet van nut. Per schip werd er berekend wat de snelheidsvermindering van 30% zou zijn, zodat gekeken kan worden of dit onder de manoeuvreer-snelheid ligt.

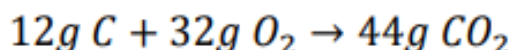
5.3.4 Omzetting naar CO₂

De laatste stap bestond uit een vertaling van de hoeveelheid brandstofverbruik en de gepaarde uitstoot CO₂. Op deze manier werd vergeleken hoeveel CO₂-uitstoot er verminderd wordt door deze nieuwe snelheid uit te oefenen. De hoeveelheid CO₂ die verbruikt wordt, is afhankelijk van de hoeveelheid koolstof aanwezig in de gebruikte brandstof. Dit cijfer is voor elk type brandstof anders, getoond in Tabel 9. Algemeen bevat de heavy fuel oil (HFO) die schepen gebruiken, 86% koolstof. Dit komt overeen met 3.15 ton CO₂ per ton brandstof. Om tot deze waarde te komen, werd er gewerkt met Avogadro's getallen dat voor koolstof 12 gram, dat van zuurstof 16 gram. Door de chemische reactie komt er een hoeveelheid CO₂ vrij zoals weergegeven in Vergelijking 10. Nu is er geen 12 gram koolstof maar 0.86 ton koolstof. Voor de verbranding hiervan is in plaats van 32 gram

zuurstof nu 2,19 ton zuurstof nodig. Met als gevolg dat 3.15 ton CO₂ uitgestoten wordt bij deze verbranding. Voor de aanwezige hoeveelheid koolstof van pure brandstoffen, zoals methanol, propaan en butaan, wordt gerekend met mol. Butaan bestaat uit C₄H₁₀. Hieruit halen we dat 48 gram/ mol koolstof (4*12 gram) aanwezig is op 58 gram/mol (4*12 + 10*1) butaan. Dit komt overeen met een percentage van 83% koolstof aanwezig. Dezelfde methode geldt voor propaan (C₃H₈) en methanol (CH₄O). Wanneer dus het aanwezige percentage koolstof in de brandstof gekend is, kan de hoeveelheid CO₂ die hieraan gelinkt is, berekend worden. Verder kennen we de hoeveelheid brandstof die nodig is voor het Scheldetraject. Om af te sluiten werd dit vermenigvuldigd met uitstootfactor van HFO.

Vergelijking 10 Reactie verbranding koolstof met Avogadro's getallen.

Bron: LATAIRE, E. (2023)



Tabel 9 uitstootfactor per brandstof gebaseerd op de hoeveelheid koolstof aanwezig in de brandstof. Berekend aan de hand van molaire massa van koolstof en zuurstof.

Bron: eigen werk aangevuld door Deniz & Zincir, 2016.

Type brandstof	Percentage koolstof aanwezig	Hoeveelheid koolstof aanwezig in 1 ton brandstof	Uitstootfactor (CO ₂ -uitstoot van 1 ton brandstof)
Heavy fuel oil (HFO)	86%	0.86 ton	3.15 ton
Light fuel oil (LFO)	onbekend	onbekend	onbekend
Diesel	85%	0.85 ton	3,12 ton
LNG	75%	0.75 ton	2,75 ton
Butaan	83%	0,83 ton	3,04 ton
Propaan	82%	0,82 ton	3,01 ton
methanol	38%	0.38 ton	1,39 ton

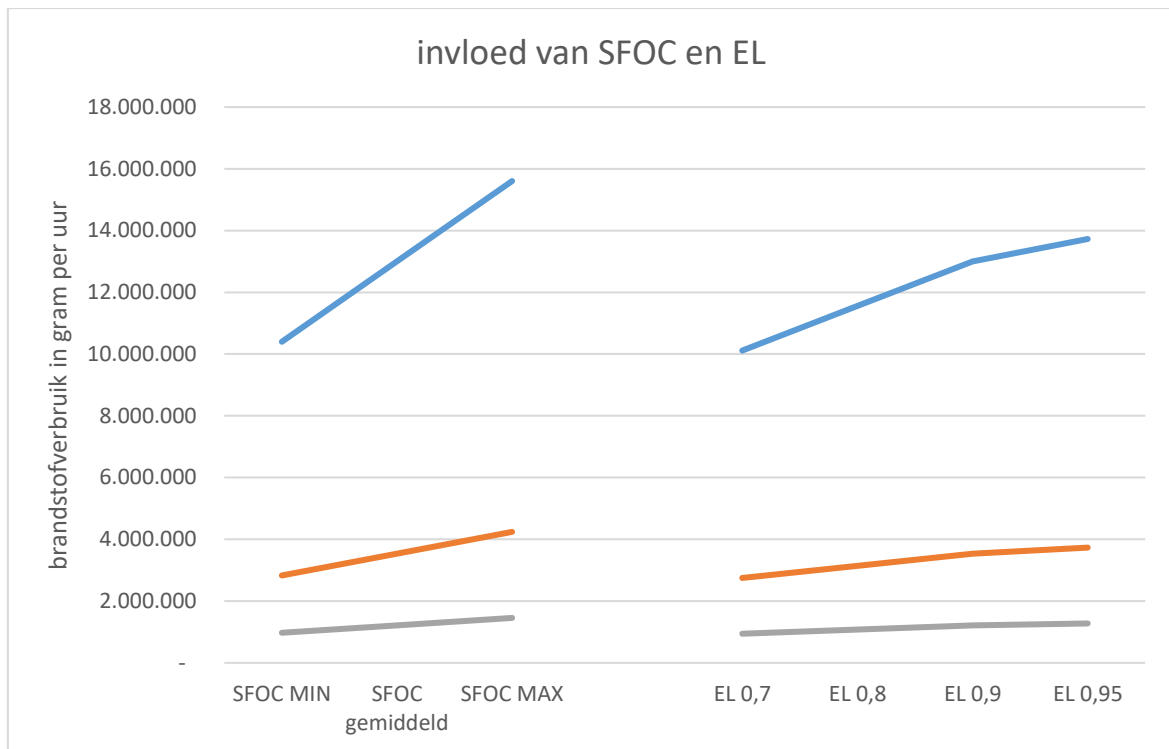
6 Resultaten en discussie

6.1 Resultaten

6.1.1 Invloed SFOC en EL

De invloed van de SFOC en EL is te zien op Figuur 16. De blauwe lijn geeft het verschil in brandstofverbruik aan voor de ontwerpsnelheid van MSC Altair, één van de schepen waar het Loodswezen de gegevens heeft gegeven. De oranje lijn geeft het verbruik aan manoeuvreer-snelheid weer. De grijze lijn geeft het brandstofverbruik aan een snelheid 30% trager dan de manoeuvreer-snelheid. Deze snelheid bedraagt 11,2 knopen. De procentuele stijging per snelheid ten gevolge van een verschillende SFOC-waarde bedraagt 33% (Links deel van de figuur). De procentuele stijging per snelheid ten gevolge van de verschillende EL-waarde bedraagt 26% (rechts gedeelte van de figuur).

Het snelheidsverschil zorgt voor een daling in het brandstofverbruik van 73% wanneer in plaats van aan ontwerpsnelheid aan manoeuvreer-snelheid wordt gevaren (zie ligging blauwe lijn t.o.v. oranje lijn) . Dit komt overeen met een snelheidsvermindering van 35%. Een verdere daling van manoeuvreer-snelheid naar 30% trager dan deze manoeuvreer-snelheid (zie ligging oranje lijn t.o.v. grijze lijn), en 55% tragere snelheid dan de ontwerpsnelheid (zie ligging blauwe lijn t.o.v. grijze lijn), zorgt voor een daling in brandstofverbruik van 66% ten opzichte van het brandstofverbruik aan manoeuvreer-snelheid en 91 % verschil ten opzichte van ontwerpsnelheid.

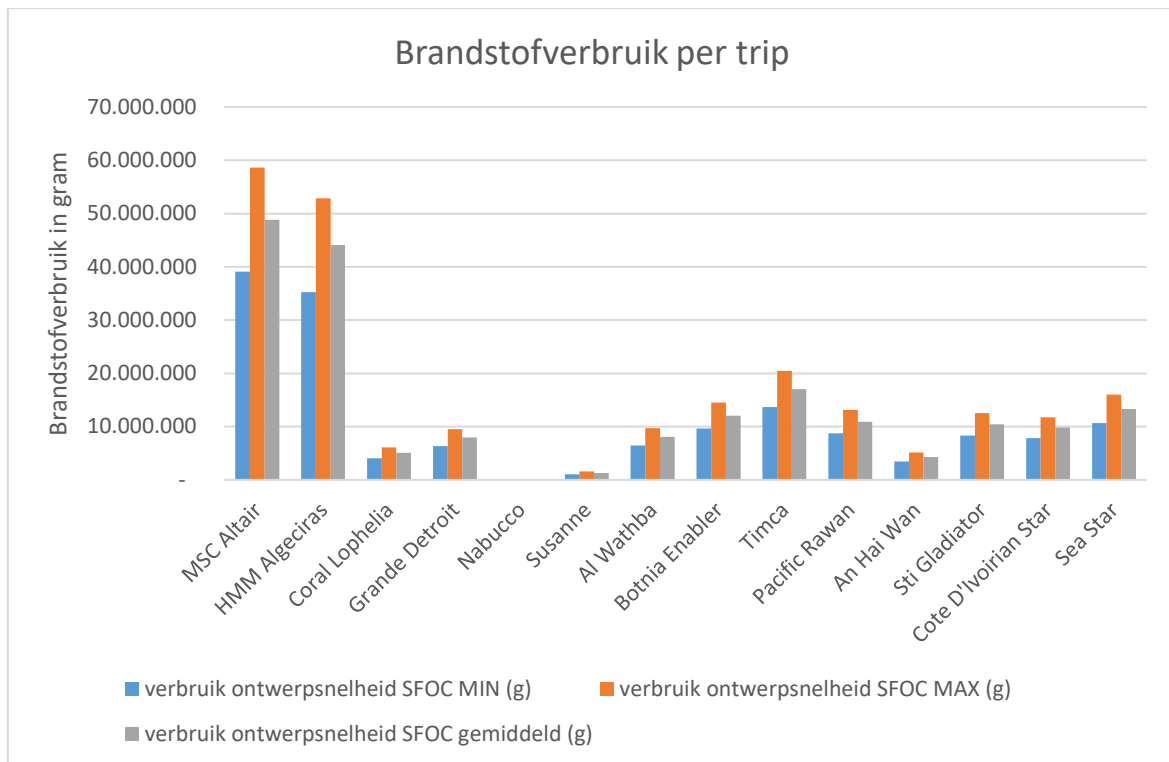


*Figuur 16 invloed Specific Fuel Oil Consumption (SFOC) en Engine Load (EL) op het brandstofverbruik. Berekend met de waarden van het schip MSC Altair. De minimale SFOC bedraagt 160 g/kWh, de maximale SFOC bedraagt 240 g/ KWH, de gemiddelde waarde voor de SFOC bedraagt 200 g/kWh. Hierbij werd een EL 0,95 gebruikt. De EL loopt van 70% tot 95%. Hierbij werd de gemiddelde SFOC gebruikt. De blauwe lijn geeft het verschil aan voor de ontwerpsnelheid van MSC Altair. De oranje lijn geeft het verbruik aan manoeuvreer-snelheid weer. De grijze lijn is aan een snelheid 30% trager dan de manoeuvreer-snelheid. Deze snelheid bedraagt 11,2 knopen.
Bron: eigen werk.*

6.1.2 Brandstofverbruik volgens methode van Lindstad et al. (2011)

Figuur 17 Figuur 17 geeft het brandstofverbruik van de schepen van het Loodswezen aan ontwerpsnelheid berekend volgens de methode van Lindstad et al. (2011). Hier werd het brandstofverbruik voor de verschillende SFOC-waarden berekend. Zo kan op een tweede methode de invloed van de SFOC geanalyseerd worden. Aangezien in deze methode de EL niet wordt beschouwd, werd deze niet in rekening gebracht. Om deze waarden beter te kunnen vergelijken werd ook het brandstofverbruik per uur vermeld.

Bij alle schepen geldt een stijging van 33% in het brandstofverbruik naargelang er met de minimale SFOC-waarde of de maximale SFOC-waarde wordt gerekend. Dit bevestigt nogmaals het effect van de SFOC-waarde zoals eerder getoond in 6.1.1.

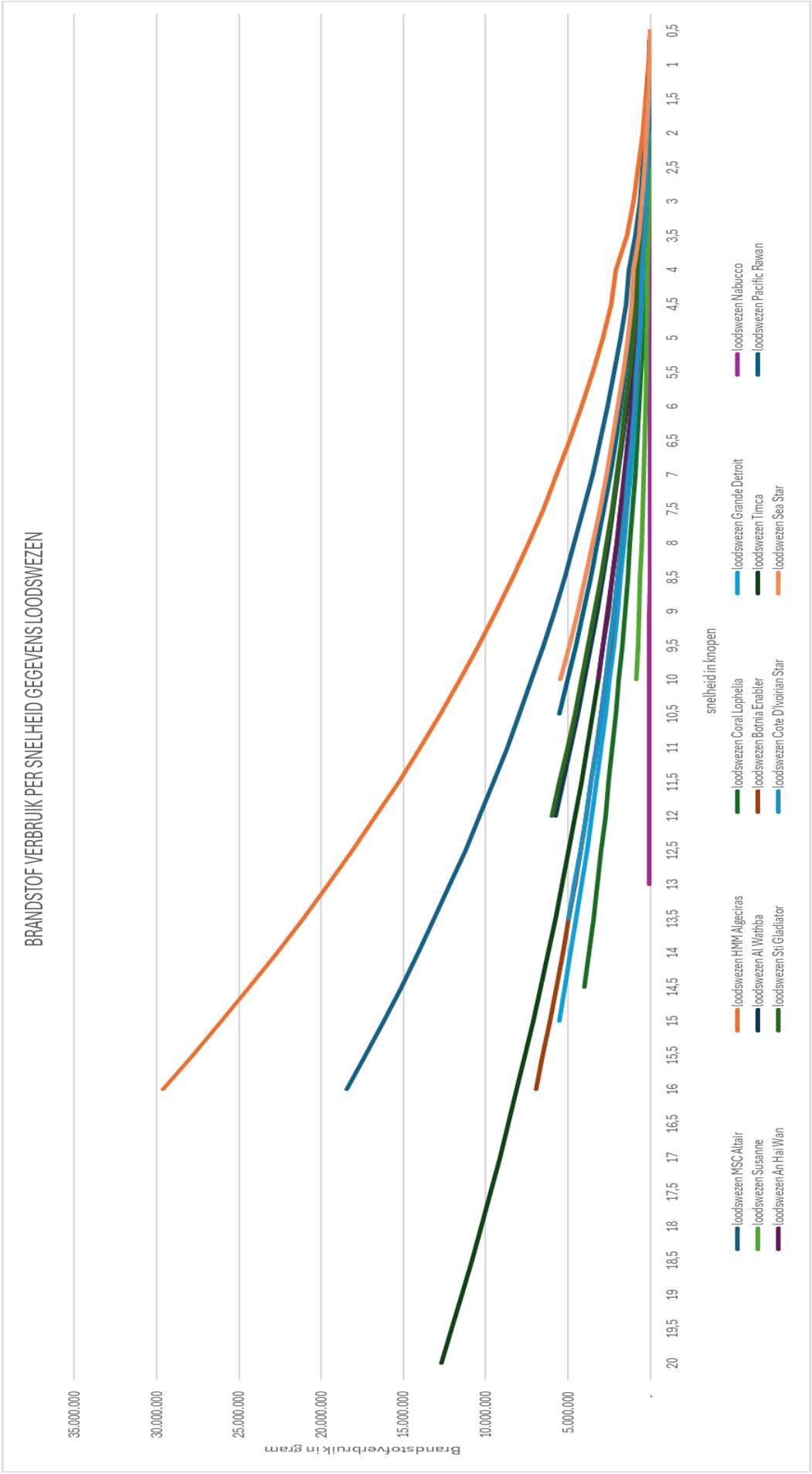


Figuur 17 Brandstofverbruik aan ontwerpsnelheid volgens de methode van Lindstad et al., per schip met de gegeven waarden van het Loodswezen. Per schip werd met verschillende Specific Fuel Oil Consumption (SFOC). . De minimale SFOC bedraagt 160 g/kWh, de maximale SFOC bedraagt 240 g/ KWH, de gemiddelde waarde voor de SFOC bedraagt 200 g/kWh. Bron: eigen werk

6.1.3 Brandstofverbruik volgens methode van Corbett et al. (2011) en Chang et al.(2014)

Het brandstofverbruik berekend met de gegevens van het Loodswezen aan verschillende snelheden volgens Corbett et al. (2011) en Chang et al. (2014) wordt weergegeven in Figuur 18. Wanneer er een snelheid vermindering is van 10%, 30%, 50% ten opzichte van de manoeuvreer-snelheid, daalt het brandstofverbruik respectievelijk zoals aangegeven in Tabel 10. Deze kan geraadpleegd worden om de exacte hoeveelheid brandstof, uitgedrukt in gram, bespaard wordt met de overeenkomstige snelheidsverminderingen. Hier kwam verder uit dat:

- een vertraging met 10% ten opzichte van de manoeuvreer-snelheid, overeenkomt met een verlaging van 19% in het brandstofverbruik;
- een vertraging van 30% ten opzichte van de manoeuvreer-snelheid, overeenkomt met een verlaging van 51% in het brandstofverbruik;
- een vertraging die de helft trager is ten opzichte van de manoeuvreer-snelheid, overeenkomt met een verlaging van 75% in het brandstofverbruik.



Figuur 18 Brandstofverbruik volgens methode van Corbett et al. (2011) en Chang et al.(2014) per snelheid per schip berekend met de waardes van het Loodswezen. Resultaten per snelheid weergegeven vanaf de manoeuvreer-snelheid van het schip.

Bron: eigen werk

Tabel 10 Effect van snelheidsdaling van 10%-30%-50% ten opzichte van manoeuvreer-snelheid op het brandstofverbruik van elk van de gegeven schepen. De procentuele verlaging in het brandstofverbruik ten opzichte van het brandstofverbruik aan manoeuvreer-snelheid wordt gegeven. Deze is voor alle schepen dezelfde. Alsook de snelheid (blauw) waarmee dit overeen komt wordt weergegeven. Het brandstofverbruik wordt uitgedrukt in gram (g). De snelheid wordt uitgedrukt in knopen.

Bron: eigen werk

	Manoeuvrer-snelheid	10% snelheidsvermindering	30% snelheidsvermindering	50% snelheidsvermindering
MSC Altair	18.445.30g 16 knopen	14.943.578g = 19% vermindering 14,4 knopen	9.042.522g = 51% vermindering 11,2 knopen	4.611.326g = 75% vermindering 8 knopen
HMM Algeciras	29.661.572g 16 knopen	24.030.508g 14,4 knopen	14.541.122g 11,2 knopen	7.415.393g = 8 knopen
Coral Lophelia	4.001.603g 14,5 knopen	3.266.944g 13,1 knopen	1.981.293g 10,2 knopen	1.129.584g 7,7 knopen
Grande Detroit	5.561.516g 15 knopen	4.504.828g 13,5 knopen	2.725.143g 10,5 knopen	1.390.379g 7,5 knopen
Nabucco	70.665g 13 knopen	57.267g 11,7 knopen	34.643g 9,1 knopen	17.666g 6,5 knopen
Susanne	842.390g 10 knopen	682.336g = 9 knopen	412.771g = 7 knopen	210.598g = 5 knopen
Al Wathba	5.766.848g 12 knopen	4.673.550g = 10,8 knopen	2.345.957g = 8,4 knopen	1.441.712g = 6 knopen
Botnia Enabler	6.956.928g 16 knopen	5.636.199g = 14,4 knopen	3.410.286g = 11,2 knopen	1.739.232g = 8 knopen
Timca	12.694.660g 20 knopen	10.282.679g= 18 knopen	6.220.386g = 14 knopen	3.173.666g= 10 knopen
Pacific Rawan	5.528.684g 11,6 knopen	4.525.748g = 9,5 knopen	2.748.044g = 7,4 knopen	1.411.632g = 5,3 knopen
An Hai Wan	3.186.446g 10,1 knopen	2.581.021g = 9 knopen	1.561.359g = 7 knopen	796.612g = 5 knopen
Sti Gladiator	6.002.627g 12 knopen	4.864.629g = 10,8 knopen	2.942.955g = 8,4 knopen	1.500.657g = 6 knopen

Cote D'Ivoirian Star	4.968.540g 13,3 knopen	4.059.345g = 12,2 knopen	2.460.416g = 9,5 knopen	1.262.241g = 6,8 knopen
Sea Star	5.474.805g 10 knopen	4.434.592g = 9 knopen	2.682.655g = 7 knopen	1.368.701g = 5 knopen

Deze snelheidsverlaging gaat gepaard met een langere vaartijd om het traject af te leggen zoals wordt weergegeven in Tabel 11. De procentuele verhoging van de tijd gaat verschilt voor elk schip en worden ook weergegeven:

- een snelheidsvermindering is van 10%, is de vaartijd voor het traject 12% langer;
- een snelheidsvermindering van 30%, is de vaartijd 43% lager;
- een snelheidsverschil van 50%, duurt het meestal dubbel zo lang dan aan manoeuvreer-snelheid om het traject af te leggen.

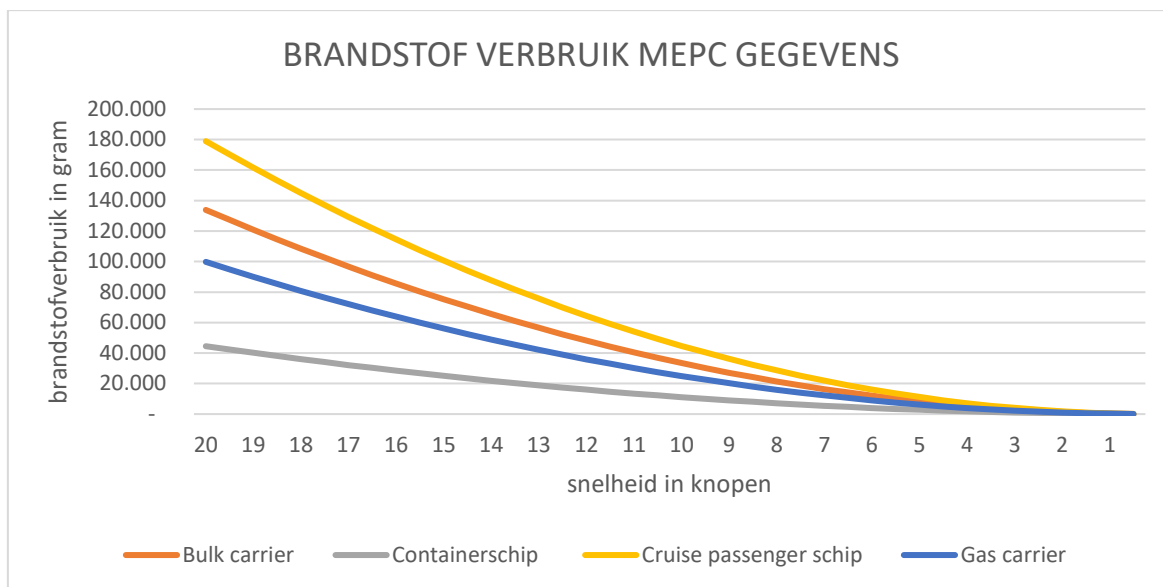
De tijd aan de huidige werkelijke snelheid ligt hoger dan de tijd aan manoeuvreer-snelheid, met name gemiddeld 27% hoger dan de manoeuvreersnelheid. Het verschil hierin hangt enorm van schip af. Het schip Nabucco is een uitzondering vanwege zijn heel korte afstand en daardoor heel trage huidige snelheid. Deze werd voor de gemiddelde stijging buiten beschouwing gehouden.

*Tabel 11 Effect van snelheidsdaling van 10%-30%-50% ten opzichte van manoeuvreer-snelheid op hoeveel tijd meer over het traject gedaan wordt aan deze vertraagde snelheid. De tijd wordt uitgedrukt in uur (h). Ook de huidige werkelijke tijd wordt weergegeven. De procentuele verandering werd genomen ten opzichte van de tijd aan manoeuvreer-snelheid.
Bron: eigen werk*

	Manoeuvr eer- snelheid	10% snelheidsver mindering	30% snelheidsver mindering	50% snelheidsver mindering	Huidige snelheid
MSC Altair	5,2h	5,8h = 12%	7,5h = 44%	10,4h = 100%	6,5h = 25%
HMM Algeciras	4,2h	4,7h = 12%	6h = 43%	8,4h = 100%	6,3h = 50%

Coral Lophelia	6h	6,7h = 12%	8,6h = 43%	11,4h = 90%	8h = 33%
Grande Detroit	4,1 h	4,5 h	5,8 h	8,1 h	6,9h = 68%
Nabucco	0,15 h	0,17 h	0,22 h	0,31 h	2,2h
Susanne	5,7 h	6,3 h	8,1 h	11,4 h	6,2h = 9%
Al Wathba	5,7 h	6,3 h	8,1 h	11,3 h	7,5h = 32%
Botnia Enabler	3,8 h	4,2 h	5,5 h	7,6 h	4,2h = 11%
Timca	3,7 h	4,1 h	5,3 h	7,5 h	5,1h = 38%
Pacific Rawan	5,9 h	7,2 h	9,3 h	12,9 h	8,3h = 41%
An Hai Wan	7,6 h	8,6 h	11 h	15,4 h	8,7h = 15%
Sti Gladiator	5,7 h	6,3 h	8,1 h	11,3 h	6,7h = 18%
Cote D'Ivoirian Star	5,4 h	5,9 h	7,6 h	10,6 h	6,1h = 13%
Sea Star	6,9 h	7,7 h	9,9 h	13,8 h	7,1h = 3%

Het brandstofverbruik die met de gegevens van het MEPC berekent werden, worden weergegeven in Figuur 19. Een snelheidsvermindering van 10% zorgt voor een vermindering is brandstofverbruik van 19%. Een snelheid vermindering van 30% komt bij alle schepen overeen met een daling in het brandstofverbruik van 51%. Indien de snelheid met 50% wordt verminderd resulteert dit in een daling in het brandstofverbruik van 75%. Het verschil tussen de verschillende type schepen blijft hetzelfde bij lagere snelheden. De verhouding tussen de verschillende schepen wordt weergegeven in Tabel 12.



Figuur 19 Brandstofverbruik volgens methode van Corbett et al. (2011) en Chang et al. (2014) per snelheid per type schip berekend met de waarden van het MEPC.

Bron: eigen werk

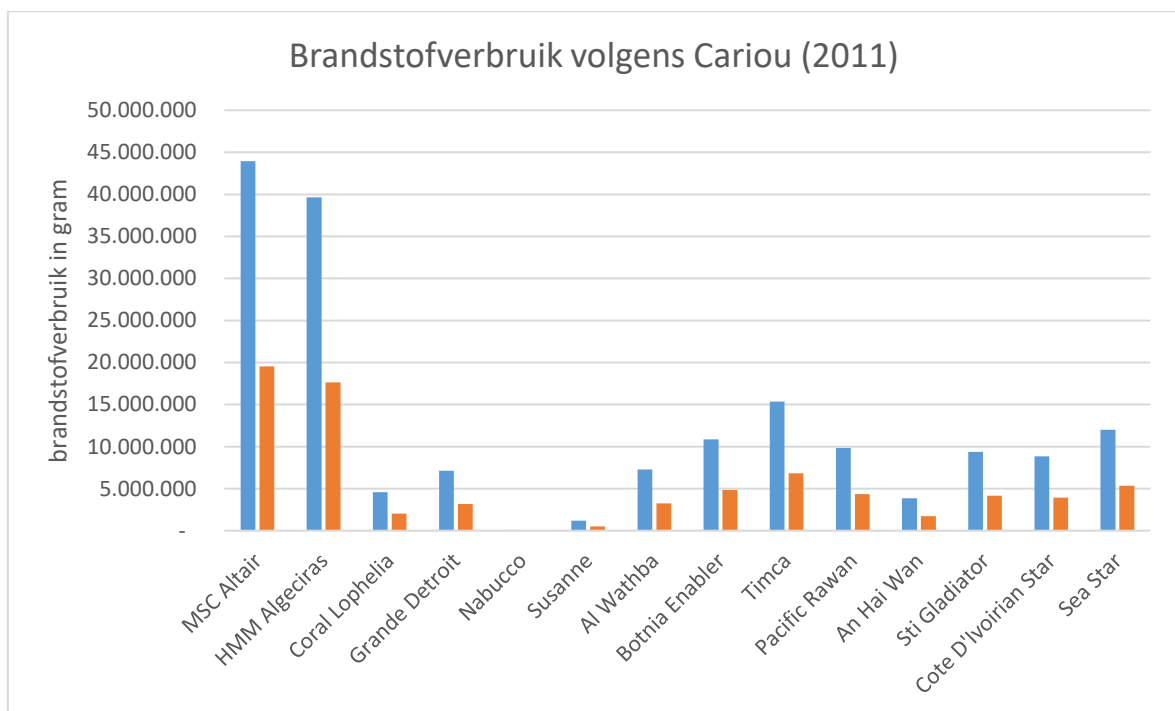
Tabel 12 Brandstofverbruik van het Scheldetraject, het percentage tussen verschillende scheepstype. De percentageverschillen worden uitgedrukt ten opzichte van het andere type schip, bovenaan de tabel.

Bron: eigen werk

	Percentage ten opzichte van containership	Percentage ten opzichte van gas carrier	Percentage ten opzichte van bulk carrier	Percentage ten opzichte van cruise passenger schip
Bulk carrier	19%	9%	/	-66%
Containership	/	-9%	-16%	-71%
Cruise passenger schip	348%	219%	193%	/
Gas carrier	9%	/	-9%	-69%

6.1.4 Brandstofverbruik volgens methode van Cariou (2011)

Figuur 20 geeft het brandstofverbruik weer berekend volgens de methode van Cariou (2011). Hierbij geeft blauw het brandstofverbruik aan ontwerpsnelheid weer en oranje het brandstofverbruik aan een snelheid 30% tragere snelheid dan de ontwerpsnelheid. Hierbij is er aan daling van 56% van het brandstofverbruik. De overeenkomstige snelheid hiermee wordt weergegeven in Figuur 20. Wit geeft weer dat deze snelheid onder de manoeuvreer-snelheid ligt. Indien dit niet het geval is, wordt dit weergegeven door rood: voor MSC Altair en Sea Star blijven met hun manoeuvreer-snelheid onder de 30% tragere snelheid dan ontwerpsnelheid. Aangezien op de Schelde aan manoeuvreer-snelheid dient gevaren te worden, vallen deze gevallen buiten de waarde.



Figuur 20 Brandstofverbruik in gram berekend volgens de methode van Cariou (2011) aan ontwerpsnelheid (blauw) en 30% tragere snelheid (oranje). Berekend met de gegevens van het Loodswezen.

Bron: eigen werk

Tabel 13 snelheid van schepen aan 30% tragere snelheid dan de manoeuvreer-snelheid. Rood geeft aan dat de 30% tragere snelheid hoger ligt dan de manoeuvreer-snelheid.
Bron: eigen werk

	snelheid 30% trager (knopen)	Manoeuvreer- snelheid (knopen)
MSC Altair	17,3	16
HMM Algeciras	13	16
Coral Lophelia	10,9	14,5
Grande Detroit	11,9	15
Nabucco	10,5	13
Susanne	8,3	10
Al Wathba	9,5	12
Botnia Enabler	14	16
Timca	15,4	20
Pacific Rawan	9,8	11,6
An Hai Wan	7,7	10,1
Sti Gladiator	10,5	12
Cote D'Ivoirian Star	12,6	13,3
Sea Star	10,7	10

6.1.5 Vertaling naar CO₂ uitstoot

Zoals Tabel 9 weergeeft, heeft methanol de laagste uitstootfactor. De andere brandstoffen liggen dicht bij elkaar. Hier is de uitstootfactor van HFO het grootst, namelijk 3,15 ton CO₂ per ton brandstof. Voor de vertaling naar CO₂ werd er gerekend met HFO aangezien HFO het grootste aandeel in gebruikte brandstof volgens het MEPC heeft. Het heeft een omzetfactor van 3,15 ton CO₂ per ton brandstof gebruikt. De hoeveelheid CO₂ die vrijkomt in de huidige situatie en aan een snelheidsvermindering van 10%, 30% en 50% wordt weergegeven in

Tabel 14. De procentuele daling van de CO₂-uitstoot bedraagt dezelfde als de procentuele daling van het brandstofverbruik. Namelijk:

- een vertraging met 10% ten opzichte van de manoeuvreer-snelheid, overeenkomt met een verlaging van de CO₂ van 19%;
- een vertraging met 30% ten opzichte van de manoeuvreer-snelheid, overeenkomt met een verlaging van de CO₂ van 51%;
- een vertraging die de helft trager is ten opzichte van de manoeuvreer-snelheid, overeenkomt met een verlaging van de CO₂ van 75%.

Tabel 14 Omzetting brandstofverbruik naar CO₂ uitstoot, uitgedrukt in ton. Omzettingfactor die gebruikt wordt bedraagt 3,15 ton per ton gebruikte brandstof, de omzettingfactor van HFO.

Bron: eigen werk

	Manoeuvreeer-snelheid	10% snelheidsvermindering	30% snelheidsvermindering	50% snelheidsvermindering
MSC Altair	58,1 ton	47,1 ton	28,5 ton	14,5 ton
HMM Algeciras	93,4 ton	75,7 ton	45,8 ton	23,4 ton
Coral Lophelia	12,6 ton	10,3 ton	6,3 ton	3,6 ton
Grande Detroit	17,5 ton	14,2 ton	8,6 ton	4,4 ton
Nabucco	0,24 ton	0,18 ton	0,11 ton	0,06 ton
Susanne	2,7 ton	2,2 ton	1,3 ton	0,7 ton
Al Wathba	18,2 ton	14,7 ton	7,4 ton	4,5 ton
Botnia Enabler	21,9 ton	17,8 ton	10,7 ton	5,5 ton
Timca	40 ton	32,4 ton	19,6 ton	10 ton
Pacific Rawan	17,4 ton	14,3 ton	8,7 ton	4,5 ton
An Hai Wan	10 ton	8,1 ton	4,9 ton	2,5 ton
Sti Gladiator	18,9 ton	15,3 ton	9,3 ton	4,7 ton
Cote D'Ivoirian Star	15,7 ton	12,8 ton	7,8 ton	4 ton
Sea Star	17,3 ton	14 ton	8,5 ton	4,3 ton

6.2 Discussie

Er kan geconcludeerd worden dat niet alle modellen in dit onderzoek kunnen gebruikt worden of de beste optie zijn. De methode met de modellen van Corbett et al. (2009) en Chang et al. (2014) geven in dit onderzoek het beste resultaat om verder te bespreken. Het model van Lindstad et al. (2011) geeft enkel de mogelijkheid het brandstofverbruik aan ontwerpsnelheid te berekenen. Het model van Cariou (2011) geeft enkel de mogelijkheid

om het brandstofverbruik aan ontwerpsnelheid en een snelheid van 30% trager dan deze snelheid te berekenen. Hiermee kan dus niet uitgebreid gezocht worden naar de mogelijkheden die een vertraging van snelheid te bieden heeft. De andere modellen bevestigen echter wel wat er uit de berekening van Corbett et al. (2009) en Chang et al. (2014) gekomen is.

Verder kan ook worden geconcludeerd dat de berekeningen met de cijfers van het MEPC een te laag brandstofverbruik geven. Dit kan al geconcludeerd worden doordat de gemiddelde snelheid van deze schepen ver onder de ontwerpsnelheid ligt van schepen van dit type. Wel geven ze dezelfde verhoudingen voor de verlaging van het brandstofverbruik. Ze geven dus weer wat een verandering in snelheid procentueel gezien teweegbrengt maar geven geen accurate cijfers over het brandstofverbruik op dit traject. Verder geven deze gegevens, zoals Tabel 12 weergeeft, de onderlinge verhouding van het brandstofverbruik van verschillende type schepen. Hieruit kan geconcludeerd worden dat cruise passanger schepen veel meer uitstoten dan containerschepen over dit traject. Het laagste verbruik wordt vastgesteld bij containerschepen.

Er zal verder gewerkt worden met de berekeningen die gedaan werden met de gegevens van het Loodswezen. Aangezien op de Schelde aan manoeuvreer-snelheid wordt gevaren, worden de vergelijkingen van het verschil in brandstofverbruik en CO₂-uitstoot ten opzichte van deze snelheid bekeken. De cijfers uit Tabel 10 geven weer dat procentueel gezien er een groot verschil is op de verandering van het brandstofverbruik. De grootste vermindering, die voorkomt wanneer de snelheid gehalveerd wordt, bedraagt 22 ton brandstof. Dit komt overeen met 70 ton CO₂ vermindering, een verlaging van 75%. In werkelijkheid zal dit cijfer lager liggen. Tussen 0 en 75% CO₂ vermindering is er heel veel ruimte om te verminderen. Dit klinkt in eerste instantie als een grote hoeveelheid; echter, over het hele traject dat het schip aflegt, is dit een heel klein aandeel van de totale hoeveelheid brandstof die hiermee bespaard wordt. Algemeen wordt genomen dat een schip 54 miljoen ton brandstof per dag verbruikt wordt. Ook al is het bespaarde gedeelte eerder beperkt over het gehele verbruik van het schip, is de besparing zeer significant wanneer enkel het Scheldetraject bekeken wordt en kan er dus heel wat uitgespaard worden op brandstofverbruik gedurende één loodsreis, afhankelijk van de keuzen die

gedurende de reis gemaakt worden. Anderzijds dient ook gekeken te worden naar de tijd die het schip hiermee verliest. Er is een groot verschil, van gemiddeld 27%, zit tussen de tijd die een schip theoretisch gezien over het traject aflegt en de werkelijke tijd; met grote verschillen per schip. Algemeen geldt er dat een snelheidsvermindering is van 10% zorgt voor een stijging van vaartijd voor het traject 12% langer. Bij een snelheidsvermindering van 30%, is de vaartijd 43% langer. Bij een snelheidsverschil van 50%, duurt het meestal dubbel zo lang dan aan manoeuvreer-snelheid om het traject af te leggen. In de praktijk komt tijdverlies vaker voor en liggen schepen vaak te wachten. Wanneer dit beter gepland kan worden, kan deze verloren tijd gebruikt worden om CO₂-uitstoot te verminderen. In dit onderzoek wordt enkel gefocust op CO₂ uitstoot. Aangezien het onderzochte traject in vrij dicht bewoonde gebieden ligt, kan het bijkomende effect naar fijnstof en stikstofoxiden verder onderzocht worden. Hieruit zullen mogelijk verdere voordelen uit blijken.

Naar deze resultaten dient met een kritische blik gekeken worden. De methodes die in dit onderzoek gebruik worden, houden geen rekening met enkele factoren die op de Schelde een grote invloed hebben en die de uitstoot zullen vergroten, of de vaart zullen vertragen. In werkelijkheid doen alle schepen er langer over dan de tijd die met manoeuvreer-snelheid erover gedaan dient te worden. Dit heeft onder andere te maken met invloeden van stroom, wind, manoeuvres voor andere schepen en de aanleg/ afvaart tijd. Bij grotere schepen dient bijvoorbeeld rekening gehouden worden met het tijvenster zodat zij vlot en veilig naar binnen kunnen varen. Tussen hoogwater en laagwater is er venster van ongeveer 6 uur. Verder heeft, zoals in 6.1.1 wordt weergegeven, het feit dat de werkelijke SFOC en EL niet gekend is van de schepen, een invloed op de bekomen cijfers. Hieruit kan besloten worden dat er een verschil tot 33% door een andere SFOC en 26% door een andere EL tot stand kan komen.

7 Conclusie

Deze scriptie onderzocht hoe de milieu-impact kan verminderd worden door het verlagen van de CO₂-uitstoot van schepen tijdens het beloodste traject op de Schelde.

Verschillende modellen werden bestudeerd om het effect van slow steaming op kortere trajecten, met name het beloodste Scheldetraject, te kwantificeren. Tijdens de toepassing werd ondervonden dat de modellen van Corbett et al. (2009) en Chang et al. (2014) het beste toegepast kunnen worden met de verkregen en gevonden gegevens. Hieruit bleek dat een vertraging met 10% ten opzichte van de manoeuvreer-snelheid, overeenkomt met een verlaging van 19% in het brandstofverbruik. Een vertraging van 30% ten opzichte van de manoeuvreer-snelheid, overeenkomt met een verlaging van 51% in het brandstofverbruik. Een vertraging die de helft trager is ten opzichte van de manoeuvreer-snelheid, overeenkomt met een verlaging van 75% in het brandstofverbruik. De grootste vermindering, die voorkomt wanneer de snelheid gehalveerd wordt, bedraagt 22 ton brandstof. Dit komt overeen met 70 ton CO₂ vermindering, een verlaging van 75%.

Het effect van slow steaming is dus wel degelijk significant. Kan er tijdens het loodsen een effectieve bijdrage geleverd worden? Ja, aan de hand van keuzen die gemaakt worden tijdens het beloodste traject.

8 Bibliografie

- Abouelfadl, A. H., & Abdelraouf, E. E. Y. (2016). The impact of optimizing trim on reducing fuel consumption. *Journal of shipping and Ocean Engineering*, 6(3). Geraadpleegd 2 mei 2023, van <http://www.isca.me/IJENS/Archive/v1/i4/9.ISCA-IRJEvsS-2012-060.pdf>
- Atilhan, S., Park, S., El-Halwagi, M. M., Atilhan, M., Moore, M., & Nielsen, R. B. (2021). Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 31, 100668. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.100668>
- Bicer, Y., & Dincer, I. (2018). Clean fuel options with hydrogen for sea transportation: A life cycle approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(2), 1179-1193. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.157>
- BIMCO Expects World Fleet Will Grow at Slower Pace in the Next 5 Years*. (z.d.). The Maritime Executive. Geraadpleegd 23 mei 2024, van <https://maritime-executive.com/article/bimco-expects-world-fleet-will-grow-at-slower-pace-in-the-next-5-years>
- Bouman, E. A., Lindstad, E., Rialland, A. I., & Strømman, A. H. (2017). State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 408-421. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.022>
- Cariou, P. (2011). Is slow steaming a sustainable means of reducing CO2 emissions from container shipping? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(3), 260-264. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2010.12.005>

- Chang, C.-C., & Wang, C.-M. (2014). Evaluating the effects of speed reduce for shipping costs and CO2 emission. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 31, 110-115. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.05.020>
- Chin, A., Juhn, C., & Thompson, P. (2006). Technical Change and the Demand for Skills during the Second Industrial Revolution: Evidence from the Merchant Marine, 1891–1912. *Review of Economics and Statistics*, 88(3), 572-578. <https://doi.org/10.1162/rest.88.3.572>
- Chou, T., Kosmas, V., Acciaro, M., & Renken, K. (2021). A Comeback of Wind Power in Shipping: An Economic and Operational Review on the Wind-Assisted Ship Propulsion Technology. *Sustainability*, 13(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/su13041880>
- Corbett, J. J., Wang, H., & Winebrake, J. J. (2009). The effectiveness and costs of speed reductions on emissions from international shipping. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(8), 593-598. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2009.08.005>
- ‘De Schelde is ‘s werelds meest beveiligde rivier’. (2017, september 24). De Tijd. <https://www.tijd.be/ondernemen/transport/de-schelde-is-s-werelds-meest-beveiligde-rivier/9935487.html>
- Demirel, Y. K., Uzun, D., Zhang, Y., Fang, H.-C., Day, A. H., & Turan, O. (2017). Effect of barnacle fouling on ship resistance and powering. *Biofouling*, 33(10), 819-834. <https://doi.org/10.1080/08927014.2017.1373279>
- Deniz, C., & Zincir, B. (2016). Environmental and economical assessment of alternative marine fuels. *Journal of Cleaner Production*, 113, 438-449. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.089>

Een Europese Green Deal. (2021, juli 14). https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_nl

EEXI and CII - ship carbon intensity and rating system. (z.d.). Geraadpleegd 5 mei 2023, van <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/EEXI-CII-FAQ.aspx>

Emissions from planes and ships: Facts and figures (infographic) | News | European Parliament. (2019, december 5). <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20191129STO67756/emissions-from-planes-and-ships-facts-and-figures-infographic>

Energy Efficiency Measures. (z.d.). Geraadpleegd 7 mei 2023, van <https://www.imo.org/fr/ourwork/environment/pages/technical-and-operational-measures.aspx>

Etukudo, D. (2022, januari 3). Engine Load: Definition, Calculations, and Performance. *Punchlist Zero.* <https://punchlistzero.com/engine-load-definition-calculation-vs-rpm-at-idle/>

Fourth Greenhouse Gas Study 2020. (z.d.). Geraadpleegd 15 maart 2023, van <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>

Fourth IMO GHG Study 2020—Full report and annexes.pdf. (z.d.). Geraadpleegd 23 mei 2024, van <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20-%20Full%20report%20and%20annexes.pdf>

Fuzzi, S., Baltensperger, U., Carslaw, K., Decesari, S., Denier Van Der Gon, H., Facchini, M. C., Fowler, D., Koren, I., Langford, B., Lohmann, U., Nemitz, E., Pandis, S., Riipinen,

- I., Rudich, Y., Schaap, M., Slowik, J. G., Spracklen, D. V., Vignati, E., Wild, M., ... Gilardoni, S. (2015). Particulate matter, air quality and climate: Lessons learned and future needs. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(14), 8217-8299.
<https://doi.org/10.5194/acp-15-8217-2015>
- Greenhouse gases. (2017, augustus 30). <https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/environment/greenhouse-gases>
- Health effects of outdoor air pollution. Committee of the Environmental and Occupational Health Assembly of the American Thoracic Society. (1996a). *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 153(1), 3-50.
<https://doi.org/10.1164/ajrccm.153.1.8542133>
- Health effects of outdoor air pollution. Committee of the Environmental and Occupational Health Assembly of the American Thoracic Society. (1996b). *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 153(1), Article 1.
<https://doi.org/10.1164/ajrccm.153.1.8542133>
- Hermesmann, M., & Müller, T. E. (2022). Green, Turquoise, Blue, or Grey? Environmentally friendly Hydrogen Production in Transforming Energy Systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 90, 100996.
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.100996>
- Khandekar, M. L., Murty, T. S., & Chittibabu, P. (2005). The Global Warming Debate: A Review of the State of Science. *Pure and Applied Geophysics*, 162(8-9), 1557-1586.
<https://doi.org/10.1007/s00024-005-2683-x>
- LATAIRE, E. (2023). *PROPULSION (part 2)*. Antwerp Maritieme Academy, Antwerpen.

- Lele, A., & Rao, K. V. S. (2016). Ship propulsion strategies by using wind energy. 2016 *International Conference on Emerging Technological Trends (ICETT)*, 1-6.
<https://doi.org/10.1109/ICETT.2016.7873693>
- Lindstad, H., Asbjørnslett, B. E., & Strømman, A. H. (2011). Reductions in greenhouse gas emissions and cost by shipping at lower speeds. *Energy Policy*, 39(6), 3456-3464.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.03.044>
- Loodsen. (z.d.). Geraadpleegd 6 mei 2024, van <https://www.agentschapmdk.be/nl/onze-diensten>
- Menz, F. C., & Seip, H. M. (2004). Acid rain in Europe and the United States: An update. *Environmental Science & Policy*, 7(4), 253-265.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2004.05.005>
- Pavlenko, N., Comer, B., Zhou, Y., Clark, N., & Rutherford, D. (z.d.). *The climate implications of using LNG as a marine fuel*.
- Perera, L. P., & Mo, B. (2016). Emission control based energy efficiency measures in ship operations. *Applied Ocean Research*, 60, 29-46.
<https://doi.org/10.1016/j.apor.2016.08.006>
- Peters, A., Perz, S., Doring, A., Stieber, J., Koenig, W., & Wichmann, H. E. (1999). Increases in Heart Rate during an Air Pollution Episode. *American Journal of Epidemiology*, 150(10), 1094-1098. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a009934>
- Pfoser, S., Schauer, O., & Costa, Y. (2018). Acceptance of LNG as an alternative fuel: Determinants and policy implications. *Energy Policy*, 120, 259-267.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.05.046>

- Psaraftis, H. N., & Kontovas, C. A. (2013). Speed models for energy-efficient maritime transportation: A taxonomy and survey. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 26, 331-351. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.09.012>
- SFC — Stories. (z.d.). Sustainable Ships. Geraadpleegd 3 mei 2024, van <https://www.sustainable-ships.org/stories/tag/SFC>
- Ananth,T. (2021, april 21). *3 Important Calculations Every Marine Engineer Must Know On Ships*. Marine Insight. <https://www.marineinsight.com/guidelines/3-important-calculations-every-marine-engineer-must-know/>
- Tadros, M., Ventura, M., & Guedes Soares, C. (2021). Design of Propeller Series Optimizing Fuel Consumption and Propeller Efficiency. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/jmse9111226>
- Van Roy, W., Scheldeman, K., Van Roozendaal, B., Van Nieuwenhove, A., Schallier, R., Vigin, L., & Maes, F. (2022). Airborne monitoring of compliance to NOx emission regulations from ocean-going vessels in the Belgian North Sea. *Atmospheric Pollution Research*, 13(9), 101518. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101518>
- World fleet to grow by 6.4% over the coming five years, down from 7.4% in previous 5 years. (1AD, januari 1). https://www.bimco.org/news/market_analysis/2021/20210624-world_fleet_to_grow_by_slower_in_next_5_years
- Yan, R., Wang, S., Zhen, L., & Laporte, G. (2021). Emerging approaches applied to maritime transport research: Past and future. *Communications in Transportation Research*, 1, 100011. <https://doi.org/10.1016/j.commtr.2021.100011>

Yin, J., Fan, L., Yang, Z., & Li, K. X. (2014). Slow steaming of liner trade: Its economic and environmental impacts. *Maritime Policy & Management*, 41(2), 149-158.

<https://doi.org/10.1080/03088839.2013.821210>

Zincir, B. (2020). *A Short Review of Ammonia as an Alternative Marine Fuel for Decarbonised Maritime Transportation.*