

KLIMAATNEUTRALE ZEESCHEEPVAART IN 2050

Een verkenning van beelden en paden daar naartoe

G. Geilenkirchen, J. Harmsen, R. Verbeek, J. Faber, E. van den Toorn
26 maart 2024

Colofon

Klimaatneutrale zeescheepvaart in 2050. Een verkenning van beelden en paden daar naartoe

© PBL Planbureau voor de Leefomgeving

Den Haag, 2024

PBL-publicatienummer: 5221

TNO nummer: TNO 2024 P10106

Contact

Gerben.Geilenkirchen@pbl.nl

Auteurs

G. Geilenkirchen (PBL), J. Harmsen, R. Verbeek, (beiden TNO), J. Faber, E. van den Toorn (beiden CE Delft). Met medewerking van I. Stammes (PBL).

Review

De auteurs zijn dank verschuldigd aan Johan de Jong (Marin), Richard Smokers (TNO), Amber Nusteling, Femke Verwest en Jaco Stremmer (PBL) en Barbara Kits, Henk-Erik Sierink en Bas Kelderman (Ministerie van IenW) voor het reviewen van eerdere versies van dit rapport.

Supervisie

Femke Verwest

Redactie figuren

Inge Stammes

Toegankelijkheid

Het PBL hecht veel waarde aan de toegankelijkheid van zijn producten. Mocht u problemen ervaren bij het lezen ervan, dan kunt u contact opnemen via info@pbl.nl. Vermeld daarbij s.v.p. de naam van de publicatie en het probleem waar u tegenaan loopt.

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Geilenkirchen, G.P. et al. (2024), Klimaatneutrale zeescheepvaart in 2050. Een verkenning van beelden en paden daar naartoe, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) is het nationale instituut voor strategische beleidsanalyses op het gebied van milieu, natuur en ruimte. Het PBL draagt bij aan de kwaliteit van de politiek-bestuurlijke afweging door het verrichten van verkenningen, analyses en evaluaties waarbij een integrale benadering vooropstaat. Het PBL is vóór alles beleidsgericht. Het verricht zijn onderzoek gevraagd en ongevraagd, onafhankelijk en wetenschappelijk gefundeerd.

TNO is een onafhankelijke onderzoeksorganisatie. Wij verbinden mensen en kennis om innovaties te creëren die de concurrentiekracht van bedrijven en het welzijn van de samenleving duurzaam versterken. Hiertoe zijn wij bij wet opgericht als publiekrechtelijke rechtspersoon. Deze TNO-wet geeft ons een aantal bijzondere taken en kaders en verbindt daaraan specifieke voorwaarden waaronder wij ons werk moeten uitvoeren. Het doel daarvan is dat wij onafhankelijk en betrouwbaar oplossingen kunnen blijven creëren voor de uitdagingen die de samenleving ons stelt.

Inhoud

Samenvatting	4
1 Inleiding	12
2 Trends in vervoersvolume en uitstoot broeikasgassen	16
2.1 Vervoersvolumes in de zeescheepvaart	16
2.2 Samenstelling vloot	18
2.3 Uitstoot van broeikasgassen	21
3 Beleid voor verduurzaming van de zeescheepvaart	27
3.1 Mondiaal beleid	27
3.2 Europees beleid	30
3.3 Nederlands beleid	33
4 De opties voor verduurzaming	35
4.1 Beschrijving duurzame energiedragers	35
4.2 Multicriteria-analyse energiedragers	37
4.3 Efficiëntieverbetering	48
5 Paden naar klimaatneutrale zeescheepvaart 2050	50
5.1 Ontwikkeling van vervoersvolumes en energie-efficiëntie	50
5.2 De Nederlandse bunkermarkt	52
5.3 Inzet van hernieuwbare energiedragers	55
5.4 Paden naar klimaatneutrale zeevaart in 2050	57
6 Kansen, uitdagingen en handelingsperspectieven	62
6.1 Regelgeving	62
6.2 Technologie	63
6.3 Beschikbaarheid energiedragers en bijbehorende infrastructuur	65
6.4 Financiële aspecten	66
Referenties	68

Samenvatting

De zeescheepvaart speelt een belangrijke rol in de mondiale economie, maar is een weinig zichtbaar onderdeel van de economie. De zeevaart is essentieel in het vervoer van energie, voedsel en andere producten. Tegelijkertijd is de zeevaart verantwoordelijk voor ongeveer 3% van de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen. Een groot deel daarvan valt buiten de scope van nationale emissiedoelen. De uitstoot van de sector is sinds 1990 fors toegenomen. Om aan de klimaatafspraken uit het Parijsakkoord te voldoen, zal de uitstoot van de zeescheepvaart moeten worden teruggebracht. Deze studie verkent de opgave om tot een klimaatneutrale zeevaart te komen. Hiervoor zijn beelden geschetst voor een klimaatneutrale zeevaart in 2050, is verkend hoe paden daar naartoe eruit kunnen zien en welke kansen, uitdagingen en handelingsperspectieven daaruit voortvloeien voor Nederland. Dit onderzoek is uitgevoerd door PBL, TNO en CE Delft en maakt onderdeel uit van een gezamenlijke studie van PBL en TNO naar een klimaatneutrale mobiliteit in 2050. In een aanpalende studie van PBL genaamd 'Trajectverkenning Klimaatneutraal' (TVKN) wordt onderzocht hoe de Nederlandse samenleving als geheel klimaatneutraal kan worden in 2050 en welke emissiereducties daarbij passen in de verschillende delen van de economie en de samenleving. De paden voor zeescheepvaart, die in de voorliggende studie zijn uitgewerkt, dienen daarvoor als input.

Startpunt transitie: groeiende vervoersvolumes en een fossiel aangedreven vloot

Het vervoer per zeeschip is de afgelopen decennia wereldwijd gestaag toegenomen. De uitstoot van broeikasgassen groeide ook, maar minder hard dan de vervoersvolumes door een verbetering van de energie-efficiëntie van het vervoer. De verwachting is dat de vervoersvolumes blijven groeien. Bijna 99% van de zeeschepen vaart momenteel op stookolie of dieselolie. Wel is er de afgelopen jaren veel geïnvesteerd in nieuwe LNG-schepen en zijn sinds kort ook relatief veel *dual fuel* schepen in bestelling die op stookolie en op methanol kunnen varen en daarmee meerdere mogelijkheden hebben om te verduurzamen. Ook batterij-elektrische en hybride aandrijving is in opkomst. Dit gaat om kleinere schepen die vaak op vaste verbindingen varen, zoals veerboten. Het aantal schepen met alternatieve aandrijving in de mondiale vloot is nog klein. De technische levensduur van schepen bedraagt zo'n 25 tot 30 jaar, waardoor de verjonging van de vloot langzaam gaat. Dit kan de transitie naar klimaatneutrale zeevaart vertragen.

Nederland als tankstation van de internationale zeescheepvaart

Nederland heeft met de haven van Rotterdam één van de grootste havens ter wereld en ook één van de grootste bunkerhavens ter wereld. Gezamenlijk zijn de Nederlandse zeehavens goed voor ca. 14% van de goederenoverslag in de Europese zeehavens. Mede als gevolg daarvan wordt er in Nederland veel scheepsbrandstof gebunkerd. Nederland heeft een aandeel van bijna 30% in de Europese bunkermarkt. In de Rotterdamse haven wordt veel olie geraffineerd waardoor er van oudsher veel stookolie beschikbaar is. Tevens zijn er efficiënte bunkerfaciliteiten en is er sprake van schaalvoordelen door de omvang van de haven. Er wordt ook relatief veel stookolie geïmporteerd die vervolgens vanuit Rotterdam weer aan de zeevaart wordt geleverd. De uitstoot van broeikasgassen die gepaard gaat met de bunkerleveringen aan de zeevaart in Nederland bedraagt momenteel zo'n 33 megaton CO₂-equivalenten (CO₂-eq.). Ter illustratie: de totale binnenlandse uitstoot van broeikasgassen in Nederland bedroeg in 2022 zo'n 158 megaton CO₂-eq. De uitstoot van de zeescheepvaart telt hier niet in mee, omdat conform internationale afspraken de uitstoot van de internationale zeescheepvaart niet aan landen wordt toegerekend.

De in Nederland gebunkerde brandstof wordt niet alleen op vaarten van en naar Nederland gebruikt. De uitstoot van alleen de vaarten van en naar Nederland bedraagt ca. 20 megaton CO₂-eq.

De uitstoot van de zeescheepvaart op alleen de Nederlandse wateren, waaronder het Nederlandse deel van de Noordzee, bedraagt 5 megaton, waarvan bijna 1 megaton in havengebieden.

Verduurzaming van de zeescheepvaart is een ingewikkelde opgave

De opgave om de zeevaart te verduurzamen is complex. Het gaat om een mondiale markt die niet direct onder de verantwoordelijkheid van een land valt. Omdat zeeschepen lange afstanden afleggen, zijn er voor het bunkeren van brandstof meestal veel (uitwijk)mogelijkheden. Verduurzaming van de zeevaart vereist daarom een internationale aanpak. Wereldwijd faciliteert de Internationale Maritieme Organisatie (IMO) van de VN de regulering van de sector, in de vorm van verdragen die worden overeengekomen door de lidstaten. Het klimaatbeleid van de IMO was tot nu toe vooral gericht op het verbeteren van de energie-efficiëntie van de bestaande vloot en van nieuwe schepen. Medio 2023 heeft de IMO zijn klimaatdoelen aangescherpt: om en nabij 2050 moet de netto-broeikasgasuitstoot van de zeescheepvaart mondiaal tot nul gereduceerd zijn. Ook zijn er indicatieve tussendoelen en streefwaarden vastgesteld voor 2030 en 2040. De nieuwe klimaatstrategie is een belangrijke stap richting verduurzaming van de mondiale zeescheepvaart. De besluitvorming over de in te zetten instrumenten om de doelen te realiseren moet uiterlijk in 2025 zijn afgerond.

Vooruitlopend op de IMO-besluitvorming is binnen de EU in maart 2023 overeenstemming bereikt over een maatregelenpakket waarmee de uitstoot van de zeevaart in de EU wordt teruggebracht. De uitstoot van de zeescheepvaart van, naar en binnen de EU gaat deels onder het Europese emissiehandelssysteem (EU-ETS) vallen en de koolstofintensiteit van de energiedragers in de zeevaart moet tot 2050 met minimaal 80% worden teruggebracht. Dit vereist een grote inzet van hernieuwbare energie. De Nederlandse overheid heeft als doel om in 2050 een klimaatneutrale zeevaart te realiseren. Er moet nog worden besloten welke uitstoot binnen de scope valt van dit doel. De inzet van het kabinet Rutte-IV was primair gericht op het maken van internationale afspraken over normering en beprijzing van de zeevaart. Het nationale beleid is gericht op het versneld marktrijp maken van duurzame technologieën door het uitvoeren van pilotprojecten en het optreden als *launching customer*. Hiervoor is in 2023 budget gereserveerd vanuit het Klimaatfonds.

Verschillende technologieën beschikbaar voor klimaatneutrale zeescheepvaart

Klimaatneutrale brandstoffen spelen een cruciale rol in de verduurzaming van de zeescheepvaart. Deze brandstoffen kunnen via verscheidene productieroutes worden geproduceerd en via verschillende conversietechnologieën worden toegepast (Tabel S.1). In de basis kan onderscheid worden gemaakt tussen biobrandstoffen, gemaakt uit biograndstoffen, en synthetische ofwel e-brandstoffen die worden gemaakt uit elektriciteit. We hebben de energiedragers getoetst op vier criteria: de technologische en commerciële rijpheid en beschikbaarheid (TRL en CRL), de kosten, de milieu-impact en de praktische toepasbaarheid. Alle hernieuwbare energiedragers kennen nog uitdagingen op één of meerdere van die criteria. De *technological* en de *commercial readiness levels* (TRL en CRL) voor gebruik van synthetische ammoniak (e-ammoniak) en waterstof in verbrandingsmotoren zijn nog relatief laag. Methanolmotoren zijn verder ontwikkeld en worden al op kleine schaal commercieel toegepast. Het gebruik van waterstof, ammoniak of methanol in brandstofcellen bevindt zich nog in de R&D-fase. Er is recent toenemende belangstelling voor nucleaire aandrijving in specifieke segmenten van de zeescheepvaart (naast defensie betreft dit bijvoorbeeld grote waterbouwschepen), maar deze optie is niet meegenomen in de analyses in de voorliggende studie omdat dit nog in een erg lage ontwikkelingsfase zit.

Tabel S.1

Duurzame brandstof- en energieconversie-opties voor de zeescheepvaart.

Energiedrager	Brandstofproductie		Energieconversie aan boord
	Biobrandstof	E-brandstof	
Diesel	X	X	Verbrandingsmotor
LNG	X	X	Verbrandingsmotor
Methanol	X	X	Verbrandingsmotor of brandstofcel
Ammoniak		X	Verbrandingsmotor of brandstofcel
Waterstof		X	Verbrandingsmotor of brandstofcel
Accu-elektrisch		X	Elektromotor
Kernenergie			Stoomturbine

Kosten van nieuwe energiedragers zijn nog onzeker

De onzekerheid over de toekomstige productiekosten van de verschillende typen biobrandstoffen en e-brandstoffen uit tabel S.1 is groot. Veel typen worden momenteel niet of slechts in beperkte hoeveelheden geproduceerd. Uit verschillende studies blijkt dat het verschil in productiekosten tussen fossiele en hernieuwbare brandstoffen groot blijft, wellicht tot na 2050. De waarde die vanuit bestaande en nieuwe milieubeleidsinstrumenten wordt toegekend aan de verschillende klimaatvriendelijke brandstoffen zal een grote rol spelen in de ‘netto’ meerkosten van de brandstof. Dit zal belangrijk zijn in het overbruggen van het verschil in productiekosten met fossiele brandstof. Omgekeerd kan het beprijzen van fossiele brandstoffen via het EU-ETS of een mogelijk nieuw mondiaal beprijzingsinstrument ook bijdragen aan het overbruggen van dit prijsverschil. In beide gevallen nemen de energiekosten van de zeevaart toe.

Uitstoot van niet-gereguleerde stoffen een risico

Bij gebruik van batterij-elektrische aandrijving en brandstofcellen met waterstof komen geen (schadelijke) emissies vrij. Alle andere hernieuwbare brandstoffen uit tabel S.1 kennen wel een uitstoot van luchtverontreinigende stoffen en soms ook van broeikasgassen. Alle brandstoffen hebben een lager zwavelgehalte dan fossiele scheepsbrandstof en gebruik ervan resulteert daarmee in een lagere uitstoot van zwaveloxiden en fijnstof. Gebruik van (bio-)LNG kan echter gepaard gaan met een hoge uitstoot van methaan, wat een deel van de klimaatwinst van die optie teniet doet. Er zijn technieken in ontwikkeling om dit te ondervangen, maar het is nog niet bekend hoe effectief die zijn en toepassing daarvan is niet gereguleerd. Om bij te dragen aan klimaatneutraliteit is regulering van methaanemissies cruciaal. Verder is er weinig bekend over ongewenste emissies die kunnen optreden bij gebruik van methanol (zoals aldehyde) en ammoniak (stikstofverbindingen). Het verdient aanbeveling de risico's op hoge emissies van deze componenten te onderzoeken en indien nodig hier wet- en regelgeving voor te ontwikkelen. Over emissies bij brandstofcellen voor methanol en ammoniak is nauwelijks iets bekend.

Toepasbaarheid van hernieuwbare energiedragers varieert

De praktische toepasbaarheid van de verschillende hernieuwbare brandstoffen varieert. De energiedichtheid is veelal lager dan die van diesel of stookolie en voor sommige brandstoffen zijn cilindrische tanks nodig. Hierdoor is meer ruimte nodig aan boord van het schip. Dit kan ten koste gaan van de vaarrange en/of het ladingruim. Een andere uitdaging is het gebrek aan juridisch kader voor toepassing van nieuwe brandstoffen. Voor ammoniak en waterstof (en waterstofdragers) in combinatie met verbrandingsmotoren of brandstofcellen moet nog wet- en regelgeving ontwikkeld worden, zoals op het gebied van veiligheid, emissiestandaarden, inbouwstandaarden in het

schip, brandstofspecificaties en het bunkerproces. Hiervoor is onderzoek nodig naar de risico's van opslag en gebruik en de benodigde veiligheidsmaatregelen. Dit kan de marktintroductie van hernieuwbare brandstoffen vertragen. Vanwege de lange levensduur van schepen is ook relevant of hernieuwbare brandstoffen in bestaande schepen kunnen worden toegepast. Biodiesel kan veelal zonder noemenswaardige aanpassingen in bestaande schepen worden gebruikt, maar voor methanol moeten motoren en leidingen worden aangepast. Het is onzeker of er op termijn ook retrofit-kits voor motoren op ammoniak beschikbaar komen. Voor waterstof en batterij-elektrische aandrijving geldt dat de vaarrange beperkt is, waardoor ze voor de intercontinentale zeevaart feitelijk geen optie zijn. Wel kunnen ze een rol spelen in de verduurzaming van de kustvaart.

Onzekerheid over toekomstige bunkervraag in Nederland is groot

Op basis van de inzichten uit verschillende scenariostudies verwachten we dat de vervoersvolumes in de zeevaart van en naar Nederland beperkt toenemen tot 2050. De groei van de op- en overslag is geraamd op 0 tot 45% tussen 2021 en 2050. De hogere kosten van hernieuwbare energiedragers en de IMO-regelgeving voor verbetering van de energie-efficiëntie dragen er aan bij dat de energie-efficiëntie van het vervoer in deze periode verder verbetert. Er is een relatief groot potentieel voor verbetering door efficiënter ontwerp van schepen, operationele maatregelen zoals lage(re) vaarsnelheden en logistieke maatregelen. Tot 2050 schatten we dat deze verbeteringen leiden tot een vermindering van het energieverbruik met 25 tot 40%. Gecombineerd leidt dit tot een bandbreedte voor de groei van het energiegebruik van de zeevaart van en naar Nederland van -20 tot +3%.

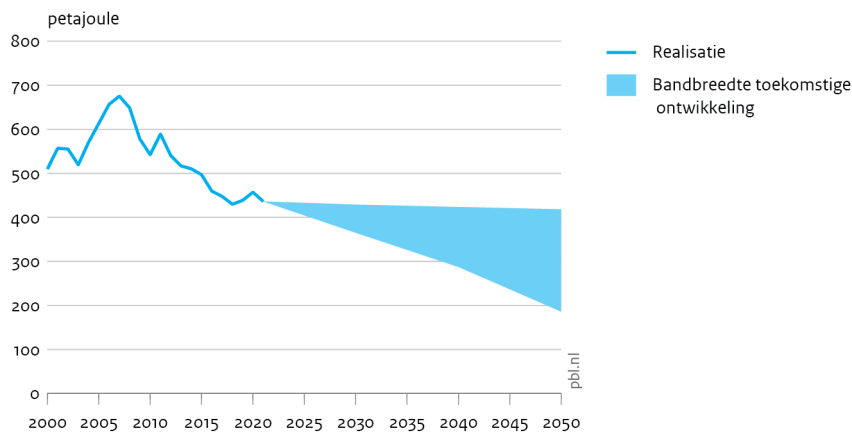
Voor de analyse van de verduurzaming van het Nederlandse energiesysteem in TVKN is relevant wat de transitie betekent voor de bunkermarkt in Nederland. De onzekerheid hieromtrent is groot. De laatste tien jaar hebben Nederlandse zeehavens marktaandeel verloren in de mondiale bunkermarkt. Het is denkbaar dat deze trend zich doorzet, zeker als de Europese plannen voor verduurzaming ambitieuzer zijn dan het reductietempo dat de IMO wereldwijd voorschrijft. In dat geval kunnen er uitwijkeffecten optreden en kan er meer buiten de EU worden gebunkerd. Ook is het denkbaar dat schepen in de toekomst vaker moeten bunkeren vanwege de lagere energie-inhoud van de hernieuwbare brandstoffen. Dat kan de vraag in grote bunkerhavens zoals Rotterdam doen afnemen. Het is echter ook mogelijk dat de haven van Rotterdam door investeringen die deels al zijn gepland tot de koplopers gaat behoren in de verduurzaming van brandstoffen voor de zeevaart en een leidende rol blijft houden in de bunkermarkt. Vanwege deze onzekerheid schetsen we twee varianten voor de rol van de Nederlandse bunkerhavens in de mondiale bunkermarkt: één waarin de bunkerfunctie halveert tot 2050 en één waarin die stabiliseert op het niveau van afgelopen jaren. Gecombineerd leiden de aannames over volumegroei, efficiëntieverbetering en de rol van de Nederlandse havens in de mondiale bunkermarkt tot een forse bandbreedte voor de ontwikkeling van de toekomstige bunkervraag vanuit de zeescheepvaart in Nederland (Figuur S.1).

Toekomstige energiemix voor verduurzaming zeevaart nog niet te voorspellen

Het is nog te vroeg om winnaars aan te wijzen in het palet van hernieuwbare brandstoffen voor de zeevaart. Het is waarschijnlijk dat biobrandstoffen, waaronder biodiesel, bio-LNG en biomethanol, een belangrijke rol gaan spelen in de verduurzaming van de zeescheepvaart. Voordeel van deze route is dat er, in het geval van *drop-in* biodiesel, nauwelijks aanpassingen aan schepen nodig zijn. De waarschijnlijkheid van deze route hangt sterk samen met de beschikbaarheid van biograndstoffen in zijn algemeenheid en voor de zeescheepvaart in het bijzonder. Ook de ontwikkeling van de productiekosten en beleidskeuzes over de mate waarin en de voorwaarden waaronder verschillende typen biobrandstoffen mogen worden ingezet voor de verduurzaming van de zeescheepvaart zijn hierbij van groot belang.

Figuur S.1

Bunkering door zeescheepvaart in Nederland



Bron: CBS (realisatie); PBL, TNO & CE Delft (scenario)

E-brandstoffen kunnen ook een belangrijke rol gaan spelen in de verduurzaming van de zeescheepvaart. Voor alle e-brandstoffen is de beschikbaarheid van hernieuwbare elektriciteit en van *elektrolyzers* om die in waterstof om te zetten een cruciale factor. Afhankelijk van de wereldwijde ontwikkeling van de productie van e-brandstoffen, kan vanaf 2030/2035 de inzet hiervan in theorie snel toenemen (zie bijvoorbeeld Ricardo en DNV, 2023). Ook de beschikbaarheid van duurzame koolstofbronnen is een cruciale factor die het potentieel van koolstofhoudende e-brandstoffen gaat bepalen. Voor ammoniak of waterstof is geen koolstof nodig. Ammoniakmotoren zijn echter nog niet marktrijp en de regelgeving voor toepassing voor ammoniak, waaronder veiligheidsvoorschriften voor het gebruik, moet nog worden uitgewerkt.

Het gebruik van batterijen zal ook een rol spelen in de verduurzaming van de sector. Voor een aantal scheepstypen die op vaste routes en op korte afstanden varen, zoals veerboten, havenschepen en *offshore* bevoorradingschepen, is batterij-elektrische aandrijving mogelijk en wordt dit soms nu al toegepast. Daarnaast zijn er mogelijkheden voor inzet van batterijen in andere schepen voor een deel van de energievraag aan boord (bijvoorbeeld hulpsystemen). Ook zal walstroom een rol spelen bij het voldoen aan de energievraag aan de kade. Er is al beleid geïntroduceerd om gebruik hiervan verplicht te stellen vanaf 2030 voor een deel van de vloot.

Twee paden naar klimaatneutrale zeescheepvaart

Op basis van de analyse van de verschillende hernieuwbare energiedragers en de verwachte ontwikkeling van de energievraag van de zeevaart in Nederland schetsen we in deze studie twee paden naar klimaatneutrale zeevaart in Nederland in 2050 (Figuur S.2)¹. Met deze paden kunnen de consequenties van de transitie voor de zeescheepvaart en voor het Nederlandse energiesysteem worden verkend. Vanwege de onzekerheden over de toekomstige energiemix schetsen we twee uiteenlopende paden en specificeren we daarin alleen de mate waarin de verschillende typen energiedragers worden ingezet. Een prognose van de specifieke bio- en e-brandstoffen achten we op dit

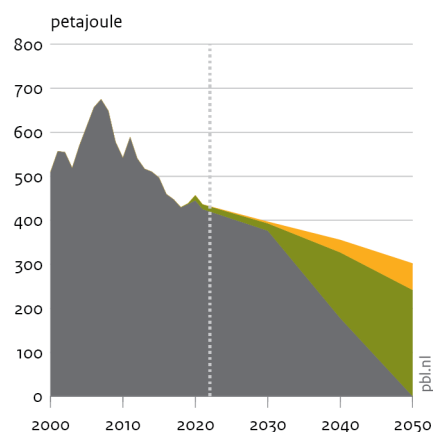
¹ Feitelijk betreft het paden naar verduurzaming van de bunkerbrandstoffen die vanuit Nederland aan de zeescheepvaart worden geleverd.

moment te onzeker. De paden zijn gebaseerd op de evaluatie van de verschillende hernieuwbare brandstoffen en energiedragers (zoals hiervoor samengevat) en literatuurbronnen. Om het resultaat overzichtelijk te houden is voor het toekomstig bunkervolume het gemiddelde aangehouden van de bandbreedte in Figuur S.1.

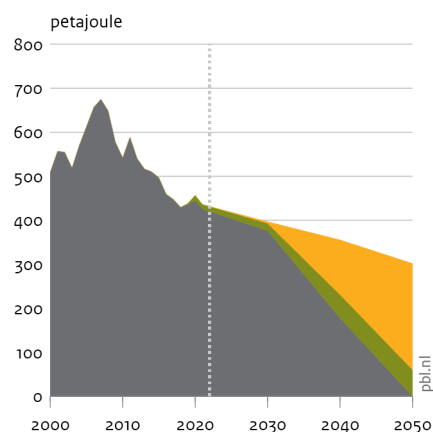
Figuur S.2

Paden naar klimaatneutrale zeescheepvaart

Hoofddrol voor biobrandstof



Hoofddrol voor e-brandstof



- E-brandstof
- Biobrandstof
- Fossiele brandstof
- ⋮ Scheiding realisatie en raming

Bron: Emissieregistratie (realisatie); PBL, TNO & CE Delft (raming)

In beide paden is in het komende decennium een belangrijke rol weggelegd voor verbetering van de energie-efficiëntie van het vervoer, mede onder invloed van de IMO-regelgeving. Daarnaast verwachten we dat dit decennium vooral een rol is weggelegd voor biobrandstoffen in de verduurzaming van de zeescheepvaart. Na 2030 voorzien we in beide paden een versnelde groei van de inzet van hernieuwbare brandstoffen. In het eerste pad blijft ook na 2030 een belangrijke rol weggelegd voor biobrandstoffen. Deze kunnen deels relatief eenvoudig als *drop-in* brandstof in de huidige schepen worden toegepast, wat deze route vanuit het perspectief van de zeescheepvaart aantrekkelijk maakt. In het tweede pad spelen e-brandstoffen de hoofddrol.

Kansen, uitdagingen en handelingsperspectieven

De paden naar een klimaatneutrale zeescheepvaart brengen grote uitdagingen met zich mee. Ook bieden ze kansen voor Nederland. We hebben de kansen en uitdagingen in vier categorieën geclusterd: regelgeving, technologie, beschikbaarheid van energiedragers en bijbehorende infrastructuur en financiering van de transitie.

Regelgeving: uitwerking beleidskader vormt een cruciale stap

Regelgeving is een cruciale factor in de verduurzaming van de zeevaart, maar ook een van de grootste uitdagingen gezien het internationale karakter van de zeevaart. Een wetgevend kader is cruciaal voor investeerders om in te kunnen schatten hoe de markt eruit gaat zien. Naast beleidsdoelen en concrete beleidsinstrumenten dient regelgeving duidelijkheid te scheppen over welke oplossingen in internationale regelgeving als duurzaam worden beschouwd en onder welke voorwaarden.

Hoewel de klimaatdoelen van de IMO inmiddels helder zijn, is momenteel (begin 2024) nog onduidelijk welke beleidsinstrumenten ingezet gaan worden en welke eisen worden gesteld aan duurzame oplossingen. Helderheid hierover is van groot belang om investeringen los te krijgen. Daarnaast is een regelgevend kader nodig voor certificering van grondstoffen en energiedragers. De ontwikkeling van regelgeving gebeurt vooral op internationaal niveau. De directe invloed van de Nederlandse overheid en andere Nederlandse belanghebbenden is hiermee beperkt. In de uitwerking en voorbereiding van de nieuwe IMO-regelgeving kan Nederland wel een voortrekkersrol spelen door samen met gelijkgezinde landen regelgeving voor te bereiden.

Technologie: doorontwikkeling technologie vergroot opties voor verduurzaming

Niet alle technologieën voor verduurzaming van de zeevaart zijn al uitontwikkeld. Hier ligt een belangrijke uitdaging. Technologieën voor verbrandingsmotoren zijn veelal al ver ontwikkeld. Zo zijn verbrandingsmotoren op methanol al commercieel beschikbaar. Ammoniakmotoren bevinden zich in een vroeger ontwikkelstadium, maar lijken op termijn wel een kansrijke optie voor verduurzaming van de scheepvaart. Doorontwikkeling van deze technologie is daarmee van belang, inclusief proeftoepassingen en ontwikkeling van ondersteunende regelgeving. Voor brandstofcellen zal er een grote behoefte zijn aan schaarse materialen, voor het brandstofcelsysteem zelf en voor de bijbehorende accu's. Hier ligt een belangrijke uitdaging voor toekomstige uitrol van deze technologie. Op korte termijn (komende 5 tot 10 jaar) is het cruciaal dat er pilottoepassingen gerealiseerd worden, om duidelijkheid te verschaffen over verdere kostenbesparingen in het ontwerp en over de veiligheidsmaatregelen (bijvoorbeeld omtrent benodigde veiligheidsruimtes rondom de bunkertank). Hier ligt een kans voor Nederland vanwege het grote maritieme cluster.

Energiedragers: beschikbaarheid hernieuwbare brandstoffen bezien in samenhang met toenemende vraag uit andere delen van de economie

De beschikbaarheid van hernieuwbare brandstoffen voor verduurzaming van de zeevaart vormt ook een grote uitdaging. In de geschetste paden neemt de vraag naar hernieuwbare brandstoffen vooral na 2030 snel toe. Om dit mogelijk te maken is het cruciaal dat er opschaling plaatsvindt van de productiecapaciteit van hernieuwbare elektriciteit, duurzame koolstof, waterstof (elektrolyzers) en biobrandstoffen (en benodigde biograndstoffen daarvoor beschikbaar komen). En dat de toekomstige vraag uit de zeevaart in samenhang wordt bezien met de vraag uit andere sectoren van de economie, zoals vanuit de luchtvaart en industrie. Nederland is waarschijnlijk niet in staat om de volledige vraag naar hernieuwbare brandstoffen vanuit de zeevaart nationaal te produceren (dit hangt sterk samen met hoe groot de toekomstige bunkervraag is). Het is waarschijnlijk dat er net als nu grote hoeveelheden energiedragers voor de zeevaart geïmporteerd gaan worden en/of dat een deel van de bunkervraag verplaatst naar andere regio's waar hernieuwbare energiedragers goedkoper geproduceerd kunnen worden.

Voor nieuwe energiedragers zoals methanol en ammoniak is nieuwe bunkerinfrastructuur nodig. Hierbij is van belang dat er een uniforme standaard komt en dat er in eerste instantie voldoende bunkerlocaties beschikbaar zijn langs relevante routes (zogenoemde groene corridors). Voor Nederland is dit geen groot probleem door de aanwezigheid van het bestaande energiecluster (raffinage van olie, opslag en distributie van brandstoffen en chemische industrie). In andere Europese havens vergt dit wel additionele investeringen en de opzet van logistieke ketens omdat de betreffende energiedragers daar vaak nog niet worden verhandeld. Binnen groene corridors kunnen havens de beschikbaarheid van verschillende energiedragers coördineren zodat schepen de juiste energiedragers kunnen bunkeren. Hier ligt een kans om toepassing en bunkering te testen en de

weg te bereiden voor bredere inzet. Overheden kunnen hierbij een coördinerende functie vervullen, maar ook marktpartijen zullen een rol moeten spelen bij de uitrol van deze corridors.

Financiering van de transitie vormt belangrijke uitdaging

Voor verduurzaming van de zeescheepvaart zijn grote investeringen nodig. Hier ligt ook een belangrijke uitdaging. Om financiering los te krijgen is een dwingend beleidskader voor verduurzaming cruciaal. Maar ook financiële instellingen en verzekeringsmaatschappijen kunnen een rol spelen. Naarmate grote investeerders meer focus leggen op groene investeringen wordt het makkelijker voor rederijen of brandstofproducenten om de hoge kapitaalkosten gedekt te krijgen. Ook verladers kunnen een belangrijke rol spelen in verduurzaming van de scheepvaart. Steeds meer bedrijven rapporteren over de CO₂-emissies van hun producten over de hele productieketen, waaronder het transport. Zo kunnen bedrijven de broeikasgasvoetafdruk van producten (hun zogeheten scope 3 emissies) vermelden, waardoor dit een aspect van concurrentie tussen bedrijven wordt. Dit kan een drijfveer zijn voor verduurzaming van scheepvaart en een manier voor rederijen om hogere kosten van hernieuwbare brandstoffen in de aanloopfase van de transitie af te dekken.

Op korte termijn is er sprake van een ongelijk speelveld tussen scheepseigenaren die wel of niet investeren in duurzame oplossingen en is het lastig om financiering te krijgen voor investeringen of dekking voor hogere operationele kosten zolang verduurzaming nog niet is wettelijk is voorgeschreven. Overheden kunnen hierin een rol spelen via subsidies voor innovaties, proeftoepassingen en eerste marktintroductie. Voor de lange termijn is duidelijkheid omtrent de richting en het beleidskader van de verduurzaming cruciaal. Hoe dwingender regelgeving wordt, hoe minder risicovol een investering wordt. Het Europese beleidskader biedt inmiddels helderheid door de CO₂-uitstoot uit de zeescheepvaart te beprijsen via het EU-ETS en tegelijkertijd de toenemende inzet van hernieuwbare brandstoffen af te dwingen. Hiermee krijgt de uitstoot van broeikasgassen een prijs en wordt investeren in verduurzaming financieel interessant. Een vergelijkbaar beleidskader vanuit de IMO kan de transitie in de mondiale zeevaart verder brengen.

1 Inleiding

De zeescheepvaart speelt een belangrijke rol in de mondiale economie, maar is een weinig zichtbaar onderdeel van de economie en van onze samenleving. De zeevaart is essentieel in het vervoeren van energie, voedsel en andere producten. Ongeveer 90% van alle goederen die wij gebruiken is per zeeschip vervoerd. De zeescheepvaart is bovendien een hele efficiënte manier om goederen over lange afstanden te vervoeren. Tegelijkertijd is de zeescheepvaart verantwoordelijk voor ongeveer 3% van de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen (IMO, 2020). Het overgrote deel daarvan valt buiten de scope van nationale emissiedoelstellingen, zoals het Nederlandse doel om in 2030 de uitstoot van broeikasgassen met minimaal 55% te reduceren ten opzichte van 1990².

De zeescheepvaart wordt binnen het klimaatbeleid en -onderzoek gerekend tot de sectoren die *hard to abate* zijn (zie bijvoorbeeld IPCC, 2022 en Edelenbosch et al., 2022). Een afname van de uitstoot van broeikasgassen is moeilijk te bewerkstelligen. Het gaat om een mondiaal opererende, en daarom moeilijk met beleid te beïnvloeden sector waarbij technologische oplossingen om de uitstoot te reduceren nog slechts beperkt voorhanden zijn, terwijl de transportvolumes snel groeien. De uitstoot van de sector is sinds 1990 dan ook fors toegenomen (IMO, 2020). Om aan de klimaatafspraken uit het Parijsakkoord te voldoen, zal ook de uitstoot van de zeescheepvaart moeten worden teruggebracht.

Paden richting klimaatneutrale zeescheepvaart in 2050

Nederland en de EU hebben zichzelf ten doel gesteld om uiterlijk in 2050 klimaatneutraal te zijn. Dit is een grote opgave die veel veranderingen met zich meebrengt. Die zijn technologisch van aard, maar ook institutioneel en gedragsmatig. Om de implicaties van deze opgave voor de mobiliteit in, van en naar Nederland in kaart te brengen, verkennen PBL en TNO in een gezamenlijke studie hoe paden naar een klimaatneutrale mobiliteit in Nederland in 2050 eruit kunnen zien. Dit is gedaan voor vier vervoerwijzen: het wegverkeer, de luchtvaart, de binnenvaart en de zeescheepvaart. Op basis van de paden is per vervoerswijze onderzocht welke kansen, uitdagingen en handelingsperspectieven daaruit voortvloeien voor Nederland en voor het Nederlandse beleid. Het voorliggende rapport, waaraan naast PBL en TNO ook CE Delft heeft bijgedragen, schetst de opgave en de resultaten voor de zeescheepvaart. Naast de afzonderlijke verkenningen per vervoerwijze wordt in een overkoepelende rapportage ingegaan op de lessen die kunnen worden getrokken voor het gehele mobiliteitssysteem in Nederland (PBL & TNO, 2024).

Klimaatneutraal in 2050 als uitgangspunt

In deze verkenning is ervoor gekozen om het doel van een klimaatneutrale samenleving in 2050 te vertalen naar het uitgangspunt dat alle modaliteiten in 2050 geen broeikasgassen meer uitstoten. Dit is een veronderstelling die dient als startpunt voor het denken over de transitie waar de mobiliteitssector voor staat. Het is niet gezegd dat iedere vervoerswijze daadwerkelijk klimaatneutraal moet zijn in 2050 om het Nederlandse en Europese doel van een klimaatneutrale samenleving in

² Op basis van afspraken van de IPCC hoeven landen alleen de emissies van binnenlandse vaarten mee te tellen in hun emissietotalen. Emissies van internationale vaarten moeten wel worden gerapporteerd aan het klimaatbureau van de VN, maar tellen niet mee voor het nationale emissietotaal.

2050 te realiseren³. Door bijvoorbeeld ondergrondse CO₂-opslag uit biograndstoffen kunnen negatieve emissies worden gecreëerd waardoor een zekere restemissie elders in het systeem kan worden gecompenseerd. In een aanpalende studie van PBL genaamd ‘Trajectverkenning Klimaatneutraal’ (TVKN) wordt onderzocht hoe de Nederlandse samenleving als geheel in 2050 klimaatneutraal kan worden en welke emissiereducties daarbij passen in de verschillende delen van de economie en de samenleving (PBL, 2024). De paden voor zeescheepvaart die in de voorliggende studie zijn uitgewerkt dienen als input voor de analyses in TVKN.

De voorliggende verkenning richt zich op de periode tot 2050 en redeneert vanuit het nationale en Europese doel van een klimaatneutrale samenleving in (uiterlijk) 2050. In het licht van de klimaatafspraken van Parijs is 2050 ‘slechts’ een tussenstap in het beperken van de opwarming van de aarde. De cumulatieve uitstoot van broeikasgassen tot het einde van deze eeuw bepaalt of de Parijsafspraken worden gehaald, niet het emissieniveau in 2050 (of in elk ander willekeurig jaar). We verkennen daarom ook hoe snel de afname van de emissie van broeikasgassen kan plaatsvinden en welke factoren daarop van invloed zijn. Vanuit praktisch oogpunt wordt echter niet gewerkt met koolstofbudgetten⁴. Dit kan onderwerp zijn van vervolgonderzoek. In TVKN wordt op het niveau van het Nederlandse energiesysteem als geheel, inclusief de bunkermarkten voor de lucht- en scheepvaart, verkend hoe ook de klimaatdoelen voor 2030 of 2040 gehaald kunnen worden, naast het doel van klimaatneutraliteit in 2050.

Aanpak om tot paden te komen

Deze verkenning maakt gebruik van *backcasting*, waarbij beelden zijn geschetst voor een klimaatneutrale zeevaart in 2050 en vervolgens gestileerde paden zijn uitgewerkt die daar uitkomen. De beelden voor 2050 en de paden daarnaartoe zijn een combinatie van verdedigbare aannames over de ontwikkeling van vervoersvolumes, efficiëntieverbetering en de bijbehorende inzet van technologieën en energiedragers. Ze zijn bedoeld om het speelveld in kaart te brengen, inclusief de uitdagingen die de transitie met zich meebrengt. Hoe robuust zijn onze inzichten over hoe klimaatneutrale zeescheepvaart eruit ziet in de komende decennia en waar zitten nog belangrijke onzekerheden, dilemma’s en afruilen? De paden zijn globaal uitgewerkt in cijfers en figuren. Het betreft echter geen integrale doorrekening. Om tot bandbreedtes te komen is gebruik gemaakt van eerder onderzoek van TNO en PBL, eerdere doorrekeningen zoals de KEV 2022⁵ en de WLO-scenario’s uit 2015, en literatuurstudie. De studie is gebaseerd op de kennis en inzichten en het beleid per najaar 2023.

³ Ook is niet gezegd dat klimaatneutrale mobiliteit in 2050 in Nederland in lijn is met de klimaatafspraken van Parijs. Welke emissiereductie in Nederland gerealiseerd moet worden om in lijn met Parijs te handelen valt buiten de scope van deze studie. In PBL (2021) wordt daar wel op gereflecteerd. Ook recente adviezen van de Europese wetenschappelijke adviesraad voor klimaatverandering (ESABCC, 2023) en van de Nederlandse klimaatraad (WKR, 2023) gaan hier op in.

⁴ Het koolstofbudget is de maximale uitstoot van broeikasgassen die we mondiaal in totaal nog mogen uitstoten om de opwarming van de aarde met een bepaalde kans tot een bepaald niveau te beperken. Hoe ambitieuzer het klimaatdoel en hoe groter de nagestreefde kans van slagen, hoe lager het resterende koolstofbudget is dat daarbij past.

⁵ De KEV 2023 leidt niet tot andere inzichten over de paden die in dit rapport worden geschetst.

Trendmatige voortzetting van productie- en consumptiepatronen

De paden in deze studie redeneren vanuit een trendmatige voortzetting van de huidige consumptie- en productiepatronen en huidige voorkeuren en gedrag. Er zijn geen majeure wijzigingen verondersteld in de omvang en samenstelling van onze economie en het daaraan gerelateerde vervoer van goederen per zeeschip, anders dan die direct voortvloeien uit de energietransitie zelf (zoals het wegvallen van het vervoer van fossiele energie of veranderingen in de bunkermarkt). Deze aanpak sluit aan bij die in TVKN, waarin vanuit huidige trends in productie en consumptie wordt onderzocht hoe klimaatneutraliteit in 2050 eruit kan zien in Nederland. De trendmatige groei van productie en consumptie en het hieraan gerelateerde vervoer van goederen die uit deze aanpak resulteert is echter geen gegeven. We verkennen in deze studie daarom ook op basis van literatuur welke rol gedragsverandering kan spelen in het verduurzamen van de mobiliteit in Nederland. Dit deel van de studie heeft een meer verkennend karakter, mede omdat er minder literatuur is op dit vlak dan op het vlak van trendmatige ontwikkelingen en ontwikkeling van duurzame technologieën. De inzichten hieruit zijn niet verwerkt in nieuwe paden. Dit kan onderwerp zijn van vervolgonderzoek.

Scope van de studie

De scope voor deze verkenning is de zeescheepvaart van en naar Nederland. Hoe ontwikkelen de vervoersvolumes zich, hoeveel efficiënter kan het vervoer worden en welke hernieuwbare energiedragers en bijbehorende technologie aan boord van de schepen zijn in beeld om die energievraag te verduurzamen? Voor de TVKN-studie is daarnaast relevant hoe de bunkervraag in Nederland zich ontwikkelt. Ondanks dat deze bunkervraag niet meetelt voor de nationale klimaatdoelen, is die wel sterk verweven met het Nederlandse energiesysteem. Om die vraag te beantwoorden is ook relevant waar er straks gebunkerd wordt. We brengen daarom ook de toekomstige bunkervraag in Nederland in kaart.

De zeescheepvaart is een internationale sector. In de analyse wordt daarom ook het internationale speelveld (qua beleid en technologieontwikkeling) betrokken en worden internationale ontwikkelingen in energiegebruik en uitstoot van broeikasgassen van de zeescheepvaart geschetst. Uitgangspunt voor de analyse is dat de EU en de rest van de wereld ook op een pad zitten dat in lijn is met de Parijsafspraken. Dit pad is niet geëxpliciteerd, maar impliciet gaan we ervan uit dat de paden naar klimaatneutrale mobiliteit in Nederland niet tot grote uitwijkeffecten leiden naar omliggende landen of andere werelddelen. Iedereen doet mee. Het tempo waarin dit tot emissiereductie leidt en het type oplossingen om de zeevaart te verduurzamen kunnen verschillen per regio.

De paden in dit rapport schetsen de energievraag en de uitstoot van broeikasgassen door de zeescheepvaart zelf. Dit is de zogeheten 'tank-to-wheel' emissie. Voor klimaatneutraliteit dient de hele keten van de brandstoffen en van de vaartuigen in ogenschouw te worden genomen. Bij de productie en sloop van de schepen en bij de productie en het transport van energiedragers wordt ook energie gebruikt met (potentieel) bijbehorende uitstoot van broeikasgassen. Deze bijdrage wordt niet berekend. In TVKN worden aparte analyses gedaan van de verduurzaming van de elektriciteitsopwekking en over biograndstoffen. Ook worden aparte paden geschetst voor verduurzaming van de landbouw en de industrie, waar het merendeel van de zogeheten ketenemissies van de hernieuwbare energiedragers en van de productie van de vaartuigen plaatsvindt. In die rapportages wordt ingegaan op het aanbod van hernieuwbare energiedragers en de verduurzaming van de betreffende sectoren. Vervolgens wordt in TVKN op systeemniveau gekeken hoe de Nederlandse economie in 2050 klimaatneutraal kan zijn. In de voorliggende rapportage wordt daarom niet uitgebreid ingegaan op keteneffecten. Voor een overzicht van de totale energieketens voor klimaatneutrale mobiliteit wordt verwezen naar recent onderzoek van het KiM (2022).

Hernieuwbare energiedragers zoals biobrandstoffen en e-brandstoffen spelen een cruciale rol in de verduurzaming van de zeescheepvaart. De beschikbaarheid van die brandstoffen is daarmee een cruciale randvoorwaarde voor de transitie. In dit rapport gaan we daar slechts beperkt op in, omdat vraagstukken over beschikbaarheid van deze hernieuwbare energiedragers breder spelen dan alleen voor de zeescheepvaart. Dit onderwerp wordt uitgebreider behandeld in de overkoepelende studie over de verduurzaming van de mobiliteit als geheel, waarin de potentiële energievraag van alle mobiliteit in Nederland wordt samengebracht, en in TVKN, waarin de beschikbaarheid van biograndstoffen en waterstof voor Nederland wordt verkend in relatie tot de vraag naar hernieuwbare energiedragers vanuit verschillende sectoren, waaronder mobiliteit.

Leeswijzer

Om tot paden te komen voor klimaatneutrale zeescheepvaart in 2050 schetsen we in hoofdstuk 2 eerst de huidige situatie en trends. We beschrijven kort de huidige op- en overslag in de Nederlandse zeehavens, de huidige vloot en de uitstoot van broeikasgassen en de autonome ontwikkeling daarvan. In hoofdstuk 3 beschrijven we hoe het huidige klimaatbeleid vanuit de VN, de EU en in Nederland eruit ziet voor de zeescheepvaart en schetsen we kort de gevolgen. Hoofdstuk 4 schetst opties om tot een klimaatneutrale zeescheepvaart te komen. We bespreken de energiedragers en aandrijflijnen die in beeld zijn voor verduurzaming en het potentieel van efficiëntieverbetering. Vervolgens presenteren we in hoofdstuk 5 paden naar klimaatneutrale zeescheepvaart in 2050. In hoofdstuk 6 bespreken we de bijbehorende uitdagingen, kansen en handelingsperspectieven voor beleid.

2 Trends in vervoersvolume en uitstoot broeikasgassen

Dit hoofdstuk schetst de huidige vervoersvolumes in de zeescheepvaart van en naar Nederland, de verwachte groei daarvan, de samenstelling van de vloot en de uitstoot van broeikasgassen door de mondiale, Europese en Nederlandse zeescheepvaart. Dit vormt het startpunt voor de verduurzamingsopgave waar de sector voor staat.

2.1 Vervoersvolumes in de zeescheepvaart

Groeiende op- en overslag van goederen in de Nederlandse zeehavens

De Nederlandse zeehavens waren de afgelopen jaren goed voor ca. 12 tot 14% van alle op- en overslag van goederen in Europa (Eurostat, 2023a) en ca. 47% van de op- en overslag in de Hamburg-Le-Havre range (KiM, 2022). Bijna de helft van alle goederen, die via Noordwest-Europa het continent binnenkomen, wordt dus in Nederland overgeslagen. Rotterdam is de grootste zeehaven van Europa en heeft een groot aandeel in het vervoer van olie en gas. Tabel 2.1 geeft voor het jaar 2019 een overzicht van de verhouding in goederen van de twee grootste Nederlandse havens, die van Amsterdam en Rotterdam⁶, tot het totaal van de top 20 grootste havens in de EU. Die aandelen lopen op van 14% bij *Roll-on Roll-off* (vervoer van lading op trailers en vrachtauto's) tot 36% bij de natte bulkgoederen (zoals ruwe olie, benzine, diesel en vloeibare chemicaliën) en droge bulkgoederen (zoals ijzererts, kolen, granen en biomassa).

Tabel 2.1

Bruto gewicht van belangrijkste categorieën goederen (x1000 ton)

	Natte bulk	Droge bulk	Containers	Roll-on Roll-off
Amsterdam	49.914	44.524	754	509
Rotterdam	207.365	70.612	127.902	3.875
Totaal top 20 havens EEA	708.857	316.264	668.130	31.348
Aandeel Amsterdam en Rotterdam	36%	36%	19%	14%

Bron: Eurostat (2019)

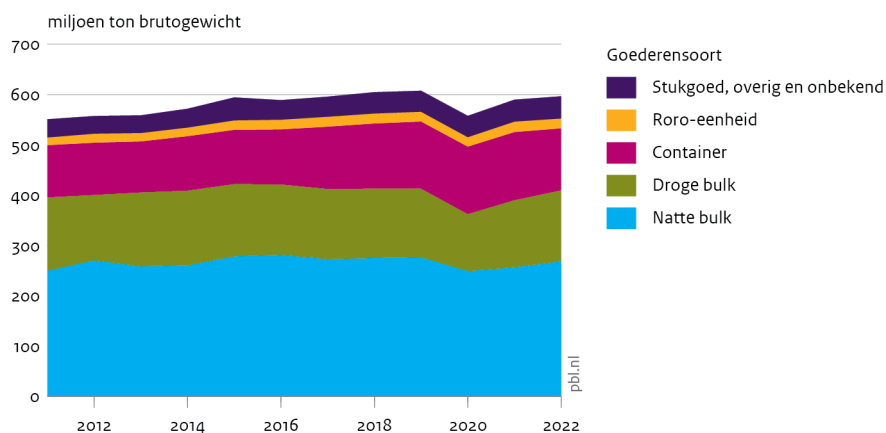
De op- en overslag van goederen in de Nederlandse zeehavens is tussen 2011 en 2019 gestaag toegenomen. De coronacrisis leidde in 2020 tot een terugval (KiM, 2021) maar in 2021 was sprake van een herstel. Bijna de helft van de op- en overslag in Nederland bestaat uit natte bulkproducten (Figuur 2.1). Containers en droge bulkgoederen zijn beiden goed voor grofweg 20 tot 25% van de op- en overslag in Nederland. *Roll-on Roll-off* (Ro-Ro) heeft een bescheiden aandeel van ca. 3%. De resterende 6 tot 8% bestaat uit stukgoed en overige goederen. Fossiele brandstoffen vormen momenteel een wezenlijk deel van de totale op- en overslag van goederen. Hun aandeel in de op- en

⁶ De havengebieden van Rotterdam en Amsterdam zijn goed voor respectievelijk ca. 76 en 16% van alle op- en overslag in de Nederlandse zeehavens.

overslag neemt de laatste jaren wel af. Dit hangt nauw samen met de op gang komende energietransitie in Nederland en Duitsland. Met name de op- en overslag van kolen daalde gestaag tussen 2014 en 2020 (maar groeide weer in 2021 en 2022 door beleidswijzigingen), maar ook de op- en overslag van minerale olieproducten laat een lichte krimp zien.

Figuur 2.1

Op- en overslag in de Nederlandse zeehavens



Bron: CBS

Mondiale groei vervoersvolumes verwacht tot 2050

De Internationale Maritieme Organisatie (IMO) van de VN verwacht dat de vervoersvolumes in de mondiale zeescheepvaart (in tonkilometers) van 2020 tot 2050 met 40 tot 100% zullen toenemen in scenario's waarin de opwarming van de aarde beperkt blijft tot ruim onder de twee graden (IMO, 2020). De IMO gebruikt voor haar groeiverwachtingen meerdere economische groeiscenario's, wat resulteert in de ruime bandbreedte aan groeiverwachtingen (ook methodische onzekerheden spelen hierin een rol). In de scenario's met stringent klimaatbeleid is sprake van een afnemend vervoer van olieproducten en kolen, maar dit wordt ruimschoots gecompenseerd door een groeiend vervoer van andere goederen (waaronder klimaatneutrale energiedragers). Deze groei is hoofdzakelijk het gevolg van de verwachte groei van de mondiale economie en de wereldbevolking.

Ontwikkeling op- en overslag in Nederlandse zeehavens is onzeker

De ontwikkeling van de op- en overslag in de Nederlandse zeehavens is onzeker. Het klimaatbeleid speelt ook hier een belangrijke rol. Bij vergaande klimaatambities zal een wezenlijk deel van het vervoer van ruwe aardolie en aardolieproducten wegvallen. Een deel van deze stromen zal worden vervangen door nieuwe stromen van (hernieuwbare) energiedragers zoals biomassa en biobrandstoffen en waterstofdragers zoals ammoniak. De mate waarin de terugval van het vervoer van fossiele energiedragers wordt gecompenseerd door nieuwe stromen energiedragers hangt sterk samen met ontwikkelingen in de industrie in Nederland en Duitsland en in het regionale energiesysteem en het tempo van de energietransitie. De transitie naar een circulaire economie is een andere factor die tot onzekere veranderingen leidt in de vraag naar op- en overslag in Nederlandse zeehavens.

In de referentieprognoses uit de Integrale mobiliteitsanalyse (IMA) van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat wordt voor de Nederlandse zeehavens tussen 2018 en 2050 een groei verwacht van de op- en overslag variërend tussen 20 en 55% (Dat.mobility & Districon, 2021).

Uitgangspunt voor deze prognoses zijn de WLO-scenario's uit 2015 (CPB & PBL, 2016). Deze scenario's zijn opgesteld voorafgaand aan de klimaatafspraken van Parijs en bevatten een minder verregaande klimaatambitie dan in Parijs is overeengekomen. In de IMA zijn de WLO-scenario's op dit punt aangepast om ze meer in de lijn te brengen met de huidige klimaatdoelen (IenW, 2020), maar de aanpassingen zijn nog niet in lijn met de doelen uit het Parijsakkoord.

Het Havenbedrijf Rotterdam heeft in 2022 vier wereldbeelden ontwikkeld en die vertaald naar de consequenties voor het havengebied Rotterdam (HbR, 2022). Belangrijke externe krachten in de wereldbeelden zijn de geopolitieke stabiliteit, het klimaatbeleid en de kosten van productie en transport. De ontwikkeling van de op- en overslag in de Rotterdamse Haven varieert binnen de wereldbeelden. In het wereldbeeld met goede mondiale samenwerking en stringent klimaatbeleid, resulterend in klimaatneutraliteit in 2050, groeit de op- en overslag tussen 2021 en 2050 met ca. 23%. De fossiele energiestromen vallen weliswaar grotendeels weg in dit scenario, maar dit wordt gecompenseerd door een groei van het containervervoer en het vervoer van hernieuwbare energiedragers. In de andere drie scenario's is sprake van een meer regionale focus en een minder stringent klimaatbeleid of later ingezette energietransitie. De ontwikkeling van de op- en overslag in die scenario's varieert tussen 14% krimp en 10% groei. Deze scenariostudie geeft dus een gematigder beeld van de ontwikkeling, zij het alleen voor de Rotterdamse haven (momenteel goed voor grofweg driekwart van de totale op- en overslag in Nederland) dan in de IMA/WLO.

Zeevaart speelt ook een rol in het personenvervoer

Naast de hoofdrol die de zeescheepvaart speelt in het goederenvervoer speelt de sector ook een rol in het vervoer van personen. Zo gingen er tot de coronacrisis in de EU jaarlijks zo'n 400 miljoen passagiers van en aan boord van zeeschepen (Eurostat, 2023b). De Nederlandse zeehavens leverden daar een kleine bijdrage aan met ca. 2 miljoen passagiers per jaar. Meer dan de helft van alle inkomende schepen in EU havens bestaat uit cruiseschepen en Ro-Ro passagiersschepen (EEA & EMSA, 2021). Deze Ro-Ro passagiersschepen varen vaak op vaste bestemmingen over relatief korte afstanden en kunnen per dag meermaals dezelfde haven aandoen. Hun aandeel in het aantal calls in havens is daardoor aanzienlijk groter dan hun aandeel in de uitstoot van broeikasgassen. Desalniettemin heeft dit segment ook een niet te verwaarlozen bijdrage in de uitstoot. Met name in de uitstoot van vaarten binnen de EU is het aandeel hoog.

2.2 Samenstelling vloot

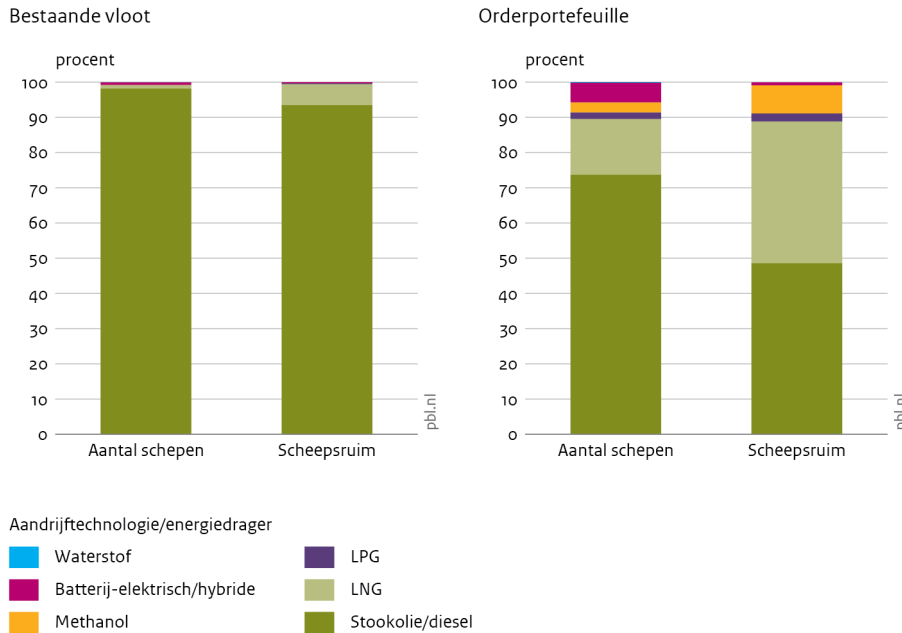
Van de huidige wereldvloot vaart ruim 98% op stookolie of dieselolie (Figuur 2.2). De resterende 2% bestaat uit schepen die (ook) op alternatieve brandstoffen kunnen varen. Ruim de helft daarvan vaart op LNG⁷. Omdat dit relatief grote schepen zijn, is hun aandeel in het totale scheepsruim (6%) een stuk groter dan hun aandeel in het aantal schepen (1%). Ongeveer 40% van de huidige schepen die varen met alternatieve brandstoffen wordt batterij-elektrisch of hybride aangedreven. Batterij-elektrische en hybride aandrijving wordt momenteel vooral in het *short-sea* segment

⁷ LNG wordt onder de alternatieve brandstoffen geschaard. Varen op LNG kan tot fors lagere uitstoot van zwavel, fijnstof en stikstof leiden in vergelijking met gebruik van stookolie of dieselolie. De klimaatwinst is echter onzeker. Weliswaar is de CO₂-uitstoot lager dan die van stookolie of scheepsdiesel, maar varen op LNG brengt het risico van methaanslip met zich mee. Dit kan de CO₂-winst grotendeels of (meer dan) volledig compenseren.

(kustvaart) toegepast, zoals bij ferry's. Het aandeel van deze schepen in het totale scheepsruim (en in het energiegebruik van de vloot) is een stuk kleiner dan het aandeel in de vloot. Het aantal schepen dat vaart op LPG, waterstof of methanol is zeer klein/ verwaarloosbaar (Figuur 2.2).

Figuur 2.2

Samenstelling mondiale vloot en orderportefeuille zeescheepvaart, medio 2023



Bron: DNV 2023b

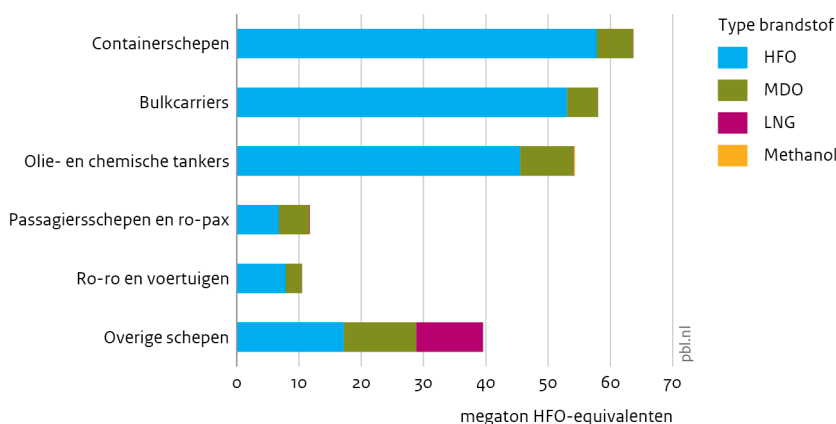
Nieuwe schepen steeds vaker op alternatieve brandstoffen

De nieuwe schepen die de afgelopen jaren zijn besteld zijn steeds vaker in staat om (ook) te varen op alternatieve brandstoffen. Van alle schepen die medio 2023 in aanbouw zijn, kan ruim 25% op alternatieve brandstoffen varen. In termen van scheepsruim is dit 52%. Het merendeel van deze schepen bestaat uit LNG-schepen, die relatief groot zijn en dus een groter aandeel hebben in het nieuwe scheepsruim dan in het aantal schepen (Figuur 2.2). Sinds kort zijn er ook schepen in de vaart die varen op methanol, maar hun aandeel in de vloot is verwaarloosbaar (kleiner dan 0,1%). Wel zijn er steeds meer methanol-schepen in aanbouw: methanoltechnologie begint voorbij de pilot- en demonstratiefase te komen richting commercialisatie (Rosenberg & Leitao, 2023). Ook dit zijn relatief grote schepen.

Hoewel de zeevaart een diverse sector is, zijn het de containerschepen, bulkschepen en olietankers die het overgrote deel van de wereldwijde brandstofconsumptie (en resulterende uitstoot van broeikasgassen) voor hun rekening nemen (Figuur 2.3). Dit komt door hun omvang, hun grote aantal binnen de wereldvloot en doordat ze lange afstanden varen. Met name bij de containerschepen en bulkschepen was de afgelopen jaren sprake van een forse schaalvergroting: nieuwe schepen worden steeds groter in vergelijking met eerdere generaties. De verwachting is dat deze trend doorzet (IMO, 2020), waardoor de groei van de vloot kleiner is dan de groei van het vervoersvolume.

Figuur 2.3

Brandstofverbruik mondiale vloot, 2018



Bron: IMO 2020

Lange levensduur zeeschepen kan transitie vertragen

Een belangrijke hindernis bij de verduurzaming van de zeevaartvloot is dat de huidige vloot een grote kapitaalpost vertegenwoordigt voor de scheepseigenaren. Dit hangt samen met de lange levensduur van schepen: de technische levensduur van schepen bedraagt zo'n 25 tot 30 jaar (IRENA, 2021), maar langere levensduren zijn geen uitzondering. De gemiddelde leeftijd van zeeschepen is toegenomen sinds 2011 en bedroeg in 2022 bijna 22 jaar (UNCTAD, 2022). Gemeten naar vervoerscapaciteit is dit gemiddelde overigens 11,5 jaar. Het zijn dus vooral de kleinere schepen die relatief oud zijn (Tabel 2.2). Hun aandeel in de vloot is veel groter dan hun aandeel in de vervoerscapaciteit (laadruim). Nieuwe schepen die de afgelopen jaren in de vaart zijn genomen, zijn gemiddeld steeds groter geworden (zie ook Tabel 2.2). Bulkcarriers zijn met een gemiddelde leeftijd van 11 jaar gemiddeld het jongst en ook containerschepen zijn relatief jong (13,7 jaar). General cargo schepen zijn gemiddeld 27 jaar oud en daarmee het oudst. De gemiddelde leeftijd van de vloot is mede toegenomen omdat scheepseigenaren investeringen in nieuwe schepen hebben uitgesteld vanwege onzekerheden in toekomstige energie- en CO₂-prijzen, regelgeving en technologische ontwikkelingen (UNCTAD, 2022). De komende jaren worden er veel nieuwe schepen in de vaart genomen.

Tabel 2.2

Leeftijd van mondiale vloot in 2020 per leeftijdscategorie per grootteklasse

	Klein (<500 GT)	Medium (500-25000 GT)	Groot (25000-60000 GT)	Zeergroot (>60000 GT)
Totaal aantal schepen	58.646	47.132	12.714	6.779
0-4 jaar oud	6,9%	9,5%	15,5%	21,9%
5-14 jaar oud	22,2%	34,2%	55,3%	55,2%
15-24 jaar oud	16,6%	18,5%	24,7%	20,4%
Meer dan 25 jaar oud	54,3%	37,9%	4,4%	2,5%

GT = Gross tonnage (bruto tonnage)

Bron: Equasis Statistics (2020)

Uit Tabel 2.2 blijkt dat bijna een kwart van de zeer grote schepen in 2020 jonger was dan 4 jaar en meer dan driekwart jonger was dan 15 jaar. Dat wil zeggen dat deze schepen tot ver in de jaren '30 en '40 in de vaart kunnen blijven. De lange levensduur van schepen leidt er toe dat vernieuwing van de vloot een langdurig proces is. Wel zijn er mogelijkheden om bestaande motoren te *retrofitten* zodat ze ook in staat zijn om op hernieuwbare brandstoffen te varen. En worden steeds meer nieuwe schepen uitgerust om op meerdere energiedragers te kunnen varen (zogenoemde *dual fuel* aandrijving) zodat ze in staat zijn om in de toekomst ook op bijvoorbeeld methanol te varen. Dit wordt in hoofdstuk 4 verder toegelicht.

2.3 Uitstoot van broeikasgassen

Deze paragraaf beschrijft de huidige uitstoot van broeikasgassen door de mondiale zeescheepvaart en de zeescheepvaart in, van en naar Nederland en de autonome ontwikkeling daarvan.

2.3.1 Huidige uitstoot van broeikasgassen

Zeescheepvaart goed voor 3% van mondiale uitstoot broeikasgassen

De mondiale uitstoot van de broeikasgassen CO₂, N₂O en CH₄ door de zeevaart bedroeg in 2018 bijna 1,1 gigaton CO₂-equivalenten (IMO, 2020). De zeescheepvaart was daarmee verantwoordelijk voor bijna 3 % van de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen. Ongeveer 70% van de uitstoot valt toe te schrijven aan de internationale zeevaart. Deze uitstoot valt niet onder de verantwoordelijkheid van landen. De resterende 30% heeft betrekking op binnenlandse vaarten en valt wel onder de verantwoordelijkheid van de betreffende landen. De uitstoot van broeikasgassen door de mondiale zeescheepvaart is tussen 1990 en 2008 meer dan verdubbeld als gevolg van de toename van de internationale handel (IMO, 2009). Na een dip in 2009 en 2010 als gevolg van de economische crisis is sinds 2011 weer sprake van groei van de uitstoot. Door efficiëntieverbeteringen gaat die groei minder snel dan voor de crisis. Tussen 2012 en 2018 is de uitstoot van de mondiale zeescheepvaart met 10% toegenomen.

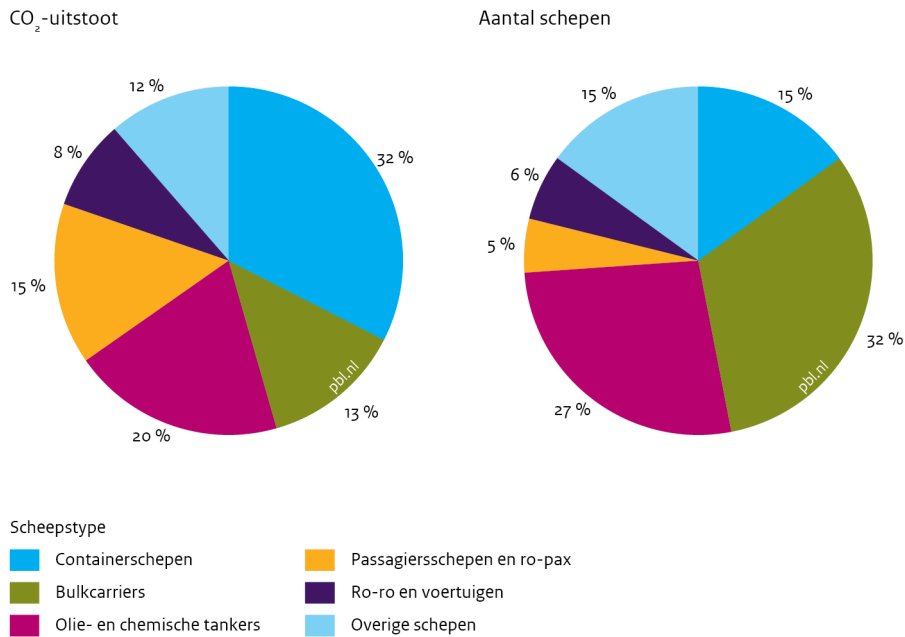
Containerschepen en tankers leveren grote bijdrage aan CO₂-uitstoot in EU

De CO₂-uitstoot van de schepen die in 2018 aanmeerden in Europese havens bedroeg in totaal 139 megaton⁸. Dit komt overeen met ca. 13% van de mondiale CO₂-uitstoot van de zeescheepvaart in dat jaar (Tabel 2.3). Van deze 139 megaton had 32% betrekking op vaarten binnen de EU en 6% op het aangemeerd liggen in de havens. De resterende 62% was gekoppeld aan vaarten van en naar de EU (EEA & EMSA, 2021). Containerschepen waren verantwoordelijk voor bijna een derde van de CO₂-uitstoot, terwijl ze maar 15% van het aantal binnenkomende schepen uitmaakten (Figuur 2.4). Containerschepen zijn de laatste decennia steeds groter geworden en varen over lange afstanden. Ook olietankers en chemische tankers (20%) en passagiersschepen en ro-pax (veerboten met passagiers, personenauto's) (15%) leverden een wezenlijke bijdrage aan de CO₂-uitstoot. In termen van aantallen schepen zijn juist bulkcarriers en tankers dominant. Het aantal passagiersschepen en ro-pax schepen is relatief klein in verhouding tot hun bijdrage aan de CO₂-uitstoot. Dit komt omdat deze schepen veelal op vaste routes binnen de EU varen.

⁸ Het betreft de CO₂-uitstoot van schepen met een bruto tonnage van 5000 of meer. Deze schepen zijn verplicht om het brandstofverbruik tijdens hun reis te registreren (zie paragraaf 3.2). Deze groep is goed voor ca. 90% van de totale CO₂-uitstoot van de zeevaart in de EU (EEA & EMSA, 2021).

Figuur 2.4

Verdeling CO₂-uitstoot en aantal schepen van de schepen die in 2018 EU havens aandeden



Bron: EEA & EMSA 2021

CO₂ is het dominante broeikasgas binnen de uitstoot van de zeescheepvaart

CO₂ is veruit het belangrijkste broeikasgas dat door de zeescheepvaart wordt geëmitteerd, met een aandeel van 98% in de totale uitstoot van broeikasgassen⁹. N₂O en CH₄ leveren een bescheiden bijdrage met een gecombineerd aandeel van 2% in het totaal (IMO, 2020). Naast de uitstoot van deze broeikasgassen levert de zeescheepvaart ook via de uitstoot van luchtverontreinigende stoffen als *black carbon* (roetdeeltjes), stikstofoxiden en zwaveldioxide een bijdrage aan klimaatverandering. De IMO (2020) schat dat de klimaatimpact van de zeescheepvaart in 2018 ca. 7% hoger was als ook het effect van *black carbon* wordt meegenomen. De uitstoot van stikstofoxiden en zwaveldioxide heeft juist een koelend effect.

De afgelopen jaren had de totale uitstoot van alle stoffen van de zeescheepvaart netto een koelend effect op de kortere termijn (tijdspanne van 10 jaar), als gevolg van de relatief hoge uitstoot van zwaveldioxide en stikstofoxiden. De klimaatimpact van deze stoffen is door hun aanzienlijk kortere levensduur in de atmosfeer echter van veel kortere aard dan die van CO₂. Op lange termijn (tijdspanne van 100 jaar) is het effect van CO₂ dominant en zorgde de uitstoot in de afgelopen tien jaar netto voor een opwarmend effect (Lund et al., 2020).¹⁰ Hoe dit zich naar de toekomst ontwikkelt

⁹ Berekend op basis van een *Global Warming Potential* (GWP) van 100 jaar.

¹⁰ Dit beeld is inmiddels gewijzigd door het aangescherpte beleid voor de uitstoot van zwaveldioxiden door de zeescheepvaart dat sinds 2020 mondiaal van kracht is. De uitstoot van zwaveldioxide is hierdoor wezenlijk lager geworden en daarmee ook het koelende effect van die uitstoot. Ook de uitstoot van stikstofoxiden wordt via beleid gereguleerd maar het duurt langer voordat dit effect doorwerkt in

hangt sterk samen met hoe de nieuwe regelgeving voor luchtverontreinigende stoffen en broeikasgassen eruit komt te zien en doorwerkt in de vloot. Het IPCC verwacht dat de strengere zwavelnormen voor de scheepvaart, die in 2020 in werking zijn getreden, tot een demping van het koelend effect leiden (IPCC, 2021).

Verschillende definities voor uitstoot Nederlandse zeescheepvaart

Er zijn verschillende manieren om de CO₂-uitstoot van de zeescheepvaart in Nederland in kaart te brengen. Schepen groter dan 5000 GT die van en naar Nederlandse havens varen, hadden in 2018 een CO₂-uitstoot van ca. 20 megaton (Tabel 2.3). Ongeveer 23% van deze uitstoot werd veroorzaakt door het vervoer van fossiele brandstoffen (olie, kolen en LNG). Deze 20 megaton is aanzienlijk lager dan de 33 megaton die voor het jaar 2018 door Nederland is gerapporteerd aan de VN (RIVM, 2023). Dat komt omdat landen, conform internationale afspraken onder de IPCC, de uitstoot van broeikasgassen door de zeevaart moeten rapporteren op basis van de hoeveelheid gebunkerde brandstoffen in het land. In Nederland wordt veel brandstof gebunkerd. Na Singapore is Rotterdam de belangrijkste bunkerhaven ter wereld. Veel van de brandstof die in Nederland wordt gebunkerd, wordt gebruikt op vaarten tussen havens in andere landen, daarom is de uitstoot die Nederland aan de VN rapporteert hoger dan wat er op vaarten van en naar Nederland wordt uitgestoten. Tabel 2.3 geeft een overzicht van de verschillende emissiedata, tevens in vergelijking met de wereldwijde en Europese uitstoot van de zeevaart.

De CO₂-uitstoot van de zeescheepvaart in de Nederlandse wateren bedroeg in 2018 5,1 megaton. Dit betreft de uitstoot van alle zeescheepvaartbewegingen op de Nederlandse binnenwateren en op het Nederlandse deel van de Noordzee (het Nederlands Continentaal Plat, NCP). Dit bevat ook vaarten die langs de Nederlandse kust gaan zonder een Nederlandse haven aan te doen en schepen die op de Westerschelde van en naar Antwerpen varen. Ook de emissies van voor anker liggende schepen zijn hierin opgenomen. Na Italië en Spanje is Nederland het derde land in Europa in termen van uitstoot van voor anker liggende schepen. In zowel Rotterdam, Amsterdam als Vlissingen zijn het olietankers die voor de meeste CO₂-uitstoot zorgen (Transport & Environment, 2022).

Tabel 2.3
CO₂-uitstoot van de zeevaart in 2018 binnen verschillende afbakeningen

	Megaton CO ₂
Zeevaart mondiaal	1.056
Zeevaart Europa	139
Bunkerverkoop vanuit Nederland	33
Schepen >5000 GT van en naar Nederland	20
Nederlandse wateren	5,1
Havenbewegingen in Nederland^{a)}	0,9

a) Het betreft de havenbewegingen en uitstoot van stilliggende schepen in Rotterdam, Amsterdam en Vlissingen

Bron: CBS Statline (2022), Europese Commissie (2021) & Transport & Environment (2022)

de vloot. Dit beleid voor reductie van zwaveldioxiden en stikstofoxiden leidt tot een schonere lucht en daarmee tot minder gezondheids- en natuurschade door luchtverontreiniging.

Nederland als tankstation van de internationale zeescheepvaart

Nederland, en in het bijzonder de haven van Rotterdam, is een grote speler in de mondiale bunkermarkt voor de zeescheepvaart. Rotterdam is de grootste bunkerhaven van Europa en behoort tot de grootste bunkerhavens ter wereld. Nederland had de afgelopen 10 jaar een marktaandeel van bijna 30% in de Europese bunkermarkt (EEA, 2022). Het aandeel in de op- en overslag van goederen varieerde in die periode tussen de 12 en 14% (Eurostat, 2023a). Nederland fungeert momenteel als grootste Europese tankstation voor de zeescheepvaart.

Er zijn verschillende factoren die van Rotterdam een aantrekkelijke bunkerlocatie maken (HCSS & CE Delft, 2023). Zo heeft de haven een grote raffinagesector waar veel olie wordt verwerkt. Mede hierdoor is er veel bunkerbrandstof beschikbaar. Import van olie is door de gunstige ligging van de haven ten opzichte van de Noordzee relatief goedkoop. Van oudsher kwam er door de nabijheid van Rusland veel Russische olie en scheepsbrandstof naar Rotterdam. Tevens heeft Rotterdam moderne en efficiënte bunkerfaciliteiten en er is sprake van schaalvoordelen door de omvang van de haven en de resulterende grote vraag naar bunkerbrandstoffen. Dit maakt dat er in Nederland bijna net zoveel brandstof wordt geleverd aan de zeescheepvaart als aan de binnenlandse mobiliteit. In bijna alle andere Europese landen gaat er veel meer brandstof naar binnenlandse mobiliteit dan naar de zeevaart (EEA, 2022).

Aandeel Nederland in bunkermarkt neemt af

Figuur 2.5 toont de trend in de CO₂-uitstoot van de zeescheepvaart op de Nederlandse wateren tussen 1990 en 2021. Ook toont de figuur de trend in de CO₂-uitstoot die voortkomt uit de in Nederland gebunkerde brandstof, zoals die jaarlijks aan de VN wordt gerapporteerd. Ondanks dat de aan de VN gerapporteerde uitstoot een factor 5 tot 6 hoger ligt dan de uitstoot op de Nederlandse wateren, was de trend voor beiden vergelijkbaar tussen 1990 en 2005. Vanaf 2006 tot 2012 laten beide reeksen een daling zien. Sinds 2012 lopen de trends uiteen. Waar de CO₂-uitstoot op de Nederlandse wateren met 11% is toegenomen tussen 2012 en 2021, nam de CO₂-uitstoot uit de gebunkerde brandstoffen met 19% af. Zoals in paragraaf 2.1 is beschreven, groeide ook de op- en overslag van goederen in de Nederlandse zeehavens tussen 2012 en 2021. Het marktaandeel van de Nederlandse zeehavens in de bunkering van scheepsbrandstoffen is kortom afgenomen sinds 2012. Het is bij de auteurs van deze studie niet bekend wat daarvan de oorzaken zijn. Sinds 2018 lijkt de bunkering van scheepsbrandstoffen in Nederland weer te stabiliseren.

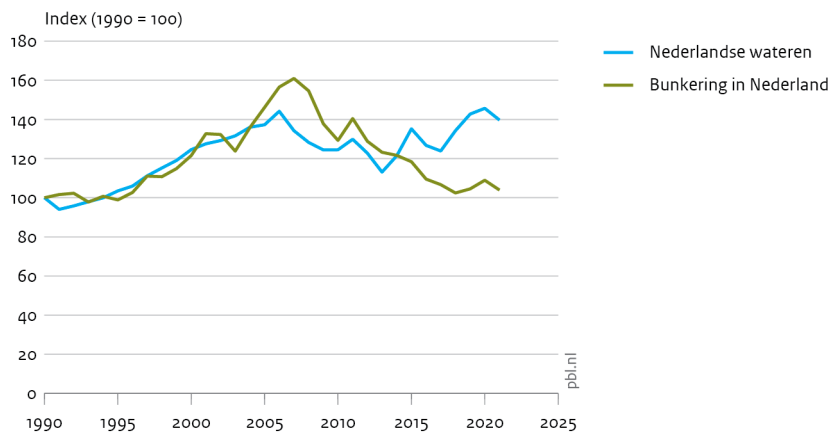
Bunkering van biobrandstoffen en LNG neemt toe

Het overgrote deel van de in Nederland gebunkerde brandstof door de zeescheepvaart bestaat momenteel uit stookolie (HFO: *heavy fuel oil*), scheepsdiesel (MGO: *marine gas oil*) of een mix daarvan (MDO: *marine diesel oil*). Wel is er de afgelopen jaren steeds meer biobrandstof en LNG gebunkerd. De bunkering van biobrandstoffen is toegenomen van 0,7 petajoule in 2018 tot ruim 18 petajoule in 2022. Daarmee waren biobrandstoffen in 2022 goed voor ruim 3% van de totale afzet van brandstoffen aan de zeevaart (CBS, 2023). De toegenomen inzet van biobrandstoffen aan de zeevaart is mede het gevolg van de Nederlandse regelgeving voor inzet van hernieuwbare energie in vervoer (die weer voortvloeit uit de Europese richtlijn voor hernieuwbare energie, zie paragraaf 3.2). De huidige regelgeving verplicht leveranciers van brandstoffen aan het wegverkeer om een oplopend minimaal aandeel hernieuwbare energie te leveren. Zij kunnen deze verplichting deels invullen door levering van brandstoffen aan de zeevaart. Hoewel levering van hernieuwbare energie aan de zeevaart dus (nog) niet verplicht is (zie ook hoofdstuk 3), gebeurt dit in de praktijk al wel. Sinds 2021 worden alleen de leveringen van geavanceerde biobrandstoffen nog meegeteld onder de

verplichting. Als gevolg hiervan is er de afgelopen twee jaar relatief veel geavanceerde biobrandstof aan de zeescheepvaart geleverd (NEa, 2023). De bunkering van LNG door de zeescheepvaart is toegenomen van 0,2 PJ in 2017 naar 5 PJ in 2021 (CBS, 2023). Mede door de hoge aardgasprijzen daalde de bunkering in 2022 naar 3 PJ.

Figuur 2.5

CO₂-uitstoot zeescheepvaart



Bron: Emissieregistratie

2.3.2 Autonome ontwikkeling uitstoot broeikasgassen

De uitstoot van broeikasgassen door de zeescheepvaart zal zonder beleidsintensivering¹¹ waarschijnlijk blijven toenemen, zowel in Nederland als op mondiale schaal. Schepen worden naar verwachting steeds efficiënter, maar daar staat een groei van de vervoersvolumes tegenover die er per saldo toe leidt dat het energiegebruik van de zeescheepvaart (licht) toeneemt.

Mondiale uitstoot neemt naar verwachting licht toe

De IMO verwacht in zijn vierde broeikasgasstudie uit 2020 dat de CO₂-uitstoot van de mondiale zeescheepvaart tussen 2018 en 2050 licht groeit. Afhankelijk van het scenario voor economische groei en bevolkingsgroei dat wordt gehanteerd varieert die groei tussen enkele procenten en 30% (IMO, 2020). De groei wordt verklaard door verschillende trends. Enerzijds neemt de gemiddelde grootte van met name containerschepen, bulkcarriers en gastankers naar verwachting verder toe, waardoor de CO₂-uitstoot per tonmijl afneemt. Het vervoer wordt dus efficiënter. Ook neemt het vervoer van fossiele brandstoffen geleidelijk af. Anderzijds wordt bij de droge bulkgoederen en containers een sterke groei verwacht van het vervoer, waardoor per saldo tot 2050 een lichte stijging van de uitstoot wordt verwacht zonder beleidsintensivering (IMO, 2020).

Klimaatdoelen vereisen ombuiging emissietrend zeescheepvaart

Ook MMMCZCS (2021) verwacht dat de CO₂-uitstoot van de zeevaart zonder beleidsintensivering licht zal toenemen tot 2050. Dit pad gaat uit van verdere efficiëntiewinst, en de nu voorziene daling

¹¹ Het nieuwe Europese beleid voor verduurzaming van de zeevaart dat in paragraaf 3.2 wordt toegelicht is hierbij nog niet meegenomen.

van de kostprijs van alternatieven, wat uiteindelijk leidt tot 1% niet-fossiele brandstof in 2050. In dezelfde studie is ook in kaart gebracht hoe de uitstoot van de zeescheepvaart zich zou moeten ontwikkelen om in lijn te zijn met het 1,5- of 2-gradendoel. Om in lijn te zijn met het Parijsakkoord is in de komende jaren al een forse afname nodig van de uitstoot, die na 2030 doorzet. Voor het 1,5-gradendoel zou de uitstoot van broeikasgassen door de mondiale zeescheepvaart in 2050 nihil moeten zijn. Voor de 1,5- en 2-graden scenario's is verondersteld dat de emissiereductie van de zeescheepvaart in hetzelfde tempo moet plaatsvinden als in de rest van de economie.

Het IPCC (2022) laat zien dat in veel scenariostudies met internationale klimaatmodellen (zogenoemde *Integrated Assessment Models*, IAMs) de uitstoot van de zeevaart wel fors moet worden teruggebracht om het 1,5- of 2-gradendoel te halen, maar niet per definitie tot nul. De emissiereductie voor de mondiale zeevaart varieert in deze scenariostudies tussen 33 en 70% in 2050 ten opzichte van het niveau in 2020 (IPCC, 2022). Deze klimaatmodellen maken gebruik van kostenoptimalisatie om te kijken welke technologieën nodig zijn om de uitstoot van broeikasgassen dusdanig terug te dringen dat met een bepaalde mate van zekerheid kan worden gesteld dat specifieke klimaatdoelen worden gehaald. Kanttekening hierbij is dat de zeescheepvaart in veel klimaatmodellen niet goed is vertegenwoordigd (PBL, 2020). Zo ontbreekt het aan een goed beeld van het energiegebruik en de emissies van de nationale en internationale zeescheepvaart en zijn maatregelen om de energie-efficiëntie van het vervoer te verbeteren niet of nauwelijks meegenomen. Het is dus de vraag welke emissiereducties in de zeescheepvaart passen bij kostenoptimale paden in lijn met de Parijsafspraken. Los van kostenoptimalisatie zijn er ook andere redenen zijn om vergaande emissiereductie in de zeescheepvaart (en andere *hard to abate* sectoren) na te streven, zoals de onzekerheid rond de grootschalige toepassing van CO₂ vastlegging die nodig zou zijn om resterende emissies in deze sectoren te compenseren en netto toch op nul uit te komen (Edelenbosch et al., 2022). Welk emissiereductiepad van de zeevaart past bij de Parijsafspraken hangt kortom samen met welke criteria worden gebruikt om de bijdrage van verschillende sectoren aan het realiseren van die afspraken te bepalen en de data en kennis over reductiemogelijkheden in de sector.

Ontwikkeling bunkerafzet en uitstoot broeikasgassen volgens de KEV

In de KEV 2022 is de ontwikkeling geraamd van de afzet van bunkerbrandstoffen in Nederland en de resulterende uitstoot van broeikasgassen tot 2040. In deze ramingen is echter het nieuwe Europese beleidspakket (paragraaf 3.2) nog niet verwerkt. Zonder dit beleid verwacht de KEV een min of meer stabiele energievraag en uitstoot van broeikasgassen tot 2040. De KEV verwacht wel een verandering van de brandstofmix als gevolg van de strengere zwavelnormen die vanaf 2020 gelden. Het gebruik van LNG groeit relatief snel, maar de mate waarin is onzeker. In de KEV is de afzet van LNG in 2030 geraamd op 30 petajoule (7 % van het totale bunkervolume). In de KEV 2022 worden geen ramingen gepresenteerd van de uitstoot van broeikasgassen op Nederlands grondgebied of van schepen die van of naar Nederlandse havens varen.

3 Beleid voor verduurzaming van de zeescheepvaart

De internationale scheepvaart is een wereldwijd opererende sector en wordt gekarakteriseerd door een hoge kapitaalintensiviteit en grote diversiteit aan schepen. Vanwege de internationale aard van de sector wordt regulering over het algemeen niet als nationale aangelegenheid gezien. Dit hoofdstuk schetst het huidige beleid van de VN (IMO), de EU en Nederland voor verduurzaming van de zeescheepvaart.

3.1 Mondiaal beleid

Wereldwijd faciliteert de Internationale Maritieme Organisatie (IMO) van de VN het reguleren van de zeescheepvaart. Dit gebeurt als akkoord tussen de lidstaten in de vorm van verdragen. De IMO heeft zichzelf in haar klimaatstrategie van 2023 ten doel gesteld om rond 2050 (“*by and around, i.e. close to 2050*”) de netto-broeikasgasuitstoot van de zeescheepvaart tot nul te reduceren. Onderweg daarnaartoe zijn er indicatieve *checkpoints* om in 2030 de broeikasgasemissies met ten minste 20% te hebben verminderd (met een streven naar 30%) ten opzichte van het niveau in 2008¹², en in 2040 met ten minste 70% (streefwaarde 80%). Ook heeft de IMO het doel om in 2030 ten minste 5% (streefwaarde 10%) van de energiebehoefte van de zeevaart te vervullen door brandstoffen of technologieën die geen broeikasgassen uitstoten (IMO, 2023a).

De IMO heeft de afgelopen jaren verschillende juridisch bindende instrumenten geïntroduceerd om de CO₂-uitstoot van de zeescheepvaart terug te brengen. De focus lag daarbij tot nu toe sterk op het verbeteren van de energie-efficiëntie van schepen. De instrumenten richten zich zowel op het ontwerp van het schip als op de inzet. Begin 2023 is dit beleid aangescherpt, wat van wezenlijke invloed gaat zijn op het ontwerp en het gebruik van zeeschepen in de komende jaren (DNV, 2023b). Het gaat daarbij onder andere om:

- De *Energy Efficiency Design Index* (EEDI) reguleert de technische energie-efficiëntie van nieuwe schepen. Doel is om het gebruik van efficiënte aandrijflijnen en scheepsontwerpen te stimuleren. Schepen moeten aan een minimale standaard voldoen voor energie-efficiëntie die periodiek wordt aangescherpt. Momenteel geldt fase 2 van de EEDI waarin nieuwe schepen worden verplicht om bouwtechnisch ten minste 20% efficiënter te zijn ten opzichte van schepen uit de periode 2000-2010. Fase 3 wordt in 2025 van kracht en vereist een reductie van 30%.
- Het *Ship Energy Efficiency Management Plan* (SEEMP) reguleert de energie-efficiëntie van de inzet van de schepen, waaronder vaarsnelheden en logistieke maatregelen. Dit instrument is tegelijk met de EEDI geïntroduceerd. Alle schepen groter dan 400 GT moeten een plan aan boord hebben.

¹² De uitstoot van broeikasgassen van de mondiale zeescheepvaart is tussen 1990 en 2008 grofweg verdubbeld (IMO, 2020). De klimaatdoelen, die de VN, de EU en Nederland zichzelf stellen, gebruiken 1990 als basisjaar. Zo wil Nederland de uitstoot van broeikasgassen in 2030 met ten minste 55% reduceren ten opzichte van 1990.

- De *Energy Efficiency eXisting Ship Index* (EEXI) reguleert de technische energie-efficiëntie van bestaande schepen. Dit instrument is in 2023 in werking getreden. De EEXI wordt op een soortgelijke manier berekend als de EEDI, met als voornaamste verschil dat de EEDI in een proef op zee wordt geverifieerd en de EEXI niet. Bij de eerste periodieke survey na 1 januari 2023 moet de EEXI van bestaande schepen minstens even goed zijn als de limiet van fase 2 van de EEDI van nieuwe schepen. Schepen kunnen dit bereiken door technische verbeteringen of door hun motorvermogen te beperken. Ongeveer twee derde van de mondiale vloot van tankers en bulk carriers voldoet al aan de nieuwe regelgeving. Het resterende deel zal maatregelen moeten nemen om aan de norm te voldoen (UNCTAD, 2022).
- De *Carbon Intensity Indicator* (CII) scoort zeeschepen op hun energie-efficiëntie in de vorm van een energielabel (A t/m E). Dit label wordt bepaald door de jaarlijkse CO₂-uitstoot, afgezet tegen de capaciteit en afgelegde afstand, te vergelijken met die van een referentieschip. Presteert een schip drie jaar op rij lager dan klasse D, of één jaar in klasse E, dan moet de reder een plan maken om efficiënter te gaan opereren. Dat kan bijvoorbeeld door technische maatregelen te nemen zoals een geoptimaliseerde schroef of een betere stroomlijn, maar ook door operationele maatregelen zoals de inzet van het schip, aanpassing van de vaarsnelheid, gebruik van walstroom of alternatieve brandstoffen of trimoptimalisatie. Op basis van data uit 2021 zou 31% van de containerschepen en 36% van de bulk carriers een D- of E-label krijgen en dus maatregelen moeten nemen om efficiënter te varen (UNCTAD, 2022).

Alle schepen boven de 5000 bruto tonnage (GT) moeten aan deze vier bovenstaande IMO-regels voldoen. De verplichting tot handhaving ligt bij vlaggenstaten, maar havenstaten mogen inspecteren en indien nodig handhaven. Handhaving heeft wel alleen betrekking op het plan voor het schip om aan de regelgeving te voldoen en niet op de uitvoering ervan.

Om de nieuwe doelen van de 2023 broeikasgasstrategie te bereiken, werkt de IMO aan een combinatie van maatregelen die in 2025 aangenomen moeten worden (IMO, 2023a). Die combinatie bestaat uit:

- Een norm die de broeikasgasintensiteit van scheepsbrandstoffen geleidelijk vermindert, voortvloeiend uit de CII; en
- Een prijzingsmechanisme voor broeikasgasemissies.

Naast doelen en verplichtingen voor de energie-efficiëntie en CO₂-emissies heeft de IMO ook mondiale normen opgesteld voor de uitstoot van zwavel door de scheepvaart. Sinds begin 2020 moeten alle schepen verplicht gebruikmaken van laagzwavelige stookolie of dieselolie of van rookgasreiniging (zogenoemde scrubbers) om de uitstoot van zwavel te verminderen. In bepaalde gebieden, zoals de Noordzee, gelden strengere normen voor de zwaveluitstoot. Deze normen leiden niet alleen tot minder SO₂-emissies, maar reduceren ook de uitstoot van fijnstof. Ook voor de NO_x-uitstoot van zeeschepen gelden mondiale normen. En ook hier geldt dat op bepaalde zeeën zoals de Noordzee (zogenoemde Nitrogen Emission Control Areas (NECA)) strengere normen van kracht zijn (de zogeheten Tier-III emissienormen). In tegenstelling tot de zwavelnormen, die voor alle schepen gelden, gelden de NO_x-normen alleen voor nieuwe schepen die vanaf een bepaald moment in de vloot komen (zie ook TNO, 2023). Deze normen zijn primair bedoeld om luchtverontreiniging te reduceren maar hebben ook invloed op de klimaatimpact van de zeevaart (zie paragraaf 2.3) en beïnvloeden mede de technologiekeuzes.

Besluitvormingsproces binnen de IMO

De IMO is (onder meer) verantwoordelijk voor het mondiale milieu- en klimaatbeleid voor de zeescheepvaart en is daarmee een cruciale organisatie in de verduurzaming van de zeescheepvaart. De IMO heeft 175 lidstaten, die gezamenlijk beslissen over nieuwe regelgeving. Naast de lidstaten zijn er medio 2023 66 intergouvernementele organisaties met *observer status* en 88 niet-gouvernementele organisaties met *consultative status*. De eerste groep bevat onder andere de Europese Commissie. De tweede groep bevat onder andere onderzoeksinstituten en belangenorganisaties voor de zeescheepvaart en voor het milieu.

Nieuwe regelgeving wordt voorbereid in één van de vijf comités, waaronder een comité dat zich bezighoudt met milieubeleid. Besluiten worden genomen door de vergadering van de landen. Nieuwe verdragen treden pas in werking als een minimaal aantal lidstaten, dat een vooraf bepaald deel van de mondiale vloot (in tonnage) vertegenwoordigt, het verdrag heeft geratificeerd. Dit ratificeringsproces kan lang duren en ingewikkeld zijn (EPRS, 2016). De meeste nieuwe regelgeving wordt echter als een aanpassing van een bestaand verdrag geregeld. In dat geval geldt alleen de eis dat een meerderheid van de lidstaten die het verdrag hebben geratificeerd instemt met de aanpassing. Het naleven van de regelgeving is de verantwoordelijkheid van de lidstaten. Als vlaggenstaat hebben landen de verantwoordelijkheid voor het naleven van de regelgeving op de schepen die onder hun vlag varen. En als havenstaat kunnen landen de naleving van bepaalde regels door bezoekende schepen handhaven.

Vanwege de cruciale rol die de IMO speelt in de regulering van de mondiale zeescheepvaart is er relatief veel onderzoek gedaan naar de besluitvormingsprocessen binnen de IMO. Alle *stakeholders* kunnen bijdragen aan het besluitvormingsproces van de IMO, maar in de praktijk is er een kleine groep landen en belangenorganisaties die een relatief grote bijdrage levert aan de voorbereiding van nieuwe regelgeving. Cariou & Randrianarisoa (2023) concluderen dat het vooral de ontwikkelde landen met gevestigde belangen in de zeevaart en de vertegenwoordigers vanuit de industrie zijn die veel voorstellen indienen. De IMO zou volgens de auteurs juist de participatie van een bredere groep aan lidstaten en organisaties, met name ook de staten die het meest kwetsbaar zijn voor klimaatverandering, moeten aanmoedigen om hieraan tegenwicht te bieden. Prehn (2021) brengt hier tegenin dat de grotere landen en de industrie niet perse hun stempel hebben weten te drukken op de uitkomst van de onderhandelingen over de klimaatstrategie van de IMO uit 2018.

Bach en Hansen (2023) hebben onderzocht waarom de klimaatambities van de IMO tot 2022 bescheiden waren in het licht van de Parijsafspraken en waarom het tot op heden nog niet is gelukt om de ambities te vertalen in concrete beleidsinstrumenten. Zij identificeren drie oorzaken: 1) een gebrek aan capaciteit binnen de IMO om de verschillende opkomende technologieën te reguleren (waaronder bijvoorbeeld het opstellen van veiligheidsprotocollen), 2) onzekerheid over het mandaat van de IMO, bijvoorbeeld waar het gaat om financiering van R&D-projecten en 3) een gebrek aan politieke consensus over het ambitieniveau en het type beleidsinstrumenten dat ingezet zou moeten worden. Deze punten spelen volgens de auteurs een cruciale rol bij het formuleren van nieuwe klimaatplannen.

3.2 Europees beleid

In de EU is sinds 2015 de MRV-verordening (Monitoring, Rapportage & Verificatie) van kracht. Deze verordening verplicht de sector om de CO₂-uitstoot en andere relevante informatie bij te houden. De verordening heeft betrekking op schepen boven de 5000 bruto tonnage en op vaarten van, tussen en naar de EU en EEA. De MRV-informatie is beschikbaar via Eurostat en biedt een gegevensbasis voor verdere beleidsvorming.

Voortbouwend op de EU MRV zijn in 2023 vier maatregelen aangenomen om de zeescheepvaart van, naar en binnen de EU verder te verduurzamen, als onderdeel van het Fit-for-55 pakket:

1. *FuelEU Maritime*: De broeikasgasintensiteit op vaarten van en naar Europese havens wordt stapsgewijs verminderd. Container- en passagiersschepen binnen de scope moeten verplicht walstroom gaan gebruiken vanaf 2030. Havens worden verplicht om hiervoor de faciliteiten aan te bieden.
2. *Herziening EU-ETS*: Zeescheepvaart komt in het EU ETS;
3. *Renewable Energy Directive*: De broeikasgasintensiteit van de brandstoffen die in Europa geleverd worden aan de transportsector, inclusief de zeevaart, moet in 2030 met 14,5% zijn afgenomen ten opzichte van de fossiele referentiebrandstof (of 29% van het totaal energiegebruik in de transportsector moet hernieuwbaar zijn).
4. *Alternative Fuels Infrastructure Regulation (AFIR)*: de AFIR verplicht havens om walstroom aan te bieden.

Daarnaast heeft de EU voorgesteld om een minimumaccijns te introduceren voor scheepsbrandstoffen. Hierover werd medio 2023 nog onderhandeld.

FuelEU Maritime

Met *FuelEU Maritime* wordt een emissiereductieverplichting over de hele brandstofketen geïntroduceerd voor de uitstoot van CO₂, N₂O en CH₄. De verplichting geldt voor vracht- en passagiersschepen met een gewicht van 5000 bruto tonnage of meer. De verplichting is van toepassing op schepen die varen tussen (en binnen) EU havens en voor de helft van de vaart voor uitgaande of inkomende schepen van buiten de EU. De emissiereductieverplichting loopt op tot 2050 (Tabel 3.1). Het is mogelijk om krediet op te bouwen in periodes dat de daadwerkelijke uitstoot lager is dan de verplichting en dit krediet in te zetten in jaren daarna. Ook bestaat de mogelijkheid voor het samenbrengen van verplichtingen voor verschillende schepen waardoor het aantrekkelijk wordt om de doelstelling te halen door middel van een (pilot) nulmissie schip, gesteund door alle partijen met een verplichting. *FuelEU Maritime* bevat ook een verplichting voor container- en passagiersschepen om vanaf 2030 gebruik te maken van walstroom. Daarnaast is er een bepaling opgenomen voor minimaal 2% RFNBO's in 2034 (*Renewable fuels of non-biological origin*).

Tabel 3.1

CO₂-reductieverplichting uit *FuelEU Maritime* voor de broeikasgasintensiteit van scheepsbrandstof

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Reductie	2%	6%	14,5%	31%	62%	80%
g CO₂-eq/MJ^{a)}	89,3	85,7	77,9	62,9	34,6	18,2

a) Gebaseerd op een referentiewaarde van 91,16 g/MJ, die overeenkomt met de voor de vloot gemiddelde broeikasgasintensiteit van het energiegebruik aan boord in 2020

Zeevaart in het EU ETS

Een onderdeel van de herziening van het ETS is om zeevaart van en naar EU-havens vanaf 2024 op te nemen in het emissiehandelssysteem. Hiervoor wordt eenmalig het totaal aantal emissierechten verhoogd met 79 miljoen ton. Vervolgens zorgt een reductie van 4,2% per jaar voor een geleidelijke afname van het aantal beschikbare rechten. De scheepvaart krijgt geen gratis rechten maar er is een overgangsfase tussen 2024 en 2026 waarin een oplopend aandeel van de uitstoot onder het ETS valt. Vanaf 2026 wordt niet alleen de uitstoot van CO₂ opgenomen, maar ook die van CH₄ en N₂O. Aangezien emissiereductie in de zeevaart in de eerste jaren erg duur zal zijn, zal opname van de zeevaart in ETS waarschijnlijk in eerste instantie vooral leiden tot extra emissiereductie in andere sectoren, waarbij de zeevaart de CO₂-rechten koopt.

Scheepsbrandstoffen in de Richtlijn Hernieuwbare Energie

De herziene Richtlijn hernieuwbare energie (Renewable Energy Directive, RED) bevat een verbreding van de reikwijdte van de transportdoelstelling voor hernieuwbare energie. In de huidige richtlijn (de REDII) wordt alleen de inzet van hernieuwbare energie in weg- en railtransport gereguleerd. In de herziene richtlijn (de REDIII) wordt de verplichting voor inzet van hernieuwbare energie in vervoer uitgebreid naar de volledige transportsector, inclusief de levering van bunkerbrandstoffen aan de zeescheepvaart. Voor Nederland is dit zeer relevant aangezien rond de 60% van de brandstofafzet aan de transportsector in Nederland voor de rekening van bunkers komt (PBL et al., 2022). De doelstelling voor 2030 is een reductie van 14,5% van de broeikasgasintensiteit ten opzichte van de fossiele referentiebrandstof, uit te voeren door de brandstofleveranciers. Lidstaten kunnen als alternatief verplicht stellen dat 29% van het finale energiegebruik in de transportsector uit duurzame bronnen komt. Naast de transportdoelstelling bevat de REDIII ook een subdoel voor het gebruik van hernieuwbare brandstoffen van niet-biologische oorsprong (RFNBO's). Het streefdoel voor deze brandstoffen is 1% in 2030 als aandeel van de geleverde energie aan transport. Dit subdoel mag ook worden ingevuld met RFNBO's die als tussenproduct worden ingezet bij de productie van conventionele brandstoffen (zoals waterstof in raffinage). De REDIII-doelstellingen kunnen negatief uitpakken voor de concurrentiepositie van Europese bunkerhavens als de brandstofleveranciers hun additionele kosten voor hernieuwbare brandstoffen gaan doorberekenen in hun producten. Doordat zeeschepen zeer lange afstanden kunnen afleggen zonder te tanken is de bunkermarkt mondiaal en is de prijs vrijwel het enige concurrentie criterium.

Infrastructuur voor walstroom en alternatieve brandstoffen

Het voorstel is om de Europese wetgeving voor alternatieve brandstofinfrastructuur te veranderen van Richtlijn (AFID) naar Verordening (AFIR), waardoor het direct juridisch effect krijgt binnen lidstaten en de uitvoering in de gehele Unie consistent kan worden nageleefd. De AFIR stelt dat er in 2025 een LNG-netwerk beschikbaar moet zijn in zeehavens. In 2024 dient er ook een nationaal plan te worden opgesteld waarin wordt uitgewerkt hoe infrastructuur voor alternatieve brandstoffen voor de zeescheepvaart, waaronder waterstof en ammoniak, geïmplementeerd gaat worden. Voor passagiers- en containerschepen moet er vanaf 2030 walstroom beschikbaar zijn om aan 90% van de energievraag te voldoen in alle TEN-T havens waar jaarlijks meer dan 25 passagiersschepen of 50 containerschepen van minimaal 5000 GT aanmeren.

Richtlijn energiebelasting

De Richtlijn energiebelasting (Energy Taxation Directive, ETD) stelt minimum belastingtarieven vast voor energie. Het voorstel voor herziening van deze richtlijn weerspiegelt de ambitie om fossiele en andere niet duurzame brandstoffen een belastingnadeel te geven. Het voorstel erkent het risico op bunkeren buiten de EU ten gevolge van een verhoging van de belastingtarieven en biedt derhalve

de mogelijkheid om bunkerbrandstoffen voor vaarten buiten de EU uit te zonderen van de maatregelen. De ETD tracht duurzame alternatieve brandstoffen, zoals duurzame biobrandstoffen en koolstofarme brandstoffen, te stimuleren voor alle vormen van vervoer over water en stelt derhalve voor die brandstoffen een minimumtarief van nul voor de periode 2023-2033.

Effecten van het nieuwe Europese beleid

Het is waarschijnlijk dat het Fit-for-55 pakket twee effecten zal sorteren richting 2030: ten eerste een (lichte) afname van emissies op vaarten van en naar Nederlandse havens, voornamelijk ten gevolge van een stijging van de inzet van LNG. Dit effect wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door de invloed van FuelEU Maritime en het ETS, waarbij geldt hoe hoger de ETS prijs, hoe interessanter het wordt om te investeren in emissiereductie. LNG is een relatief goedkope alternatieve brandstof en biedt voldoende emissiereductie voor de initiële doelen. Ten tweede bestaat er een grote kans dat de omvangrijke bunkerfunctie die vooral Rotterdam – als tweede bunkerhaven ter wereld – vervult, in het gedrang komt. De REDIII zal er waarschijnlijk toe leiden dat de prijzen voor in de EU gebunkerde brandstoffen zullen stijgen, al is dat afhankelijk van hoe Nederland de doelstelling voor de transportsector verdeelt over modaliteiten. Elke brandstofleverancier dient een vermindering van de broeikasgasintensiteit te realiseren, wat extra kosten met zich meebrengt. Daarnaast is op het moment van bunkeren niet altijd duidelijk of een schip bunkert voor intra-EU, extra-EU of beide, waardoor het risico bestaat dat de energiebelasting ook op extra-EU bunkeringen zal worden geheven. Door de uitzonderlijke bunkerfunctie van Nederland kan er een aanzienlijke afname van de bunkervolumes plaatsvinden, zonder dat dit mondiaal tot minder brandstofverbruik leidt.

De AFIR heeft een ondersteunende functie en schept met name voorwaarden voor walstroom en LNG. De AFIR heeft in de huidige vorm nauwelijks concreet effect op het ondersteunen van infrastructuur voor nul-emissie brandstoffen in de zeevaart (CE Delft, 2022b).

EU Taxonomie regelgeving voor duurzame investeringen

Naast bovenstaand beleidskader voor verduurzaming van de zeevaart zelf wil de EU groene investeringen faciliteren via de *Sustainable Finance Disclosure Regulation* (SFDR) en de EU taxonomie. De SFDR verplicht financiële marktpartijen ertoe informatie te verstrekken over de duurzaamheid van hun investeringen. Zij moeten rapporteren in hoeverre hun beleggingen voldoen aan de EU taxonomie, een classificatiesysteem dat aangeeft of een economische activiteit in lijn is met het doel voor klimaatneutraliteit in 2050. Om hiermee in lijn te zijn moet een belegging substantieel bijdragen aan het tegengaan van klimaatverandering (klimaatmitigatie), klimaatadaptatie of doelen rond water, circulariteit, vervuilingpreventie of biodiversiteit. Voor zeevaart geldt dit bijvoorbeeld voor investeringen in aanschaf en gebruik van schepen zonder CO₂-emissies (aan de uitlaat) of, tot 2025, in hybride of *dual-fuel* schepen. Met de SFDR en de EU taxonomie beoogt de EU een hogere mate van transparantie, zodat investeerders een duidelijk beeld hebben van de duurzaamheid van beleggingen en ook gericht op die duurzaamheid kunnen sturen. De EU verwacht hiermee de hoeveelheid financiële middelen die voor verduurzaming en klimaatneutraliteit nodig zijn, te vergroten. Nederland is via de *Member States Expert Group* betrokken bij de ontwikkeling van de EU taxonomie en kan via die weg ook invloed uitoefenen op de inhoud ervan.

3.3 Nederlands beleid

In het beleidsprogramma van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat gaf het kabinet Rutte-IV¹³ aan toe te werken naar een klimaatneutrale zeescheepvaart in 2050 (IenW, 2022a). Nederland wil internationaal tot de koplopers behoren op het gebied van verduurzaming van de zeescheepvaart (IenW, 2022b). Najaar 2023 was echter nog niet duidelijk of en welk deel van de in Nederland gebunkerde brandstof, die nadien op allerlei routes gebruikt kan worden, binnen de Nederlandse scope valt. Een volledige toerekening leek volgens het kabinet niet logisch (EZK, 2023a). Tabel 2.3 laat zien dat de CO₂-uitstoot van vaarten van en naar Nederland van schepen groter dan 5000 GT momenteel ongeveer 20 megaton bedraagt, terwijl de CO₂-uitstoot uit de bunkerverkopen in Nederland 33 megaton bedraagt.

De inzet van het kabinet Rutte-IV voor het realiseren van de klimaatdoelen voor de zeevaart was primair gericht op het maken van internationale afspraken over normering en beprijzing van de zeevaart. Mondiale instrumenten zijn effectiever dan nationale of regionale en waarborgen een gelijk speelveld. Het nationale beleid is gericht op het versneld marktrijp maken van duurzame technologieën door het uitvoeren van pilotprojecten en het optreden als *launching customer* (bij vervanging eigen vloot en door duurzame inkoop van diensten). Momenteel (medio 2023) wordt gewerkt aan een Routekaart Verduurzaming Zeevaart, waarin afspraken moeten worden gemaakt over verduurzaming van de Nederlandse zeevaartsector. Daarnaast werkt RVO aan een Roadmap Brandstoftransitie Zeevaart waarin inzichtelijk gemaakt moet worden hoe de transitie naar een emissieloze zeevaart eruit zou kunnen zien (IenW, 2022b). In het Ontwerp Meerjarenprogramma Klimaatfonds 2024 heeft het kabinet 111 miljoen euro gereserveerd voor verduurzaming van zeeschepen. Het budget is bestemd voor het opschalen van innovatieve duurzame aandrijftechnieken in de zeevaart (EZK, 2023b).

In 2019 is reeds de Green Deal zeevaart, binnenvaart en havens¹⁴ gesloten, waarin ambities, doelen en afspraken zijn vastgelegd voor verduurzaming. Voor de zeevaart is de ambitie geformuleerd om in 2035 ten minste één emissieloos schip in de vaart te hebben gebracht en om in 2050 de CO₂-uitstoot met 70% gereduceerd te hebben ten opzichte van het piekjaar 2008. Naast deze ambities zijn voor de zeevaart 3 concrete doelen opgenomen voor het jaar 2024:

1. De gemiddelde CO₂-uitstoot per vervoersprestatie moet in 2024 met 20% zijn teruggebracht ten opzichte van 2008;
2. De uitstoot van luchtverontreinigende stoffen moet verder zijn teruggedrongen in lijn met internationale afspraken;
3. Er moeten vijf nieuwe businesscases voor walstroom zijn ontwikkeld.

De Rijksoverheid heeft gedurende de looptijd van de Green Deal jaarlijks 1 miljoen euro beschikbaar gesteld voor het valideren van de CO₂-reductie van verschillende verduurzamingstechnieken. Voor de aanleg van nieuwe walstroompunten is inmiddels een subsidieregeling in het leven geroepen. Ook heeft het kabinet besloten om de energielasting op walstroom af te schaffen teneinde de business case aantrekkelijker te maken.

¹³ Deze paragraaf beschrijft primair de beleidsplannen van het kabinet Rutte-IV. Met de val van het kabinet is onzeker geworden welke plannen daadwerkelijk tot uitvoering worden gebracht.

¹⁴ [Deal Tekst Green Deal Zeevaart Binnenvaart en Havens juni 2019.pdf \(greendeals.nl\)](#)

De maritieme sector heeft daarnaast in lijn met de Green Deal, en als vervolg op de R&D Mobiliteitssectoren corona steun en herstelpakket, een maritiem masterplan gelanceerd gericht op de ontwikkeling, bouw en het gebruik van klimaatneutrale schepen. Het plan beoogt 40 betrouwbare en concurrerende klimaatneutrale demonstratieschepen te ontwikkelen, bouwen en gebruiken. Hiervoor moet 1,2 miljard Euro worden geïnvesteerd, waarvan 100 miljoen Euro direct en 110 miljoen Euro voorwaardelijk is gehonoreerd vanuit het Nationaal Groeifonds.

In oktober 2023 is de Sector Agenda Maritieme Maakindustrie gepresenteerd. Dit behelst een actieplan om de benodigde maritieme kennis, kunde, en industrie te behouden en versterken ten behoeve van de nationale vitale belangen van Nederland. Het gaat hier om verschillende aspecten, zoals de energietransitie, militaire veiligheid, vitale infrastructuur en het verdienvermogen van de sector. De Sectoragenda is het resultaat van een samenwerking tussen het Ministeries van Economische Zaken en Klimaat, Infrastructuur & Waterstaat, en Defensie. Centraal hierin staat de oprichting van het Rijksregiebureau Maritieme Maakindustrie, wat een coördinerende en controlerende rol zal spelen in de beoogde uitvoering van 25-tal acties. Deze acties zijn verspreid over een vijftal actielijnen en een vijftal koploperprojecten (zoals het Maritiem Masterplan).

De volgende vijf actielijnen in de sectoragenda raken (in)direct aan de transitie zeescheepvaart:

1. Focus bij maritieme inkooptrajecten, door nationale belangen zoals strategische autonomie mee te nemen in het aanbestedingsbeleid;
2. Gerichte financiering en fiscale regelingen;
3. Koploper en continuïteit in maritieme innovatie, met tot €30 miljoen investering vanuit het kabinet voor innovatieprogramma's;
4. Verbetering vestigingsklimaat door ruimtelijke planning voor werven te ontwikkelen, en een human capital programma op te zetten; en
5. Internationale positionering versterken door Nederland te positioneren als voortrekker van een coalitie van gelijkgestemde (Europese) landen.

De vijf koploperprojecten betreffen het Maritiem Masterplan, De werf van de toekomst, *Smart Maritime*, Robotisering op zee, en Nucleaire voortstuwing van schepen. Aanvullend wordt ingezet op de oprichting van een nationale Maritieme Autoriteit voor het verbeteren van de dienstverlening voor het scheepsregister. Hiermee wordt de aantrekkelijkheid van Nederland als vlaggenstaat verbeterd.

4 De opties voor verduurzaming

De CO₂-uitstoot van de zeescheepvaart is afhankelijk van drie factoren: het vervoersvolume, de energie-efficiëntie van het vervoer en de koolstofinhoud van de energiedragers die worden gebruikt. Alle drie kunnen een rol spelen in het verduurzamen van de zeescheepvaart. In dit hoofdstuk worden de verschillende duurzame energiedragers met bijbehorende motoren beschreven die in beeld zijn voor verduurzaming van de zeescheepvaart en wordt verkend welke verbetering van de energie-efficiëntie mogelijk is tot 2050.

4.1 Beschrijving duurzame energiedragers

Duurzame energiedragers en de bijbehorende energieomzetters ('motoren') aan boord van de schepen spelen een cruciale rol in de verduurzaming van de zeescheepvaart. Tabel 4.1 geeft een overzicht van de in de literatuur meest naar voren geschoven duurzame brandstoffen en andere energiedragers voor de zeevaart. De tabel laat zien hoe de brandstoffen geproduceerd kunnen worden, hoe de energieconversie aan boord plaatsvindt en of CO₂-afvang aan boord van het schip (*Ship Based Carbon Capture*) mogelijk is.

Tabel 4.1
Duurzame brandstof- en energieconversie-opties voor de zeescheepvaart

Brandstof / energiedrager	Brandstofproductie		Energieconversie aan boord ^{a)}	SBCC mogelijk? ^{b)}
	Bio-reststoffen & energiegewassen	e-brandstof		
Diesel	X	X	ICE	Ja
LNG	X	X	ICE	Ja
Methanol	X	X	ICE of FC/ EM	Ja
Ammoniak		X	ICE of FC/ EM	n.v.t.
Waterstof		X	ICE of FC/ EM	n.v.t.
Accu-elektrisch		X	EM	n.v.t.
Kernenergie			Turbine	n.v.t.

a) ICE = interne verbrandingsmotor; FC = brandstofcel; EM = elektromotor

b) SBCC = Ship Based Carbon Capture (CO₂-afvang en opslag aan boord)

Ten aanzien van de brandstofproductie kan in de basis onderscheid gemaakt worden tussen bio-brandstoffen, gebruik van waterstof of van e-brandstoffen die worden gemaakt vanuit duurzame elektriciteit en waterstof, of elektrische aandrijving via direct gebruik van elektriciteit. Biobrandstoffen worden al enkele jaren toegepast in de zeescheepvaart (zie ook paragraaf 2.3). Waar in het wegverkeer de afgelopen jaren vooral biodiesels zijn gebruikt van volwassen maar op termijn beperkt beschikbare reststromen zoals gebruikt frituurvet (*Used Cooking Oil*, UCO), heeft de zeevaart door gewijzigde regelgeving de afgelopen jaren juist relatief veel geavanceerde biobrandstof gebunkerd (NEa, 2023). Dit zijn biobrandstoffen die zijn geproduceerd uit de duurzame reststromen zoals die in bijlage 9A van de Europese richtlijn voor hernieuwbare energie (de REDII, zie paragraaf 3.2) zijn opgenomen. Hiermee kan scheepsdiesel worden gemaakt, maar ook biomethaan (bio-LNG) of biomethanol. Biobrandstoffen kunnen worden geproduceerd uit verschillende

grondstoffen, zoals oliegewassen, bosbouwresiduen en vast of vloeibaar afval, en via verschillende productieroutes, zoals gassificatie, vergisting, hydrolyse en pyrolyse (zie bijvoorbeeld Kroft, 2020).

Met productieprocessen voor e-brandstoffen kunnen in principe alle brandstoffen en energiedragers worden gemaakt (Tabel 4.1). E-brandstof wordt in toenemende mate naar voren geschoven als kansrijke optie voor duurzame brandstof in de zeescheepvaart (zie bijvoorbeeld Ampah et al., 2021). Duurzame waterstof gemaakt via zonne- of windenergie is feitelijk de meest eenvoudige (hernieuwbare) e-brandstof om te maken. De mogelijkheden om direct op waterstof te varen zijn beperkt (dit wordt hierna toegelicht). Vanuit waterstof kunnen echter op koolstof of stikstof gebaseerde e-brandstoffen gemaakt worden, die wel geschikt zijn voor zeevaart. Voor op koolstof gebaseerde e-brandstoffen, zoals e-diesel, e-methanol of e-methaan, kan het zeker in de toekomst een uitdaging zijn om een goede koolstof- of CO₂-bron te vinden, naarmate er minder fossiele energie gebruikt wordt in het energiesysteem. De benodigde CO₂ kan uit de rookgassen worden gehaald van verbranding van fossiele of biobrandstof (bijvoorbeeld uit de productie van biomethaan of biomethanol) of rechtstreeks uit de lucht via *Direct Air Capture* (DAC). De potentieel hoge kosten en het ruimtegebruik voor DAC maken dit een uitdagende route. Bij productie van e-ammoniak is geen koolstofbron nodig, wat dit op termijn een aantrekkelijk alternatief kan maken.

Een mogelijke koolstofbron voor e-brandstoffen is CO₂ die aan boord van zeeschepen wordt opgevangen (*Ship Based Carbon Capture*, SBCC). Dit kan gebeuren met behulp van fysisch-chemische processen waarbij absorbenten de CO₂ opnemen uit de uitlaatgassen van de verbrandingsmotor of brandstofcel en de CO₂ gekoeld wordt opgeslagen. In de haven wordt deze CO₂ overgeslagen naar de wal, waar het kan worden gebruikt voor productie van e-brandstoffen (CCU: *Carbon Capture & Utilisation*) of ondergronds kan worden opgeslagen (CCS: *Carbon Capture & Storage*). De opvang van CO₂ op het schip kan gecombineerd worden met andere nabehandelingssystemen, zoals afvang van methaan of NO_x. Recente internationale onderzoeksprojecten waarin *full-scale* pilots voor CO₂-opvang aan boord van schepen worden ontwikkeld, tonen aan dat de variatie in emissiereductiepotentieel en kosteneffectiviteit tussen verschillende toepassingen vrij groot is. De effectiviteit is afhankelijk van een aantal parameters, zoals de beschikbaarheid van restwarmte of -koude en of de oplossing retrofit of nieuwbouw is. Dit laatste geldt specifiek voor LNG-aangedreven schepen (zie onder meer Einbu et al. 2022, Ros et al. 2022).

Aan boord van het schip kan brandstof in mechanische energie worden omgezet met een interne verbrandingsmotor of brandstofcel in combinatie met een elektromotor. Elektriciteit wordt direct met een elektromotor omgezet in mechanische energie. Interne verbrandingsmotoren voor diesel en aardgas (LNG) zijn al gemeengoed, de andere opties zijn in ontwikkeling. Bij brandstofcellen wordt de energiedrager via een elektrochemisch proces omgezet naar elektriciteit. Voordeel hiervan is dat dit proces efficiënter kan verlopen. Gebruik van accupakketten in combinatie met een elektromotor kan als hoofdaandrijving dienen voor schepen met een kort operationeel profiel, maar kan ook worden toegepast op een deel van de aandrijving of reis (e.g. als hulpvermogen).

Een laatste optie is het gebruik van nucleaire aandrijving. Dit wordt reeds in een aantal segmenten in de marine toegepast, maar nog nauwelijks in civiele toepassingen. Verschillende partijen zien nucleaire aandrijving als mogelijke interessante optie voor civiele toepassingen, zoals de *offshore* sector. In de sectoragenda voor de maritieme maakindustrie is de ontwikkeling van een *Small Modular Reactor* als een koploperproject benoemd. De technologie heeft nog een lage TRL, en het is nog onduidelijk hoe de kostprijs zich gaat verhouden ten opzichte van andere opties en voor welke

segmenten de technologie kan worden toegepast. Om deze reden is de technologie niet opgenomen in deze analyse. Het is wel een belangrijk onderwerp voor verder onderzoek.

4.2 Multicriteria-analyse energiedragers

In deze paragraaf worden de verschillende energiedragers uit Tabel 4.1 nader beschreven en vergeleken op de volgende criteria (zie ook Tabel 4.2):

- *Technologische en commerciële beschikbaarheid* (TRL en CRL): de technologische en commerciële beschikbaarheid van de aandrijflijnen voor de verschillende energiedragers, de brandstofproductie en de tankinfrastructuur.
- *Kosten*: de verschillende kostencomponenten die de kosten van de inzet van de energiedragers bepalen, waaronder de investeringskosten in de aandrijflijn en de kosten van de energiedragers zelf.
- *Milieu-impact*: de uitstoot van broeikasgassen en luchtverontreinigende stoffen die gepaard gaat met gebruik van de energiedragers en de energie-efficiëntie van de energieketen.
- *Praktische toepasbaarheid*: waaronder de veiligheid, de energiedichtheid en de mogelijkheid om bestaande schepen met nieuwe technologie uit te rusten (retrofit).

Tabel 4.2

Korte duiding van criteria waarop de verschillende energiedragers zijn beoordeeld

TRL-CRL	Kosten	Milieu	Toepasbaarheid
Aandrijflijn	Aandrijflijn + tank/opslag	Broeikasgassen	Juridisch kader
Infrastructuur	Brandstof en bunkerinfrastructuur	Luchtverontreinigende stoffen	Veiligheid
Brandstof-productie	Aandrijflijn-efficiëntie	Energie-efficiëntie brandstofketen	Energiedichtheid

4.2.1 Technological & Commercial Readiness Level

De technologische en commerciële beschikbaarheid, aangeduid met respectievelijk TRL en CRL, kennen een aantal niveaus (*levels*) die op Europees niveau zijn vastgelegd. TRL heeft een schaal van 1 tot 9. Hoe hoger de schaal, hoe verder ontwikkeld de technologie is. CRL geeft aan in hoeverre een technologie ook commercieel rijp is en heeft een schaal van 1 tot 6, waarbij het grootste deel van die schaal zich afspeelt bij TRL-niveaus 8 en 9 (systemen die compleet en gekwalificeerd zijn en beproefd in een operationele omgeving). Een technologie kan technologisch volledig geschikt zijn voor toepassing (hoge TRL), terwijl het commercieel niet interessant genoeg is (lage CRL). Dat kan bijvoorbeeld omdat de markt te klein of te onzeker is of de kosten te hoog. Daarom zijn beide relevant in de beoordeling van de technologieën.

De snelheid waarmee hogere TRL levels bereikt kunnen worden hangt vooral af van de investeringen in de technologieontwikkeling om alle stappen in de ontwikkeling en beproefing in de praktijk te doorlopen. Financiering van hoog-TRL R&D in duurzame aandrijvingen komt alleen beschikbaar als belangrijke leveranciers en eindgebruikers het vertrouwen hebben dat zowel het brandstoftype als de energieconvector opschaalbaar zijn en de concurrentie aankunnen met andere opties. De beschrijving in deze paragraaf is daarmee een momentopname, waarbij niet met zekerheid kan worden gezegd hoe snel hogere niveaus bereikt kunnen worden. De TRL- en CRL-beoordeling wordt in

deze paragraaf gemaakt voor de energieconvector aan boord van het schip. Vervolgens komen ook kort de productie van de brandstoffen en de ontwikkeling van de bunkerinfrastructuur aan bod.

TRL- en CRL-niveaus van aandrijflijnen voor de zeescheepvaart

Tabel 4.3 geeft een overzicht van het TRL- en CRL-niveau van de energieomzetters voor de verschillende brandstofopties voor de zeevaart. Verbrandingsmotoren voor gebruik van diesel of LNG hebben de hoogste TRL- en CRL-niveaus. Deze zijn op grote schaal commercieel beschikbaar. Dit geldt ook voor batterij-elektrische aandrijving, maar dan wel voor de specifieke toepassingen waarvoor dit geschikt is (dit wordt hierna verder toegelicht). Methanol wordt al langere tijd gezien als goede brandstof voor de scheepvaart. De eerste *dual fuel* methanol schepen worden nu gebouwd voor toepassing in verschillende marktsegmenten. Dit betreft bijvoorbeeld containerschepen van Maersk, producttankers van Stena en een offshore installatieschip van Van Oord (zie Gerritse & Harmsen 2023). Medio 2023 zijn er wereldwijd 204 methanol schepen in bestelling, waarvan ongeveer 75% in het containersegment (DNV 2023a, stand 9 augustus 2023). De TRL en CRL van methanol schepen zijn daarmee ook al op een hoog niveau.

Tabel 4.3

TRL- en CRL-niveaus van energieconversie-technologieën voor de zeescheepvaart. Bron: expertinschatting TNO

Duurzame brandstof/energiedrager	Aandrijflijn		Opmerking
	TRL	CRL	
<u>Verbrandingsmotor</u>			
Biodiesel of e-diesel	9	6	Bestaande dieselmotoren; soms kleine aanpassingen nodig
LNG	9	6	Relatief breed productaanbod
Methanol	7-9	4-6	Beperkt productaanbod
Ammoniak	4	1	Investeringen gepland
Waterstof of waterstofdragers	4-7	1	
<u>Brandstofcelsysteem</u>			
Methanol	4-5	1	R&D-fase
Ammoniak	2-4	1	R&D-fase
Waterstof	7	1	Vooralsnog alleen beschikbaar voor lage vermogens
<u>Elektrische aandrijving</u>			
Batterij-elektrisch	9	6	Alleen voor specifieke toepassingen geschikt
Nucleair-elektrisch	3	1	
Walstroom	7-9	4-6	Afhankelijk van haven en benodigd vermogen
<u>Overige</u>			
SBCC – CO ₂ opslag aan boord	6	1	

Sinds enkele jaren is er ook aandacht voor toepassing van ammoniak en waterstof in verbrandingsmotoren. Er is op de proefstand aangetoond dat ammoniak *dual-fuel* goed kan functioneren, althans voor grote langzaam lopende motoren. Verschillende leveranciers zijn bezig met de ontwikkeling van ammoniakmotoren. Veel van de oplossingen die momenteel worden ontwikkeld

met alternatieve brandstoffen betreffen *dual fuel* oplossingen. MGO wordt hierbij gebruikt als pilot brandstof (hulp voor het verbrandingsproces). Daarnaast geeft *dual fuel* scheepseigenaren meer flexibiliteit omdat altijd ook op diesel/stookolie kan worden gevaren.

Toepassing van waterstof in brandstofcellen wordt momenteel in diverse onderzoekstrajecten verkend. Er zijn designs gemaakt voor short sea schepen. De eerste pilots zijn in voorbereiding. Naar verwachting worden ook in het Maritiem Masterplan in de komende jaren enkele schepen ontwikkeld voor waterstof in combinatie met brandstofcellen. Brandstofcellen systemen voor ammoniak of methanol, die wat betreft efficiëntie en levensduur zouden kunnen concurreren met verbrandingsmotoren, zijn nog in een ontwikkelfase. Voor zover bij de auteurs bekend wordt nog niet grootschalig geïnvesteerd in de ontwikkeling van deze technologie.

Ontwikkeling van brandstoffen en bunkerinfrastructuur

Momenteel wordt een breed scala aan oplossingen ontwikkeld, zowel op het gebied van verschillende energiedragers als het gebruik van verschillende *feedstock* routes. Dit betreft zowel biobrandstoffen als e-brandstoffen. Biobrandstoffen worden uit verschillende biogene bronnen gemaakt. De verschillende productieprocessen zijn qua technologie veelal ver ontwikkeld, wel wordt er continu onderzoek gedaan of nieuwe reststromen of energiegewassen ontsloten kunnen worden. E-brandstoffen worden geproduceerd uit elektriciteit en water via waterstof. Afhankelijk van het type e-brandstof zijn daarnaast ook koolstof of stikstof nodig. Zoals hierboven is toegelicht kan de benodigde CO₂ bijvoorbeeld uit rookgassen worden gehaald van verbranding van fossiele of bio-brandstof of rechtstreeks uit de lucht via *Direct Air Capture* (DAC). De technologie voor het produceren van e-fuels is nog in ontwikkeling, en momenteel is er nog nauwelijks productiecapaciteit beschikbaar. In de volgende paragraaf over kosten wordt hier verder op in gegaan.

De infrastructuur voor bunkering van biodiesel en LNG is volwassen. Beiden worden reeds op (redelijk) grote schaal gebunkerd in Nederlandse havens (zie paragraaf 2.3). Voor biodiesel is geen aparte infrastructuur nodig. Bunkerinfrastructuur voor methanol, waterstof en ammoniak is nog niet beschikbaar in Nederland. Methanol en ammoniak worden wel als goederen overgeslagen in Nederlandse havens, waardoor er al opslaginfrastructuur in de havens van Rotterdam, Amsterdam en North Sea Ports beschikbaar is. Met methanol zijn er ook proeven uitgevoerd met *ship-to-ship* bunkering. Buiten Nederland wordt methanol wel in beperkte mate gebunkerd door grote schepen. Ook heeft de eerste bunkeraanbieder voor duurzame methanol zich aangekondigd (Goodfuels 2023). Naar verwachting kan dus het bunkeren van methanol in de Nederlandse havens worden gefaciliteerd voor eerste schepen, en kan er opgeschaald worden als dit commercieel aantrekkelijk is. Voor bunkering van ammoniak worden momenteel veiligheidsonderzoeken uitgevoerd (bijvoorbeeld in het Europese MAGPIE project). Het is de verwachting dat hieruit richtlijnen voor veilige overslag worden gecreëerd.

In Nederland is in verschillende havens reeds basisinfrastructuur voor de belangrijkste energiedragers aanwezig, doordat er in deze havens veel overslag plaats vindt van de (petro-)chemische industrie (bijvoorbeeld in de haven van Rotterdam, en binnenvaarthavens van Chemelot of het Ruhrgebied). Andere grotere havens in Europa hebben deze basisinfrastructuur nog niet, waardoor het bunkeren van alternatieve brandstoffen lastiger te realiseren en hiermee onzeker is. Voor schepen die gebruik maken van een alternatieve energiedrager betekent dit dat zij ofwel zekerheid moeten hebben over de locatie waar het schip wordt ingezet (bijvoorbeeld een vaste route of vast werkgebied) ofwel dat zij flexibiliteit moeten inbouwen (door bijvoorbeeld gebruik te maken van *dual-fuel* systemen).

4.2.2 Kosten

Kosten spelen uiteraard een belangrijke rol in de aantrekkelijkheid van de verschillende duurzame energiedragers voor de zeescheepvaart. De totale kosten (*total cost of ownership*, TCO) van de verschillende alternatieven worden vooral bepaald door de volgende kostenposten:

- Brandstofkosten (inclusief distributiekosten), inclusief eventuele compensatie uit milieubeleidsinstrumenten zoals het EU-ETS; en
- Investeringskosten in het schip.

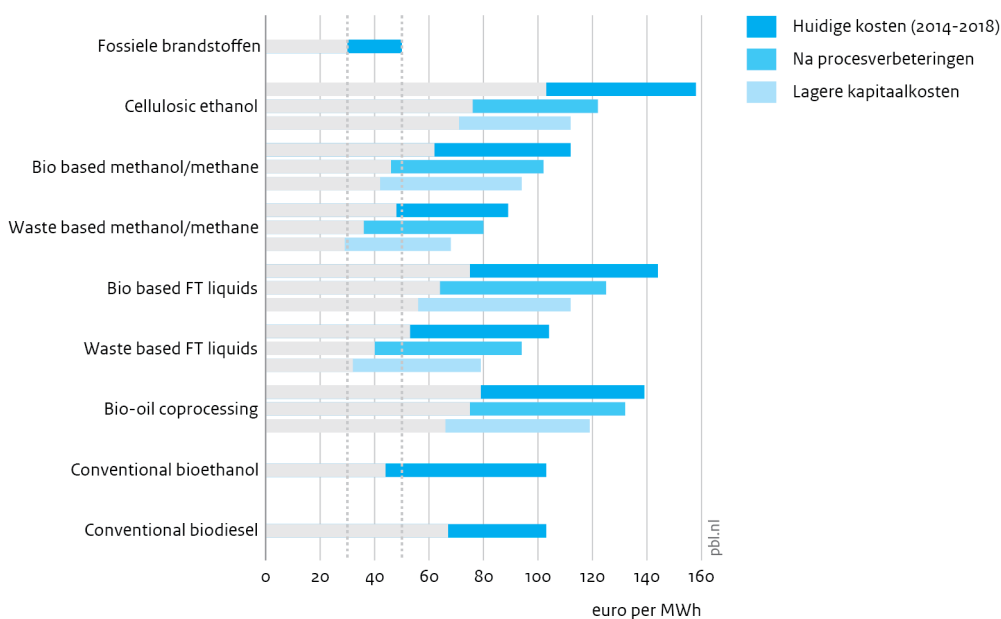
De productiekosten van duurzame brandstoffen liggen momenteel veel hoger dan die van fossiele brandstoffen. Daarnaast zullen met name voor waterstof, bio-LNG, ammoniak en methanol de distributiekosten en de kosten van de bunkertanks en energieconvertors aan boord van de schepen hoger liggen.

Brandstofkosten

In Figuur 4.1 is een overzicht gegeven van de huidige productiekosten van verschillende biobrandstoffen en de verwachte toekomstige ontwikkeling. De toekomstige biobrandstoffen zullen over het algemeen gebruik maken van de REDII Annex IX A grondstoffen, waar de groei in biobrandstofproductie vandaan moet komen conform de Europese regelgeving. In de figuur wordt onderscheid gemaakt tussen *bio-based* grondstoffen (zoals oliegewassen en snelgroeiende houtachtige gewassen) en *waste-based* grondstoffen (ofwel vast of vloeibaar afval). De grafiek laat zien dat conventionele biobrandstoffen relatief goedkoop zijn, maar nog steeds ca. tweemaal duurder dan fossiele brandstof. Bio-LNG en biomethanol hebben over het algemeen een lagere kostprijs (per GJ) dan de overige (vloeibare) biobrandstoffen als wordt uitgegaan van gassificatie van biostromen.

Figuur 4.1

Vergelijking mogelijke ontwikkeling van productiekosten van biobrandstoffen



Bron: IEA 2020

In Tabel 4.4 is een breder overzicht gegeven van productiekosten van verschillende hernieuwbare energiedragers voor de zeevaart, inclusief e-brandstoffen maar exclusief de *waste-based* opties. Opgemerkt wordt dat de productiekosten toenemen als prijzen voor feedstocks stijgen (bijvoorbeeld door schaarste). De e-brandstoffen zijn over het algemeen duurder dan de biobrandstoffen, maar dat geldt mogelijk niet voor waterstof als deze lokaal geproduceerd wordt uit duurzame elektriciteit. Van de overige e-brandstoffen zal ammoniak waarschijnlijk het goedkoopste zijn. De inschattingen van toekomstige productiekosten zijn echter hoogst onzeker, zoals blijkt uit de ruime bandbreedtes. Doordat de meeste typen hernieuwbare brandstoffen momenteel nog niet op grote schaal geproduceerd worden, is de uiteindelijke prijsstelling nog zeer onzeker. Hiermee is het voor investeerders lastig in te schatten welke brandstofroute op de lange termijn financieel de meest aantrekkelijke is.

Tabel 4.4

Overzicht van de productiekosten van duurzame brandstoffen in €/GJ. Bron: Ship & Bunker (2023), IEA (2020) en Kranenburg (2021).

	Jaar	Grondstof	Kosten in €/GJ
Fossiele diesel (VLSFO)^{a)}	2023	Aardolie	15
	2040	Aardolie inclusief CO ₂ -heffing (uiteenlopend van €38 – 122 per ton CO ₂ -eq.)	22-31
FAME	2020-2040	PPO	19-28
HVO	2020-2040	PPO	21-34
Bio-ethanol	2040	Cellulose	21-34
Biomethanol en vloeibaar methaangas	2040	Biomassa	13-28
Fischer Tropsch brandstoffen	2040	Biomassa	18-35
Bio-olie	2040	Biomassa	21-37
Groene waterstof	2040	Hernieuwbare elektriciteit	21-37
e-methanol	2040	Hernieuwbare elektriciteit + DAC	36-57
e-diesel (Fischer Tropsch)	2040	Hernieuwbare elektriciteit + DAC	42-66
e-ammoniak	2040	Hernieuwbare elektriciteit	32-53

a) VLSFO = Very Low Sulphur Fuel Oil, ofwel laagzwavelige stookolie.

De ontwikkelingen in de productiekosten kunnen (sterk) afwijken van de uiteindelijke marktprijzen waartegen de producten verhandeld worden. De marktprijzen worden mede door schaarste beïnvloed, zoals dat ook duidelijk het geval is bij de olie- en gasprijzen. Het is lastig om een goede voorspelling te doen van de ontwikkeling van de marktprijzen (dit geldt zowel voor fossiele als voor hernieuwbare energiedragers). De afgelopen jaren fluctueerden de prijzen van fossiele brandstoffen sterk. Zo koste VLSFO (*Very Low Sulphur Fuel Oil*) in een dal in januari 2016 \$145 per ton (€3,2 per GJ bij wisselkoers september 2023) en op een piek in juni 2022 \$1125 per ton (€25,5 per GJ) (Ship & Bunker 2022). Op 11 augustus 2023 bedroeg de prijs \$662 per ton (ofwel € 15,1 per GJ) (Ship & Bunker 2023).

Uit recent overleg met marktpartijen komt naar voren dat zij zien dat de verkoopprijzen van duurzame brandstoffen veelal gekoppeld zijn aan die van fossiele brandstoffen. Als de prijzen van fossiele brandstoffen (tijdelijk) sterk oplopen dan is zie je dat ook terug in de marktprijzen van duurzame brandstoffen (zie bijvoorbeeld het verloop van de prijzen voor B100 biodiesel en MGO in

2022 op DNV, 2023a). Uiteraard zal dit tevens afhankelijk zijn van het type contract dat tussen vragende partijen en aanbieders wordt afgesloten. De kosten en prijzen van duurzame brandstoffen kunnen ook toenemen als de feedstockprijzen stijgen, bijvoorbeeld als gevolg van een sterk toenevende vraag en een gelimiteerd aanbod. Concurrentie met andere sectoren zoals luchtvaart en industrie kan hierin een rol spelen.

Duurdere duurzame brandstoffen zoals geavanceerde biobrandstoffen of RFNBO's kunnen aantrekkelijker worden als er extra voordeel (waarde) aan wordt toegekend vanuit beleidsinstrumenten zoals FuelEU Maritime en de REDIII/jaarverplichting. Door CO₂-uitstoot te beprijsen zal de prijs voor fossiele brandstof toenemen, ongeacht de productiekosten. We beperken ons in dit rapport tot inschattingen van de productiekosten van de energiedragers.

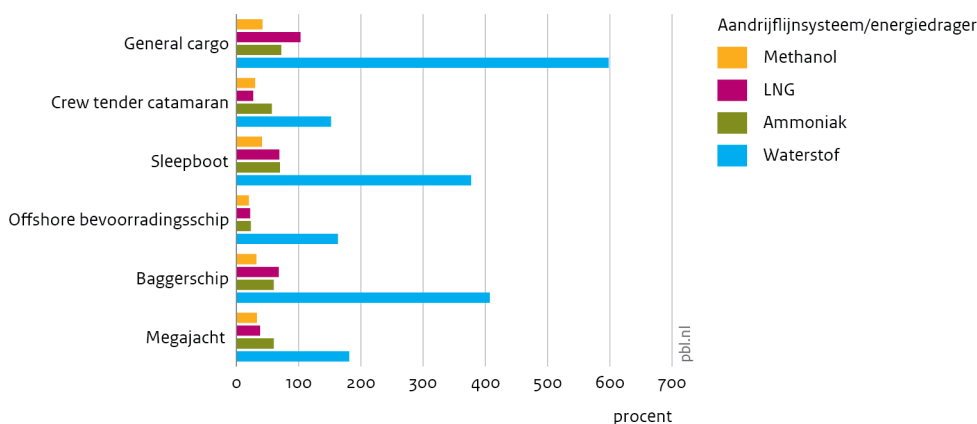
Investeringskosten aandrijflijn

Naast de brandstofkosten spelen de investeringskosten (CAPEX) in de aandrijflijn en bunkertanks een grote rol. Voor *drop-in* brandstoffen, zoals biodiesel en e-diesel zijn deze niet anders dan bij gebruik van conventionele brandstoffen. Voor de andere alternatieve brandstoffen en energiedragers kunnen de investeringskosten wel afwijken, bijvoorbeeld door andere kosten voor de energieopslag aan boord, andere systemen voor distributie aan boord (leidingen, veiligheidssystemen) of het energieomzettingssysteem (verbrandingsmotor, brandstofcellen). TNO en MARIN hebben een globale schatting gemaakt van de investeringskosten in het schip per type alternatieve brandstof (TNO & MARIN, 2021), zie Figuur 4.2. Volgens deze bron zijn de investeringskosten in alternatieve energiedragers hoger dan die voor een aandrijving op MGO of HFO. Met name de kosten voor het opslaan van energie aan boord (tanks, leidingen) nemen een aanzienlijk deel van de investeringskosten in beslag. Deze kosten zijn het grootst in het geval van gebruik van waterstof. De mate waarin dit speelt hangt sterk samen met mate waarin een afname van de autonomie van het schip (vaarafstand op volle tanks) wordt geaccepteerd.

Figuur 4.2

Vergelijking kapitaal-/investeringskosten van aandrijflijnsysteem

Toename kapitaal-/investeringskosten ten opzichte van conventioneel dieselsysteem



Bron: TNO & MARIN 2021

4.2.3 Milieu-impact en energie-efficiëntie

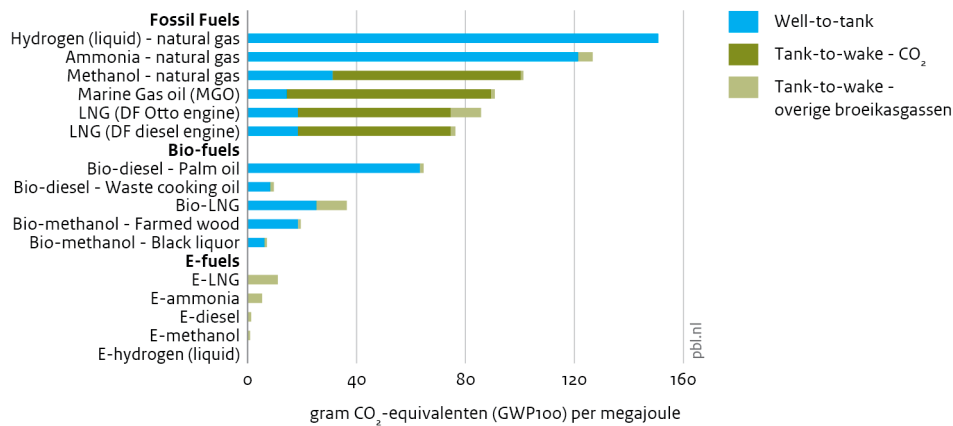
De milieu-impact van de verschillende hernieuwbare energiedragers omvat allereerst de broeikasgasemissies in de productieketen (*well-to-tank*) van de energiedrager. De energie-efficiëntie van de energie-omzetter aan boord van het schip, en de energie-efficiëntie van het schip als geheel, bepalen mede de hoeveelheid ketenemissies per eenheid transport (*well-to-wake*). Duurzame *feedstocks* zijn schaars, dus hoe efficiënter het systeem, hoe minder er voor de zeescheepvaart nodig is. Een ander relevant milieueffect is de lokale uitstoot van luchtverontreinigende emissies, zoals stikstof-oxiden en fijnstof, hoofdzakelijk via de uitlaatgassen van de energie-omzetter aan boord van het schip.

Broeikasgasemissies in de productieketen

De broeikasgasemissies in de zeescheepvaart zijn minder afhankelijk van de keuze van de energiedrager dan van de *feedstock* waarmee de energiedrager gemaakt is. Figuur 4.3 geeft een overzicht van de broeikasgasemissies over de hele keten voor verschillende *feedstocks* en energiedragers als voorbeeld. Vanuit de REDIII wordt een ondergrens aangegeven voor minimale CO₂-reductie waaraan een *feedstock* moet voldoen om bij te mogen dragen tot emissiereductiedoelstellingen vanuit Europese wetgeving (zie hoofdstuk 3). Voor biobrandstoffen is dit een reductie van minimaal 65% en voor e-brandstoffen 70%. Specifiek aandachtspunt is de aanwezigheid van methaanemissies bij LNG / LBG (methaanslip). Methaan is een veel sterker broeikasgas dan CO₂. Deze bijdrage is te zien in onderstaande figuur (zie de groene vlakken). Hier worden technische oplossingen voor ontwikkeld (zowel aan de kant van motorinstellingen als aan de kant van nabehandelingssystemen). De effectiviteit van deze oplossingen moet nog worden aangetoond.

Figuur 4.3

Broeikasgasemissies in de energieketen van verschillende energiedragers



Bron: Gerritse & Harmsen 2023

Energierendement van verschillende energieketens varieert

Gegeven ontwerp en inzet van het schip wordt de energievraag aan boord vooral bepaald door de energie-efficiëntie van de energieomzetter (motor, brandstofcel en elektrische aandrijving). Voor het ketenrendement is ook de energie belangrijk die nodig is om de brandstof te produceren. Het rendement van verbrandingsmotoren in de scheepvaart is relatief hoog. Onder redelijke motorbelasting varieert dit van ca. 40% voor kleine motoren tot ca. 50% voor de grootste motoren.

Het rendement van de nu beschikbare brandstofcellen met waterstof als brandstof is redelijk vergelijkbaar met dat van de (grotere) verbrandingsmotoren. Brandstofcellen voor methanol en ammoniak zijn maar heel beperkt of niet beschikbaar. Als gebruik gemaakt wordt van een *reformer* die waterstof maakt uit het methanol of ammoniak, dan is het systeemrendement aanzienlijk lager dan dat van verbrandingsmotoren (waarschijnlijk rond 30%). Wel zijn er simulaties bekend van toekomstige, op hogere druk werkende, geïntegreerde *reformer*-brandstofcellen met een geprojecteerd rendement dat ergens tussen 50% en 60% uitkomt (zie bijvoorbeeld TNO & MARIN, 2021).

Bij de productie van e-brandstoffen is veel hernieuwbare elektriciteit nodig om via waterstof de e-brandstof te maken. Voor productie van e-diesel, e-ammoniak en e-methanol is ongeveer 2 GJ elektrische energie nodig om 1 GJ e-brandstof energie te maken. Bij direct gebruik van waterstof is dat vanzelfsprekend lager, maar is er meer energie nodig voor de distributie, inclusief compressie of liquefactie (Kranenburg, 2021).

Verschillen in uitstoot van luchtverontreinigende en niet-gereguleerde componenten

De motoremissies van de zeescheepvaart zijn momenteel beperkt gereguleerd. Er worden eisen gesteld aan de uitstoot van stikstofoxiden (NO_x) en via regulering van het zwavelgehalte worden ook de emissies van zwaveloxiden (SO_x) gereduceerd en als bijvangst die van fijnstof (PM) beperkt (zie ook paragraaf 3.1). Er is echter geen regelgeving voor de emissies van de broeikasgassen methaan (CH₄) en lachgas (N₂O) en voor fijnstof. Momenteel wordt nog niet bij ieder type nieuwe brandstof of energieomzetter (dus ook brandstofcellen) nagegaan of er ongewenste emissies optreden. Het verdient aanbeveling om hiervoor een evaluatiemethode als ook regelgeving te ontwikkelen (bijvoorbeeld vergelijkbaar met wegtransport).

Tabel 4.5

Te verwachten emissies bij verschillende brandstoffen en energie-omzetters vergeleken met de Tier III emissie-eisen voor conventionele motoren en gebruik van ULSFO met 0,1% zwavel. Bron: Lieshout (2020), Verbeek (2015) en Brynolf (2014)

	NO _x	SO ₂	PM	CH ₄
Verbrandingsmotor				
Fossiele diesel	Referentieniveau met TIER-III motor			
Vloeibaar methaan	Gelijk	Lager	Lager	Hoger
Methanol	Gelijk	Lager	Lager	
Ammoniak	Gelijk	Lager	Lager	
Waterstof	Gelijk	Lager	Lager	
Brandstofcellen				
Methanol	Lager	Lager	Lager	
Ammoniak	Lager	Lager	Lager	
Waterstof	Nul	Nul	Nul	Nul

Tabel 4.5 geeft een overzicht van de verwachte impact van verschillende energiedragers op de emissies van schepen. De emissies worden hierbij vergeleken met de emissie-eisen voor een nieuwe conventionele motor (Tier III). De stikstofemissies van de verschillende verbrandingsmotorconcepten zijn vergelijkbaar. Veelal worden er precies zoveel emissiereducerende maatregelen genomen dat de motoren net binnen deze eisen blijven en zal geen aanvullend effect optreden. De

SO_x-emissies zijn lager omdat er vrijwel geen zwavel in de alternatieve brandstoffen zitten. Het effect hiervan zal echter niet groot zijn, aangezien de zwaveluitstoot reeds gereguleerd is onder IMO-richtlijnen. Ook is er een verdere verlaging van de PM-emissies voor de *dual-fuel* of *lean burn* motoren.

Een aandachtspunt is dat er heel weinig bekend is over specifieke ongewenste emissies die bijvoorbeeld kunnen optreden bij gebruik van methanol en ammoniak bij gebruik in een verbrandingsmotor. Hierbij kan gedacht worden aan aldehyde (bij methanol) en specifieke stikstofverbindingen (bij ammoniak). Het verdient aanbeveling de risico's op hoge emissies van deze componenten nader te onderzoeken. Bij brandstofcelsystemen met waterstof komen geen emissies vrij. Over emissies bij brandstofcelsystemen voor methanol en ammoniak is nauwelijks iets bekend. Naar verwachting zijn de emissies van nu geadresseerde componenten lager, maar dit zal middels onderzoek bevestigd moeten worden, en tevens moeten de risico's op uitstoot van andere chemische componenten onderzocht worden.

4.2.4 Toepasbaarheid

De toepasbaarheid van nieuwe brandstoffen in de zeescheepvaart wordt vooral bepaald door de volgende aspecten:

- *TRL/CRL van de motoren en opslagsystemen aan boord.*
- *TRL/CRL van de infrastructuur: bunkering van het schip en beschikbaarheid in voldoende havens.*
- *Energiedichtheid van de brandstof: kun je voldoende energie meenemen om de normale vaarten uit te voeren?*
- *Juridisch kader voor energieomzetter, inbouw in schip en bunkeringproces.*
- *Scheepsaanpassingen voor brandstofopslag.*
- *Mogelijkheid van ombouw van bestaande schepen.*

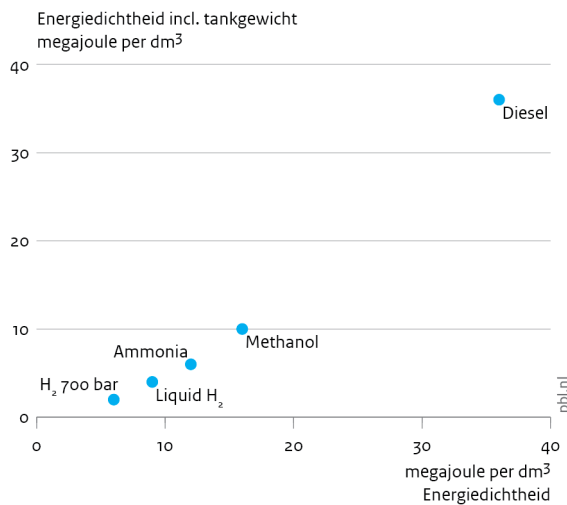
De TRL/CRL-niveaus zijn heel belangrijk voor de toepasbaarheid in schepen. Immers, als de markt niet voldoende goede producten levert, in kwaliteit of productaanbod (voldoende bandbreedte in vermogensrange), dan kunnen de schepen niet gebouwd worden. Deze niveaus zijn toegelicht in paragraaf 4.2.1 en worden hier niet verder behandeld.

Energiedichtheid en inbouw in het schip

De verschillende aspecten van energiedichtheid zijn weergegeven in Figuur 4.4. De figuur laat zien hoeveel volume nodig is voor opslag van de energiedrager, inclusief de ruimte die de tank effectief inneemt (de zgn. vormfactor). Hoe hoger de waarde in de figuur, hoe minder ruimte of gewicht de opslag kost per eenheid energie. Gewicht en volume van de tank en de vormfactor spelen een grote rol in de massa- en volume-specifieke energie-inhoud. Cilindrische tanks, die over algemeen gebruikt worden voor brandstoffen onder druk en voor cryogene brandstoffen (met veel isolatie), nemen veel meer ruimte in beslag dan een lage-druktank, die de vorm van de romp kan volgen. Conventionele scheepvaartbrandstoffen (MGO en HFO) zijn qua energiedichtheid vergelijkbaar met diesel en zijn hiermee efficiënter dan andere alternatieve energiedragers. Alle alternatieven voor diesel en LNG hebben een lagere energiedichtheid, wat leidt tot een kleinere actieradius of een hoger scheepsgewicht en/of grotere scheepsomvang. Dat laatste laat zich ook vertalen in iets meer vaarweerstand en energiegebruik.

Figuur 4.4

Energiedichtheid van brandstoffen inclusief tankgewicht



Bron: Harmsen & 't Hart 2021

Afhankelijk van de vereiste autonomie van het schip, kan aan de hand van de specifieke volumes per brandstof uitgerekend worden hoeveel ruimte aan boord van het schip nodig is. Dat gaat soms ten koste van het ladingvolume, maar veel kan ook in het ontwerp van het schip worden opgelost.

Juridisch kader (en brandstofsificaties)

Een specifiek juridisch kader (*legal framework*) is nodig om schepen op alternatieve energiedragers te classificeren, om vergunningen voor bunkerinfrastructuur te verkrijgen en het bunkeren van schepen te kunnen uitvoeren. Duidelijkheid hieromtrent zorgt voor lagere ontwerp- en uitvoeringskosten van schepen.

Het juridisch kader dat nodig is voor een nieuwe brandstof omvat meerdere onderdelen:

- IMO MARPOL emissiewetgeving (afhankelijk van type energieconvector);
- Brandstofsificaties: eisen aan de kwaliteit van de brandstof;
- Installatie- of ontwerpeisen van energieconvector en tank in het schip;
- Veiligheidseisen voor de bunkerinfrastructuur;
- Veiligheidseisen voor het bunkerproces.

De huidige veiligheidsnormen, voorschriften en procedures zijn een goed uitgangspunt voor eerste (pilot)schepen op nieuwe brandstoffen. Deze eerste ervaringen kunnen worden meegenomen in de ontwikkeling van specifieke voorschriften. De stap tussen de eerste ervaringen uitproeven en implementatie in regelgeving kan veel tijd vergen. Het is belangrijk dat dit traject gefaciliteerd wordt om te zorgen dat dit geen vertragende factor wordt.

Nieuwe richtlijnen en veiligheidsnormen zijn in ontwikkeling bij de IMO voor methanol. Methanol is giftig voor de mens en heeft een vlammpunt van 12 °C, wat onder de voor conventionele brandstoffen minimaal vereiste temperatuur van 60 °C ligt, en vormt dus ook een brandgevaar. Om hier mee om te gaan zijn verschillende veiligheidsvoorschriften van toepassing, zoals een minimale vrije ruimte (kofferdam) rondom de brandstoftanks (zie Deul et al., 2023). Voor kleinere vaartuigen (zoals patrouillevaartuigen, jachten en schepen die worden ingezet voor offshore activiteiten) zijn deze

veiligheidseisen lastig te implementeren in ontwerpen. Ook leiden sommige eisen tot additionele kosten (specifiek materiaal voor productie van de bunkertank, veiligheidssystemen). Daarom is verdere ontwikkeling van veiligheidso oplossingen vereist, die de benodigde ruimte en kosten van implementatie van methanol in schepen verminderen.

Voor ammoniak en waterstof (en waterstofdragers) in combinatie met verbrandingsmotoren of brandstofcelsystemen moet nog veel wet- en regelgeving ontwikkeld worden, zoals voor IMO MARPOL emissiewetgeving, inbouwstandaarden van tank en energieconvector in het schip, brandstofs specificaties en het bunkerproces. Om hier toe te komen is nog veel onderzoek nodig naar de veiligheidsrisico's van opslag en gebruik en mitigerende maatregelen om deze risico's te verkleinen.

Toepasbaarheid in bestaande schepen

Bio- en e-diesel zijn opties om bestaande en nieuwe schepen te verduurzamen, mits deze brandstoffen voldoen aan de duurzaamheidsregels van de Europese Commissie en de IMO. Bij gebruik van biobrandstoffen, zeker die van lagere kwaliteit, zijn er mogelijk technische risico's. Technische problemen zijn meestal met *good housekeeping* van het brandstoftoevoersysteem en de tanks goed te beheersen. Schepen hebben over het algemeen al uitgebreide filtersystemen met waterscheiding en bewaking op de conditie van de filters. In de zeevaart wordt FAME (*fatty acid methyl esters*) als blend van 20% of 30% (respectievelijk B20 en B30) al vaak toegepast. Volgens gegevens over de verkoop van bunkerbrandstoffen in Rotterdam bevatte in 2022 7,5% van de leveringen biodiesel (Port of Rotterdam 2023). Naar verwachting betrof dat blends met 20%-30% biodiesel.

Ten aanzien van de introductie van duurzame brandstoffen zoals methanol, bio-LNG en ammoniak in de gehele vloot kunnen de volgende opmerkingen gemaakt worden. De levensduur van zeeschepen is over het algemeen lang (ca. 25 jaar, zie ook paragraaf 2.2), waardoor de vlootvernieuwing zich beperkt tot ca. 4% per jaar (+ eventueel enkele procenten uitbreiding van de vloot per jaar). Dus zelfs als vanaf 2030 elk nieuw schip geschikt is voor duurzame brandstof, dan is na 15 jaar (2045) pas 60% van de vloot daarvoor geschikt. Voor snelle ingroei is daarom ontwikkeling van retrofitmogelijkheden belangrijk.

In het project *Green Maritime Methanol* is onderzoek gedaan naar de toepasbaarheid van methanol als scheepsbrandstof voor zes verschillende scheepstypes (MKC e.a., 2020). Hier werd geconcludeerd dat het ingewikkelder om een conversie uit te voeren van HFO of MGO naar methanol op een bestaand schip en dat de kosten hoger zijn dan de meerkosten bij nieuwbouw. Voor een aantal van de onderzochte schepen leek het niet mogelijk om een methanolbrandstofsysteem aan boord te realiseren zonder het schip te verlengen. Voor andere schepen was er voldoende ruimte voor inbouw van de benodigde methanoltanks en aanpassingen aan de machinekamer (onder meer in verband met de veiligheidsmaatregelen). Bovendien bleek uit analyse van het operationeel profiel dat het voor deze schepen mogelijk was om vaker te bunkeren, waardoor de bunkertanks minder vergroot hoefden te worden. De mogelijkheid voor ombouw hangt daarmee af van de specifieke eigenschappen van het schip en van het operationeel profiel.

Een belangrijk issue is het aanpassen van de motor. Voor methanol (en LNG) is op pilotbasis reeds een aanpassing van een bestaande motor gedaan, maar er zijn nog geen commerciële retrofitkits op de markt beschikbaar. Ontwikkeling hiervan lijkt pas waarschijnlijk wanneer de markt volwassener is. Containerrederij Maersk heeft aangekondigd in 2024 voor het eerst een bestaand schip te retrofitten met een dual fuel methanol aandrijving.

4.3 Efficiëntieverbetering

Er zijn verschillende typen maatregelen mogelijk om het energiegebruik voor een schip of per ton-kilometer lading te verminderen. Maatregelen voor verbetering van de energie-efficiëntie van het vervoer kunnen als volgt ingedeeld worden:

- Logistieke en operationele maatregelen: bijvoorbeeld het verlagen van de snelheid (*slow steaming*), schaalvergroting of het verhogen van de beladingsgraad.
- Technische maatregelen aan het schip: bijvoorbeeld het verbeteren van de rompvorm, gebruik van zeilen of het toepassen van *anti-fouling*.

DNV (2023b) schat de potentiële reducties van 2022 tot 2050 van de bovenstaande type maatregelen op ca. 18% voor logistieke en operationele maatregelen en ca. 26% voor technische maatregelen. In Lindstad et al. (2015) is het reductiepotentieel voor operationele en technische maatregelen onderzocht, mede als functie van de brandstofprijzen. Bij een brandstofprijzen van ca. 1000 €/ton diesel equivalent (ca. 23 €/GJ), is het kosteneffectieve reductiepotentieel berekend op 23% tot 54%, afhankelijk van de scheepscategorie. Deze prijs ligt veel hoger dan de huidige brandstofprijzen van 15 €/GJ (zie paragraaf 4.2.2). Voor de projectie van het effect op de totale vloot is er rekening mee gehouden dat op bestaande schepen alleen de operationele maatregelen geïmplementeerd worden. Het totale reductiepotentieel kwam daarmee uit op ca. 25% in de periode tussen 2012 en 2030. Dit reductiepotentieel hoeft niet gelijk te zijn over alle scheepstypen. Bij tankers en bulkschepen is bijvoorbeeld wind assist een optie, terwijl dit minder makkelijk toepasbaar is op containerschepen. Van 2022 tot 2050 wordt op grond van deze projectie een grotere reductie verwacht, omdat een groot deel van de vloot vernieuwd zal worden in deze periode, en vanwege de introductie van verschillende instrumenten gericht op verduurzaming van de vloot en het vooruitzicht van aanzienlijk hogere energieprijzen.

Ook andere studies geven een gelijksoortig beeld over de potentiële reductie door efficiëntie maatregelen. In CE Delft (2022a) wordt geconcludeerd dat de beschikbare technische en operationele maatregelen feitelijk maar beperkt geïmplementeerd zijn, ondanks het feit dat verschillende studies laten zien dat veel maatregelen zich terugverdienen. De barrières waardoor de implementatie achterblijft, bestaan uit operationele, gedrags- en economische barrières. Het gaat dan om verborgen kosten, het niet reële maar ervaren risico van nieuwe technologie en tegengestelde belangen tussen betrokken belanghebbenden. Zo bestaat er ook vaak geen optimale coördinatie tussen schepen en havens en tussen eigenaren van schip en vracht. Hiernaast bestaat er soms een gebrek aan kennis en is er de onzekerheid over de opbrengst van de maatregel in relatie tot de kosten. De verwachting is dat de invoering van de *Carbon Intensity Indicator (CII)*, zoals besproken in paragraaf 3.1, leidt tot een grotere aandacht voor energie-efficiëntie maatregelen. Dit is echter wel afhankelijk van de handhaving van dit regime.

Technische efficiëntieverbetering is met name mogelijk door de volgende maatregelen: windondersteuning, weerstandsvermindering door een luchtlaag tussen de romp en het water te creëren (*air lubrication*), en maatregelen aan de aandrijflijn zoals walstroom, gebruik van restwarmte, vermogensmanagement en hybride aandrijfsystemen. De optelsom van deze maatregelen zou theoretisch kunnen leiden tot een totale vermindering van het energiegebruik wereldwijd in 2030 met ca. 50% (vergeleken met 2008 en inclusief aftrek voor reeds ingeschatte implementatie in de vloot). Maar een verbetering van 7-8% is realistischer (CE Delft, 2022b). Afhankelijk van de scheepscategorie zullen er namelijk beperkingen zijn ten aanzien van de praktische en economische haalbaarheid.

IMO gaat er in een projectie tot 2050 van uit dat de som van ontwerp-, technische en operationele maatregelen leidt tot een reductie van het energiegebruik met 35% tot 40% (Hoenders, 2018). IRENA (2021) verwacht een totale verbetering in energie-efficiëntie tussen 2020 en 2050 van ca. 33%. Bouman, et al. (2017) analyseert een groot aantal publicaties over reductiemaatregelen en komt uit op een totale potentiële reductie van ca. 43%. In de 'IMO fourth greenhouse gas studie' (IMO, 2020) wordt een 'hoog potentieel' voor efficiëntiemaatregelen op basis van kosteneffectiviteit ingeschat op ca. 35%.

Geconcludeerd kan worden dat alle genoemde studies komen tot een relatief groot potentieel voor efficiëntieverbetering. Een voorzichtige inschatting is dat ca. 33% verbetering tussen nu en 2050 op vlootniveau realistisch is. Een optimistische maar nog steeds reële inschatting gaat richting 40% reductie.

5 Paden naar klimaatneutrale zeescheepvaart 2050

Uit de analyse van de trends en ontwikkelingen in de vervoersvolumes en de uitstoot van broeikasgassen blijkt dat de zeescheepvaart nog niet op een pad zit naar klimaatneutraliteit. Wel is er beleid in voorbereiding dat belangrijke stappen in die richting moet gaan zetten, zoals beschreven in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 zijn de opties voor verduurzaming behandeld. Daaruit blijkt dat verschillende energiedragers een rol kunnen spelen in de verduurzaming van de zeescheepvaart. Ook kan de komende decennia een verdere verbetering worden verwacht van de vervoersefficiëntie waardoor de vraag naar (hernieuwbare) energie minder hard groeit dan het vervoersvolume.

Op basis van de analyse in de vorige hoofdstukken schetsen we in dit hoofdstuk paden naar een klimaatneutrale zeescheepvaart in Nederland in 2050. Daartoe geven we in paragraaf 5.1 een bandbreedte voor de groei van de vervoersvolumes en voor de verbetering van de energie-efficiëntie van het vervoer tot 2050. Hiermee ontstaat een beeld van de ontwikkeling van de energievraag. Vervolgens beschrijven we in paragraaf 5.2 de mogelijke gevolgen van de energietransitie voor de rol van de Nederlandse havens in de mondiale bunkermarkt. Daarmee ontstaat een beeld van de ontwikkeling van de bunkervolumes in Nederland. In paragraaf 5.3 schetsen we paden voor de inzet van hernieuwbare energiedragers richting een klimaatneutrale zeescheepvaart. De kansen, uitdagingen en handelingsperspectieven, die uit de paden volgen, worden in hoofdstuk 6 beschreven.

5.1 Ontwikkeling van vervoersvolumes en energie-efficiëntie

Verbetering van de vervoersefficiëntie in de zeevaart

In paragraaf 4.3 zijn de mogelijkheden geschetst voor verbetering van de energie-efficiëntie van het vervoer. De ontwikkeling van de energie-efficiëntie is afhankelijk van zowel de marktomstandigheden als de brandstofkosten en het klimaatbeleid (Brancaccio et al., 2022). Als gevolg van de energietransitie zullen de kosten voor gebruik van energiedragers in de zeescheepvaart toenemen. Dit geeft een prikkel om de efficiëntie van vervoer te verbeteren, bovenop het beleid dat door de IMO is ingezet (zie paragraaf 3.1). Tegelijkertijd heeft het verleden laten zien dat energieprijzen niet altijd de belangrijkste drijfveer zijn voor verbetering van de vervoersefficiëntie in de zeevaart en dat kosteneffectieve maatregelen voor het reduceren van het brandstofverbruik niet zomaar genomen worden (zie paragraaf 4.3). Juist in tijden van overcapaciteit in de markt worden vaarsnelheden aangepast en verbetert de vervoersefficiëntie. Bij krapte in de vervoersmarkt is er minder aandacht voor efficiënt varen en speelt energie-efficiëntie een kleinere rol in de aanschaf van nieuwe schepen (Brancaccio et al., 2022). Door de IMO-regelgeving wordt een deel van het beschikbare potentieel voor efficiëntieverbetering bestendigd door af te dwingen dat schepen efficiënter worden ontworpen en ingezet. Op basis van de analyse in paragraaf 4.3 komen we tot een bandbreedte voor de verbetering van de energie-efficiëntie van het vervoer van 25 tot 40% tussen 2021 en 2050 door combinaties van logistieke, operationele en technische maatregelen.

Energietransitie leidt tot afname van vervoer energieproducten

De energietransitie leidt tot minder vervoer van energieproducten. Mondiaal bestaat 35 tot 40% van het vervoersvolume in de zeevaart uit energiedragers en -producten, waarvan het overgrote deel van fossiele oorsprong is. In de Nederlandse havens bedraagt dit aandeel tot wel 50% van de totale overslag aan goederen (in tonnen). Jones et al. (2022) verwachten op basis van verschillende internationale scenariostudies grofweg een halvering van het mondiale vervoer van energieproducten tussen 2020 en 2050 in scenario's waarin de opwarming van de aarde beperkt blijft tot 1,5 graden. Het vervoer van kolen verdwijnt en het vervoer van olie(producten) neemt fors af, waarbij de mate waarin varieert van een halvering tot een afname van meer dan 80%. Het vervoer van biomassa en waterstof (in de vorm van bijvoorbeeld ammoniak) per schip neemt weliswaar toe, maar die toename is veel kleiner dan de afname van het vervoer van fossiele energieproducten.

De IPCC (2022) constateert dat de energietransitie ook tot andere ruimtelijke patronen kan leiden. Door de energietransitie worden andere energiedragers dominant in het energiesysteem, waaronder waterstof. Het potentieel voor het maken van waterstof varieert tussen regio's, afhankelijk van onder andere de beschikbaarheid van goedkope groene stroom en de mogelijkheden voor CO₂-opslag. Dit kan er op termijn toe leiden dat brandstof producerende en andere zware industrieën op andere plekken gevestigd worden, wat van invloed is op de handelsstromen en daarmee op de zeevaart (IPCC, 2022). Wat de consequenties hiervan kunnen zijn voor de EU en voor Nederland is niet beschreven. In de voorliggende studie gaan we er in lijn met de TVKN-studie van uit dat de energietransitie niet tot grote aanpassingen leidt in de economische structuur in Nederland, tenzij die veranderingen rechtstreeks het gevolg zijn van de transitie (zoals de afname van de olieraffinage). Dit is nadrukkelijk een aanname ten behoeve van de analyse en geen voorspelling.

Hogere brandstofkosten zijn ook van invloed op vervoersvolumes

Het gebruik van hernieuwbare energiedragers in de zeevaart leidt tot hogere brandstofkosten. De toekomstige kosten van de hernieuwbare energiedragers zijn nog hoogst onzeker en de marktprijzen waarvoor die verhandeld gaan worden zijn niet goed te voorspellen. Op basis van de inzichten uit paragraaf 4.2.2 is goed denkbaar dat de prijzen voor hernieuwbare brandstoffen voor de zeevaart een factor 2 tot 4 hoger zullen zijn dan de huidige prijzen van fossiele brandstof. De toename van de brandstofkosten voor de zeevaart (ten opzichte van huidige niveaus) wordt gedempt door de verwachte verbetering van de brandstofefficiëntie, maar per saldo resulteert naar verwachting een stijging van de brandstofkosten van transport die varieert tussen 20% en een factor 3. Hogere transportkosten zullen de groei van de transportvolumes dempen.

Tot enkele jaren geleden werd vrij algemeen aangenomen dat de prijsgevoeligheid van het goederenvervoer lager is dan die van het personenvervoer (Geilenkirchen et al., 2010), en dat de vraag naar zeetransport relatief inelastisch is (Oum et al., 1990). Recente studies trekken dit echter in twiëfel. Brancaccio et al. (2020) schatten de prijselasticiteit van de vraag naar bulktransport op -1,03. Asturias (2020) schat de prijselasticiteit van de vraag naar containertransport op -5, en Wong (2022) op -3. Brancaccio et al. (2022) schatten de brandstofkostenelasticiteit voor het volume aan bulktransport in de zeevaart op -0,35, met de notie dat de elasticiteit groter wordt bij hogere brandstofkosten. Hoewel het aandeel van de transportkosten in de totale productprijs veelal relatief klein is, is het dus niet uit te sluiten dat hogere transportkosten zullen resulteren in een significant lagere transportvraag.

Groeiverwachtingen voor de op- en overslag in Nederland

Studies naar de groei van de vervoersvolumes van en naar Nederland zijn schaars. De Integrale Mobiliteits-analyse (IMA) van het ministerie van IenW verwacht een groei van de overslag in de zeehavens met 20 tot 55% tussen 2018 en 2050 (zie paragraaf 2.1). Het klimaatbeleid in de IMA-scenario's is echter niet in lijn met het doel om in 2050 klimaatneutraal te zijn, waardoor er relatief veel fossiele energie wordt vervoerd. Zo groeit in het hoge scenario het vervoer van ruwe aardolie en aardgas in de zeevaart met ca. 50% tussen 2020 en 2050 en het vervoer van aardolieproducten met ca. 25%. Ook in het lage scenario, waarin nog minder klimaatbeleid is verondersteld, is sprake van groei voor beide productgroepen, zij het minder hard. Dergelijke groeiverwachtingen passen niet bij een pad waarin Nederland in 2050 klimaatneutraal is. Het Havenbedrijf Rotterdam (HbR, 2022) schetst in haar scenariostudie voor het havengebied 4 scenario's waarin de ontwikkeling van de overslag tussen 2021 en 2050 varieert tussen een krimp van 14% en een groei van 22%. Een groei van de overslag van goederen in Nederland is dus niet evident. In twee van de vier HbR-scenario's is verondersteld dat Nederland in 2050 klimaatneutraal is. In deze scenario's is wel sprake van groei van de overslag in de Rotterdamse haven met respectievelijk 11% en 23% tussen 2021 en 2050.

Gebaseerd op deze scenariostudies en gezien de constatering dat hogere brandstofkosten een dempend effect hebben op de vervoersvolumes (zij het onzeker hoe groot) en gezien het doel van de voorliggende verkenning, waarin het speelveld wordt verkend maar geen nieuwe doorrekeningen worden gedaan, ramen we een bandbreedte voor de groei van de overslag van goederen in de Nederlandse zeehavens van 0 tot 45% in de periode 2021-2050. Dit komt neer op een jaarlijkse groei variërend tussen de 0 en 1,25%. Deze bandbreedte omvat de beide klimaatneutrale scenario's van het HbR en ligt wat lager dan die in de IMA omdat we er van uitgaan dat het vervoer van energieproducten harder afneemt als Nederland in 2050 klimaatneutraal is en de hogere brandstofkosten ook een dempend effect hebben op de vervoersvolumes.

Energievraag van de zeevaart daalt naar verwachting licht

Als we bovenstaande inschattingen voor de efficiëntieverbetering en de groei van het vervoer combineren, resulteert een bandbreedte voor de ontwikkeling van de energievraag voor zeevaart van en naar Nederland tussen 2021 en 2050 van -20% tot +3%. Daarbij is verondersteld dat hoge groei van de vervoersvolumes gepaard gaat met een snellere verbetering van de energie-efficiëntie omdat bij groeiende volumes de vloot sneller verjongt en er dus eerder nieuwe, efficiëntere schepen in de vloot komen. Omgekeerd is lage groei gecombineerd met een kleinere verbetering van de vervoerefficiëntie¹⁵. De energievraag van de zeevaart blijft dus grofweg stabiel tot 2050.

5.2 De Nederlandse bunkermarkt

De voorgaande paragraaf schetst de denkbare ontwikkeling van het energiegebruik van de zeevaart van en naar Nederland. Voor een analyse van het Nederlandse energiesysteem als geheel, zoals die in TVKN wordt uitgevoerd, is ook relevant waar die brandstof wordt gebunkerd. En dus wat de rol is van de Nederlandse havens in de bunkermarkt.

¹⁵ Als we hoge groei combineren met een lage efficiëntieverbetering en lage groei met hoge efficiëntieverbetering resulteert een bandbreedte voor de groei van het energiegebruik tussen 2021 en 2050 van -29% tot +16%. De orde van grootte blijft hetzelfde, de bandbreedte wordt iets groter.

De Haven van Rotterdam is na Singapore de grootste speler in de mondiale bunkermarkt. Nochtans is het aandeel in de wereldwijde bunkermarkt maar rond de 4% (HCSS & CE Delft, 2023). De belangrijke rol hangt samen met de gunstige geografische locatie als doorvoerhaven voor Noordwest Europa en het historisch gegroeide energiecluster in de haven, waar veel olie wordt verwerkt. Ook worden er veel olie en olieproducten geïmporteerd, waaronder ook veel stookolie (CBS, 2023). Nederland is een belangrijk knooppunt in de internationale oliehandel. Door de energietransitie wordt de rol van aardolie wezenlijk kleiner, en in plaats daarvan zullen andere energiedragers ingezet worden in de economie. De Nederlandse havens zijn zich hier al op aan het voorbereiden¹⁶.

De Rotterdamse haven is momenteel een groot energiecluster en die rol wil de haven behouden bij de transitie naar klimaatneutraal. De gunstige ligging, de bestaande infrastructuur en de reeds gedane investeringen bieden hier voordelen. Er wordt momenteel geïnvesteerd in (uitbreiding van) productie- en importfaciliteiten voor hernieuwbare energiedragers zoals biobrandstoffen, ammoniak, methanol en waterstof. De energiebehoefte in Nederland en het achterland blijft in een klimaatneutrale economie waarschijnlijk van dezelfde orde grootte als vandaag de dag (Netbeheer Nederland, 2023). E-brandstoffen kunnen waarschijnlijk goedkoper worden geproduceerd in andere delen van de wereld (TNO & MARIN, 2021). Dus de functie als grote import- en doorvoerhaven voor energieproducten zou ook in de toekomst gehandhaafd kunnen blijven.

Grootschalige import van hernieuwbare energiedragers hoeft niet te betekenen dat er ook voldoende beschikbaar is voor de zeevaart. De import kan in eerste instantie dienen om de nationale (en Duitse) vraag vanuit de industrie en andere toepassingen te voorzien. Bij raffinage van aardolie blijft er vrijwel altijd een aandeel stookolie over, maar bij hernieuwbare energiedragers is er geen ‘bottom-of-the-barrel’ en concurreren alle toepassingen in principe met elkaar. Omdat de transportkosten van e-brandstoffen beperkt zijn in relatie tot hun waarde (CE Delft, 2021), is het ook denkbaar dat er in een klimaatneutraal scenario – net als nu – veel bunkerbrandstoffen worden geïmporteerd naar Rotterdam. Aan de andere kant zorgt deze ordening waarschijnlijk wel voor minder economisch toegevoegde waarde dan bij raffinage.

Vanwege de bestaande bunkerinfrastructuur, de uitgebreide ondersteunende diensten en de belangrijke functie van overslag en doorvoer is de haven van Rotterdam in een goede uitgangspositie om voorop te lopen bij het aanbieden van bunkermogelijkheden voor hernieuwbare brandstoffen. Met de Europese plannen uit het Fit-for-55 pakket en de IMO-doelstellingen voor een klimaatneutrale zeevaart rond 2050, zal een oplopend aandeel van de gebunkerde brandstof hernieuwbaar moeten worden. Als de Europese of Nederlandse doelstellingen hoger zijn dan die op het wereldwijde speelveld, bestaat echter ook het risico dat een deel van de bunkervraag zich verplaatst naar regio's waar inzet van hernieuwbare energie nog niet (of in mindere mate) wordt afgedwongen (CE Delft, 2022c). Hoewel de doelstellingen voor de zeevaart van de EU en de IMO nu redelijk overeenkomen, zal het van de implementatie afhangen of het speelveld wereldwijd inderdaad gelijk blijft. Momenteel is de EU wel veel verder met implementatie en opzet van handhaving.

Verder hebben de meeste hernieuwbare energiedragers een lagere energiedichtheid dan stookolie (zie paragraaf 4.2). Grote zeeschepen kunnen momenteel met één keer (fossiel) bunkeren grote afstanden afleggen en een retourreis Azië-EU kan op één tankbeurt worden volbracht. De vraag is of

¹⁶ Zie bijvoorbeeld: [Energietransitie | Port of Rotterdam](#)

dat met hernieuwbare brandstoffen ook kan, of dat er in een klimaatneutraal scenario vaker (en dus mogelijk op meer plekken) gebunkerd moet worden. Dat hangt mede af van hoe de schepen ontworpen worden.

Op dit moment laat zich niet voorspellen wat de consequenties van de energietransitie zijn voor de bunkerpositie van de haven van Rotterdam. Dit hangt samen met de wereldwijde handelsdynamiek, de beleidsplannen in de EU, de IMO en de beschikbaarheid van hernieuwbare energiedragers voor de zeevaart. Dat laatste punt hangt weer samen met de beschikbaarheid van (grootschalige) hernieuwbare elektriciteit op de Noordzee of de beschikbaarheid van geïmporteerde energiedragers en de concurrentie met andere sectoren en regio's. Voor de haven van Rotterdam zal de relatie tussen de bunkermarkt en het petrochemisch cluster (met stookolie als restproduct) gaan verschuiven naar een relatie met wind op zee (overschot groene elektriciteit voor waterstof) en import van waterstof, al dan niet in de vorm van ammoniak of methanol (schaalvoordelen en gedeelde importterminals).

Twee varianten voor ontwikkeling bunkerpositie Nederlandse zeehavens

Gezien de onzekerheid over de toekomstige bunkerlocaties in een wereld waarin de zeevaart (en de rest van de economie) klimaatneutraal is in 2050, schetsen we twee varianten voor de ontwikkeling van de rol van de Nederlandse havens in de mondiale bunkermarkt: een variant waarin het aandeel op het niveau blijft van de afgelopen jaren en een variant waarin dit aandeel tussen nu en 2050 halveert. De eerste variant past bij een scenario waarin de Europese havens voorop lopen in de verduurzaming van het bunkeraanbod en er geen grote uitwijkeffecten optreden als gevolg van het nieuwe EU-beleid (omdat de IMO-regelgeving af gaat dwingen dat ook elders verduurzaamd wordt). In combinatie met de huidige sterke marktpositie van de Rotterdamse haven, met goede bestaande bunkerinfrastructuur en uitgebreide ondersteunende diensten, blijft het bunkervolume op peil en wijzigt alleen het type brandstof dat wordt gebunkerd. Dit veronderstelt een grote import van e-brandstoffen en biograndstoffen (of biobrandstoffen).

De tweede variant past in een scenario waarin de trendmatige afname van de bunkervolumes in de afgelopen tien jaar doorzet. Op de korte en middellange termijn zorgen de EU-sancties op Russische ruwe olie en olieproducten voor een complexere aanvoer van bunkerproducten. Voorheen werd zowel veel ruwe olie als stookolie uit Rusland geïmporteerd (CE Delft, 2023). Dit maakt het niet waarschijnlijk dat de dalende trend wordt gekeerd. Op de langere termijn kunnen de duurzaamheidsrichtlijnen van de EU er voor zorgen dat de prijzen voor gebunkerde brandstoffen omhoog gaan, in vergelijking met andere belangrijke bunkerhavens (CE Delft, 2022b). Afhankelijk van de implementatie en realisatie van de IMO-doelstellingen, zal zeker de komende twintig jaar wereldwijd nog veel op fossiele brandstoffen worden gevaren. Het is waarschijnlijk dat de EU – in vergelijking met andere landen die belangrijk zijn op de bunkermarkt – een koppositie zal innemen wat betreft het afdwingen van duurzaamheidsambities. Hierdoor zal de prijs van fossiele bunkering in de EU toenemen terwijl er buiten de EU vraag en aanbod naar fossiele bunkering blijft bestaan. Mogelijk leidt dit tot een sterkere daling van het marktaandeel dat Rotterdam heeft.

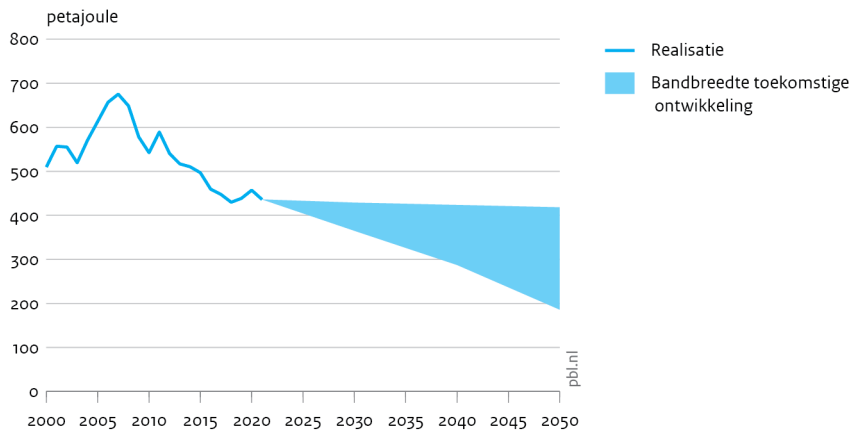
Resulterende bunkervraag in de Nederlandse zeehavens

Figuur 5.1 schetst de resulterende ontwikkeling van de bunkervraag in de Nederlandse zeehavens als we de aannames uit paragraaf 5.1 over de ontwikkeling van het energiegebruik combineren met de twee varianten voor de ontwikkeling van de bunkerpositie van Nederland. De figuur geeft een ruime bandbreedte voor de bunkervraag, wat we gezien de grote onzekerheden over met name de toekomstige bunkerpositie van Nederland en in mindere mate de groei van de vervoersvolumes en

de verbetering van de energie-efficiëntie verdedigbaar achten. Aan de bovenkant van de bandbreedte blijft de bunkervraag ongeveer op het niveau van de afgelopen 4 jaar. Aan de onderkant van de bandbreedte leidt een combinatie van een dalende energievraag en een sterk teruglopende bunkerfunctie tot een trendmatige afname van de bunkervolumes (min of meer in lijn met de trend in de periode 2007-2018)¹⁷.

Figuur 5.1

Bunkering door zeescheepvaart in Nederland



Bron: CBS (realisatie); PBL & TNO (scenario)

5.3 Inzet van hernieuwbare energiedragers

Gegeven dat een aantal oplossingen nog niet uitontwikkeld is en er onzekerheid is over de toekomstige beschikbaarheid en productiekosten van de verschillende energiedragers, is het nog niet goed te bepalen wat de samenstelling van duurzame energiedragers in de zeescheepvaart zal zijn in 2050 in een toekomstbeeld waarin de zeevaart klimaatneutraal moet worden. Wel is het waarschijnlijk dat in dit toekomstbeeld een meer divers portfolio aan energiedragers wordt ingezet dan tot op heden het geval is. Waar de sector historisch grotendeels op stookolie leunde, zal in de toekomst een palet aan brandstoffen worden ingezet in verschillende deelsegmenten van de vloot en in verschillende regio's.

Voor alle typen duurzame energiedragers geldt dat de productiecapaciteit momenteel gering is en snel zal moeten worden opgeschaald om (een pad naar) klimaatneutrale zeescheepvaart in 2050 mogelijk te maken. Import kan hier ook een belangrijke rol gaan spelen, het is niet gezegd dat die productiecapaciteit in Nederland gerealiseerd moet worden. Het bijbehorende beleidskader is

¹⁷ De bandbreedte is berekend op basis van een wortel-kwadratenmethode. Daarbij is eerst afzonderlijk berekend wat de invloed is van ieder van de 3 factoren (ontwikkeling vervoersefficiëntie, vervoersvolumes en positie bunkermarkt) op de resulterende bunkervraag. Vervolgens zijn de afwijking naar boven of naar beneden bepaald van die bunkervraag ten opzichte van het (fictieve) middenpad. Deze verschillen zijn gekwadraterd, waarna de kwadraten zijn gesommeerd en vervolgens de wortel is getrokken van die som. Deze aanpak geeft een redelijke benadering van de bandbreedte die zou resulteren als de onzekerheden via een Monte Carlo analyse zouden zijn gecombineerd.

cruciaal om investeringen los te krijgen. Daarbij geldt dat de beschikbaarheid van de verschillende hernieuwbare energiedragers van regio tot regio kan verschillen, afhankelijk van lokale omstandigheden, het energiesysteem en bestaande industrieën.

Biobrandstoffen zijn kansrijk als drop-in brandstof

Biobrandstoffen, waaronder biodiesel, bio-LNG en biomethanol, gaan waarschijnlijk een belangrijke rol spelen in de verduurzaming van de zeescheepvaart. Groot voordeel van deze route is dat er, in het geval van *drop-in* biodiesel, nauwelijks aanpassingen aan het schip nodig zijn. Maar de bijdrage van deze route hangt sterk samen met de ontwikkeling van de productiekosten van nieuwe productiemethoden voor biobrandstoffen in combinatie met beleidskeuzes over de mate waarin en de voorwaarden waaronder biobrandstoffen mogen bijdragen aan de verduurzaming van de zeevaart. De Europese besluitvorming hieromtrent is reeds ver gevorderd, de komende jaren zal duidelijk worden hoe de IMO hiermee omgaat. Een andere belangrijke factor is de beschikbaarheid van biograndstoffen in zijn algemeenheid en voor de zeescheepvaart in het bijzonder (in relatie tot de vraag uit concurrerende markten zoals de industrie en de luchtvaart). Momenteel worden biograndstoffen vooral gebruikt voor elektriciteitsopwekking. Biobrandstoffen worden vooral toegepast in het wegverkeer, waar de inzet via Europese regelgeving verplicht is. Vergelijkbare regelgeving voor de zeescheepvaart in de EU is in de maak en kan ertoe leiden dat ook de zeescheepvaart het komende decennium grote hoeveelheden biobrandstof gaat afnemen. Als het aanbod achterblijft bij de vraag zal dat tot hoge marktprijzen kunnen leiden, wat de aantrekkelijkheid van deze route beperkt.

E-brandstoffen kunnen op termijn ook een belangrijke rol spelen in verduurzaming van de zeevaart

E-brandstoffen kunnen ook een belangrijke rol gaan spelen in de verduurzaming van de zeescheepvaart. Voor deze brandstoffen is de beschikbaarheid van hernieuwbare elektriciteit en van *elektrolyzers* om die elektriciteit in waterstof om te zetten een cruciale factor. Gegeven de energetische inefficiëntie van deze route is het vanuit het perspectief van het terugdringen van klimaatverandering alleen zinnig om op grote schaal e-brandstoffen te gebruiken wanneer die geproduceerd zijn met additionele hernieuwbare elektriciteit.¹⁸ Afhankelijk van de wereldwijde ontwikkeling van de productie van e-brandstoffen, kan vanaf 2030/2035 het gebruik hiervan in de zeescheepvaart snel gaan toenemen (zie bijvoorbeeld Ricardo en DNV, 2023). Naast de beschikbaarheid van hernieuwbare elektriciteit is ook de beschikbaarheid van voldoende koolstof een cruciale factor die het potentieel van koolstofhoudende e-brandstoffen gaat bepalen. Juist op de lange termijn kan dit een beperkende factor worden.

Voor productie van ammoniak en waterstof is geen koolstof nodig. Deze koolstofvrije energiedragers zijn vanuit het perspectief van een klimaatneutraal energiesysteem aantrekkelijk als koolstof schaars wordt en DAC duur blijft. Ammoniakmotoren zijn echter nog niet marktrijp en de regelgeving voor toepassing voor ammoniak, waaronder veiligheidsvoorschriften voor het gebruik, moet nog worden uitgewerkt (zie ook hoofdstuk 4). Het gebruik van ammoniak of waterstof in brandstofcellen bevindt zich nog in een pril stadium qua technologieontwikkeling. Het is echter goed denkbaar dat richting het eind van dit decennium ammoniak als serieuze optie beschikbaar komt

¹⁸ Risico is wel dat een additionaliteitseis aan de hernieuwbare elektriciteit voor e-brandstoffen de opschaling van productievolumes in de aanloopfase belemmert en daarmee het tempo van de transitie in een later stadium kan vertragen. Het huidige EU-beleid probeert dit te ondervangen met aparte subdoelen voor toepassing van e-brandstoffen (RFNBO's), zie paragraaf 3.2.

voor de scheepvaart (zie ook DNV, 2023b). Als de veiligheid van toepassing kan worden gereguleerd, dan is ammoniak een kansrijke optie voor verduurzaming van de zeevaart. De productiekosten liggen waarschijnlijk lager dan die van andere e-brandstoffen, hoewel dit mede samenhangt met de toekomstige (onzekere) prijs van koolstof.

Batterij-elektrische aandrijving en walstroom kansrijk in specifieke segmenten

Het gebruik van batterijen kan ook een rol spelen in de energietransitie in de zeevaart. Voor schepen die op vaste routes en op korte afstanden varen, zoals ferries, havenschepen en *offshore* bevoorradingsschepen, is volledig batterij-elektrische aandrijving mogelijk en wordt dit soms nu al toegepast. Daarnaast zijn er mogelijkheden voor inzet van batterijen in andere schepen voor een deel van de energievraag aan boord (bijvoorbeeld hulpsystemen). Walstroom gaat een grote rol spelen bij het voldoen aan de energievraag aan de kade, wat naast effect op broeikasgassen ook een positieve bijdrage levert aan de lokale luchtkwaliteit. Omdat het hierbij vooral gaat om hulpvermogen en niet de voornaamste aandrijving is elektrische aandrijving niet apart opgenomen in de scenario's.

CO₂-opslag nog in ontwikkeling

In verschillende scenariostudies speelt ook het gebruik van fossiele brandstoffen met *Ship Based Carbon Capture* (SBCC) een rol in de verduurzaming van de zeescheepvaart. Dit is een potentieel derde route voor verduurzaming. De kosten hiervan worden geschat op 180 – 290 USD per ton CO₂, (Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping, 2022; Martin et al., 2022). De additionele kosten hangen sterk samen met de extra energie die nodig is voor de werking van het *carbon capture* systeem. In gevallen waar veel restwarmte of -koude kan worden teruggewonnen aan boord, zullen de additionele kosten relatief beperkt zijn (tot 7% extra energie). In zulke gevallen kunnen de additionele kosten uitkomen op 130 – 145 USD per ton (Ros et al., 2022). SBCC kan de broeikasgasemissies met ongeveer 75% verlagen ten opzichte van fossiele brandstof. Dat maakt SBCC een financieel aantrekkelijke optie in de jaren tot 2040. Daarna zijn de reductiedoelstellingen te hoog om SBCC te gebruiken in combinatie met fossiele brandstoffen. Wel kan de techniek gebruikt worden in combinatie met bio- of e-brandstoffen (eventueel zelfs naar een netto-negatieve CO₂-emissie vanuit het oogpunt van de hele keten).

5.4 Paden naar klimaatneutrale zeevaart in 2050

We schetsen in deze studie twee paden richting klimaatneutrale zeescheepvaart in 2050. Wat dat betekent voor de bunkering van verschillende typen brandstoffen in Nederland is weergegeven in Figuur 5.2. In beide paden is in het komende decennium een belangrijke rol weggelegd voor efficiëntieverbetering van het vervoer. Mede onder invloed van de huidige IMO-regelgeving verwachten we een verdere verbetering van de vervoersefficiëntie. Daarnaast lijkt dit decennium vooral een rol weggelegd voor biobrandstoffen in de verduurzaming van de zeescheepvaart. Biobrandstoffen worden momenteel al beperkt toegepast in de zeevaart. Onder invloed van de nieuwe Europese regelgeving zal de inzet van hernieuwbare brandstoffen moeten gaan toenemen de komende jaren. Omdat het tijd kost om de productiecapaciteit voor biobrandstoffen te vergroten, veronderstellen we een gematigde ingroei tot 2030, in lijn met andere studies (zie bijvoorbeeld DNV, 2023b en

Jones et al., 2022). Het marktaandeel in 2030 is verondersteld op 5%¹⁹. Vanaf 2030 voorzien we in beide paden een versnelde *uptake* van hernieuwbare brandstoffen. In het eerste pad is daarbij de grootste rol weggelegd voor biobrandstoffen. In het tweede pad spelen e-brandstoffen een dominante rol in de transitie na 2030. We veronderstellen daarbij dat in 2040 de helft van de bunker-vraag nog uit fossiele brandstof bestaat en de anderen helft uit hernieuwbare brandstoffen. Daarmee liggen de paden redelijk in lijn met de indicatieve *checkpoints* van de nieuwe IMO-klimaatstrategie (zie paragraaf 3.1) die voor 2040 een emissiereductie voorschrijven van 70% ten opzichte van het niveau in 2008²⁰. De twee paden geven samen bewust een ruime bandbreedte in de verhouding waarin biobrandstoffen en e-brandstoffen worden ingezet. Op dit moment valt niet te voorspellen wat de onderlinge verhoudingen zullen zijn tussen beide typen brandstoffen. De energietransitie in de zeevaart moet feitelijk nog van start gaan.

Bijdrage van verschillende hernieuwbare brandstoffen aan verduurzaming zeevaart is nog onzeker
Het is nog niet duidelijk welke specifieke biobrandstoffen en e-brandstoffen de overhand zullen hebben binnen de geschetste paden. Gezien de onzekerheden over de typen brandstoffen die op termijn aantrekkelijk zouden kunnen worden voor de verduurzaming van de zeevaart, zoals toege-licht in paragraaf 5.3, kiezen we ervoor om het type energiedragers in de paden niet verder te speci-ficeren (Figuur 5.2)²¹. Uit het *forward order book* tot 2028 komt naar voren dat er de komende jaren een snelle groei volgt van het aantal LNG-schepen (DNV, 2023b). Een deel van deze schepen zal tot na 2050 in de vloot blijven. Bio- of e-LNG zal dus een rol gaan spelen in de verduurzaming van de scheepvaart, waarbij het cruciaal is dat methaanslip wordt vermeden om zo daadwerkelijk een kli-maatneutraal alternatief te bieden voor het varen op fossiele LNG (zie ook paragraaf 4.2.3). Daar-naast zijn er het afgelopen jaar relatief veel schepen besteld die zijn uitgerust met een methanol *dual fuel* motor. Dit betreft voornamelijk schepen voor het containersegment (zie DNV, 2023b). De verwachting in de sector is dat deze ingroei de komende jaren zal versnellen. Methanol zal dus ook een belangrijke rol gaan spelen in de verduurzaming van de zeevaart.

De ontwikkeling van ammoniakaandrijving voor zeeschepen is minder ver. Bij een gunstige prijs-stelling van e-ammoniak ten opzichte van andere e-brandstoffen kan ammoniak vanaf 2030/2035 echter aantrekkelijk worden voor de verduurzaming van de grote intercontinentale scheepvaart. Hiermee zou het in potentie een groot aandeel van de totale maritieme energievraag kunnen af-dekken. Zoals toegelicht in paragraaf 5.3 zal batterij-elektrische aandrijving een rol gaan spelen in de verduurzaming van specifieke deelsegmenten van de vloot. De bijdrage van die segmenten aan de totale energievraag is gering, maar het kan in potentie wel om veel schepen gaan. De rol van waterstofaandrijving is nog onzeker. We hebben ervoor gekozen om de bijdrage van waterstof en batterij-elektrisch varen niet afzonderlijk te presenteren in de paden. Hiervoor is meer onderzoek nodig naar de potentiële omvang van deze markten.

¹⁹ Daarmee kan grofweg worden voldaan aan de FuelEU Maritime verplichting zoals beschreven in para-graaf 3.2. Hoe die verplichting precies uitpakt voor de bunkervolumes is niet goed te voorspellen om-dat er geen directe relatie is met waar de hernieuwbare brandstof gebunkerd moet worden.

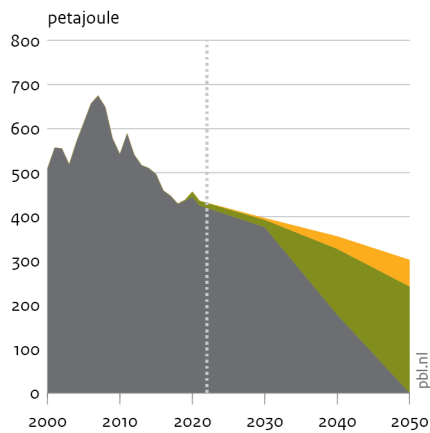
²⁰ Om het streefdoel voor 2040 te halen zou het aandeel hernieuwbaar hoger moeten liggen. Zie ook de beschrijving hierna over het emissiereductietempo in de paden.

²¹ Om de analyse overzichtelijk te houden is in beide paden dezelfde ontwikkeling van de bunkervraag gebruikt. Dit betreft het gemiddelde van de bandbreedte uit Figuur 5.1. Bij een hogere (resp. lagere) energievraag zal het gebruik van beide typen energiedragers toenemen (resp. afnemen).

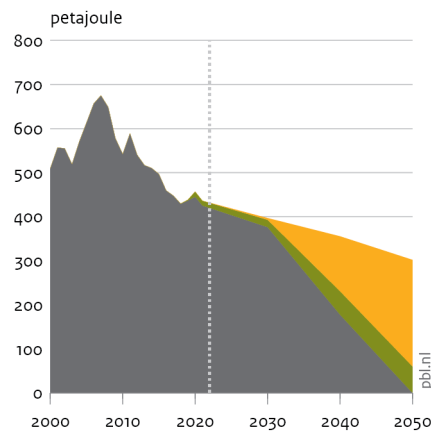
Figuur 5.2

Paden naar klimaatneutrale zeescheepvaart

Hoofddrol voor biobrandstof



Hoofddrol voor e-brandstof



- E-brandstof
- Biobrandstof
- Fossiele brandstof
- Scheiding realisatie en raming

Bron: Emisseriesregistratie (realisatie); PBL & TNO (raming)

Lange levensduur schepen beperkt ingroeiselheid nieuwe aandrijftechnologie

De lange levensduur van zeeschepen, zoals toegelicht in paragraaf 2.2, beperkt het tempo waarmee nieuwe energiedragers zoals methanol, ammoniak en waterstof kunnen worden uitgerold in de vloot. Stookolie en MGO zullen daarom een belangrijke rol blijven spelen in de zeescheepvaart in de komende decennia. En daarmee op termijn ook steeds meer de hernieuwbare varianten van deze brandstoffen, zoals e-diesel en biodiesel. Ondanks dat het door de lange levensduur van schepen lang duurt voordat nieuwe aandrijftechnologie zoals methanol- of ammoniakmotoren een groot deel van de vloot uitmaken, kan het aandeel van deze energiedragers in het energiegebruik in de zeevaart snel(ler) toenemen. Juist de grote schepen die op intercontinentale routes varen leveren een belangrijke bijdrage aan het brandstofverbruik van de vloot. En juist in deze segmenten kan de instroom van nieuwe technologie snel gaan.

Reductietempo broeikasgasemissies zeevaart

Zoals in de inleiding is toegelicht is voor het halen van het Parijsdoel niet alleen relevant wat de broeikasgasemissie is in 2050 (of in elk ander willekeurig jaar), maar vooral ook wat de cumulatieve emissie van broeikasgassen is in deze eeuw. Het tempo waarmee de uitstoot van broeikasgassen door de zeevaart wordt teruggebracht is daarmee minstens zo belangrijk als het einddoel. Figuur 5.2 laat zien dat in de geschetste paden de emissiereductie in de zeevaart pas ná 2030 echt op gang komt.²² De achterliggende redenering is dat het tijd kost om de productiecapaciteit van hernieuwbare brandstoffen te vergroten en om schepen in de vloot te krijgen die in staat zijn op die

²² De afname van de uitstoot van broeikasgassen loopt min of meer gelijk op met de afname van het gebruik van fossiele brandstoffen.

brandstoffen te varen. Het huidige internationale beleid koerst niet op een wezenlijke afname van de uitstoot tot 2030. CE Delft (2023) laat echter zien dat als tot 2030 maximaal wordt ingezet op emissiereductie, de (mondiale) uitstoot van broeikasgassen door de zeevaart in 2030 met 28 tot 47% kan worden gereduceerd ten opzichte van het niveau in 2008 (de bandbreedte hangt samen met onzekerheid over de autonome groei van de emissies). Dit gaat gepaard met een kostenstijging van 6 tot 14%. Om deze afname te bereiken is een combinatie nodig van maximaal gebruik van technische mogelijkheden voor efficiënter varen, waaronder gebruik van windondersteuning, verlaging van de vaarsnelheden met 20 tot 30% en 5 tot 10% inzet van hernieuwbare brandstoffen.

Een snellere afname van de uitstoot tot 2030 is kortom denkbaar, maar vereist additioneel beleid op het gebied van inzet van hernieuwbare energiedragers (en beschikbaarheid daarvan) en verbetering van de energie-efficiëntie. De uitwerking van de nieuwe klimaatstrategie van de IMO biedt hiervoor aanknopingspunten, maar het is niet evident dat voor 2030 een grote verandering in het tempo zal plaatsvinden. Het reductietempo na 2030 hangt sterk samen met het ambitieniveau en de details van het IMO-beleid dat nog wordt uitgewerkt in combinatie met de beschikbaarheid van hernieuwbare energiedragers. Die beschikbaarheid wordt vanuit Nederlands perspectief op systeemniveau geanalyseerd in de TVKN-studie van PBL.

Het emissiereductietempo in de zeevaart kan ook omhoog door toepassing van CO₂-opslag aan boord van het schip (SBCC). Deze technologie is nog niet marktrijp maar er wordt wel mee geëxperimenteerd. Op de termijn van 2030 en daarna is het goed denkbaar dat dit in delen van de vloot kan worden gaan ingezet²³. Met name het gebruik in grote tankers lijkt kansrijk (MMMCZCS, 2022). SBCC lijkt vooral kansrijk voor nieuwe schepen, retrofit is relatief duur en vereist grote aanpassingen aan het schip. Het kost dus tijd voordat deze technologie op wezenlijke schaal in de vloot kan worden toegepast, maar op lange termijn (2035 en daarna) kan het in potentie bijdragen aan versnelde afname van de uitstoot van broeikasgassen door de zeevaart.

De vervoersvolumes in de zeevaart zijn mede afhankelijk van beleidskeuzes en maatschappelijke voorkeuren en kunnen daarmee ook worden beïnvloed. Ook dat kan bijdragen aan versnelde reductie van de uitstoot van broeikasgassen door zeevaart ten opzichte van de paden zoals die hiervoor zijn geschetst. Dit hangt onder meer samen met onze consumptieniveaus en de mate van circulariteit van onze economie. Meer circulair consumeren en produceren betekent niet alleen een groter (en hoogwaardiger) hergebruik van materialen en grondstoffen, maar circulariteit kan ook worden bevorderd via een lagere consumptie door van producten af te zien of deze te delen, de levensduur te verlengen door hergebruik en reparatie en door substitutie van nieuwe eindige grondstoffen door hernieuwbare grondstoffen. Een meer circulaire economie kan leiden tot lager maritiem vervoer van grondstoffen (KiM, 2020). Het kabinet Rutte-IV ambieerde om het primaire abiotische grondstoffengebruik in 2030 te halveren, als tussenstap naar een volledig circulaire economie in 2050. Maar met de huidige trends en het huidige beleid is dat doel niet binnen bereik. Het stimuleren van circulaire oplossingen vereist nieuwe beleidsinstrumenten (PBL, 2023). Met huidig beleid lijkt er dus nog weinig zich op grote veranderingen in de trends in transportvolumes, anders dan de veranderende omvang en samenstelling van de energiedragers die worden vervoerd als gevolg van de energietransitie.

²³ MMMCZCS (2022) verwacht dat de technologie in 2028-2030 het hoogste TRL-niveau (9) bereikt.

Effecten van de paden op luchtkwaliteit en stikstofdepositie

De zeescheepvaart levert niet alleen een bijdrage aan de uitstoot van broeikasgassen, maar draagt ook bij aan luchtverontreiniging, stikstofdepositie en geluidshinder in en rond de havengebieden en soms ver daar buiten. De hiervoor geschetste paden naar klimaatneutrale zeescheepvaart in 2050 hebben een bredere impact dan alleen voor klimaat. De impact op de uitstoot van luchtverontreinigende stoffen hangt echter sterk samen met de keuze voor de aandrijftechnologie. Daar waar gebruik gemaakt blijft worden van verbrandingsmotoren, zal ook sprake blijven van uitstoot van luchtverontreinigende componenten (zie ook paragraaf 4.1). Wel kan de uitstoot van met name zwavel en fijnstof fors lager uitvallen omdat de hernieuwbare brandstoffen geen zwavel bevatten. De uitstoot van stikstofoxiden op de Noordzee en andere gebieden die zijn aangewezen als NECA (zie ook hoofdstuk 2) zal niet wezenlijk veranderen zolang verbrandingstechnologie wordt gebruikt: de hoogte van de uitstoot is daar gereguleerd en dus zal die uitstoot via nabehandelingstechnologie moeten worden teruggebracht tot onder de norm. Buiten die gebieden kan wel een verandering plaatsvinden, maar dit zal niet per definitie tot lagere emissies leiden. Daar waar ammoniak of methanol in een brandstofcel wordt toegepast kan ook sprake zijn van lagere uitstoot van stikstofoxiden en daarmee van een lagere bijdrage aan de depositie van stikstof op natuurgebieden. Op dit moment wordt echter niet verwacht dat brandstofcellen een grote rol gaan spelen in de aandrijving van methanol- en ammoniakschepen.

Zoals in hoofdstuk 4 is benoemd bestaat er een risico dat inzet van hernieuwbare energiedragers in de zeevaart leidt tot hogere emissies van componenten die nu niet zijn gereguleerd, zoals ammoniak. Dit risico kan met nieuwe regelgeving worden ondervangen, maar zonder nieuwe regelgeving zou dit tot een toename kunnen leiden van de stikstofdepositie op natuurgebieden.

Daar waar batterij-elektrische aandrijving of waterstof wordt gebruikt, is geen sprake van uitstoot van luchtverontreinigende stoffen en is dus over de volle linie sprake van milieuwinst voor de luchtkwaliteit en de stikstofdepositie. Dit geldt ook voor het gebruik van walstroom in havens. Juist in havengebieden kan de luchtkwaliteit dus vooruit gaan, wat ten gunste komt van de gezondheid van omwonenden.

6 Kansen, uitdagingen en handelingsperspectieven

De paden naar een klimaatneutrale zeescheepvaart uit hoofdstuk 5 komen niet vanzelf tot stand maar brengen grote uitdagingen met zich mee. Ook bieden ze kansen voor Nederland. In dit hoofdstuk schetsen we de kansen, uitdagingen en de handelingsperspectieven die voortvloeien uit de paden, waarbij we specifiek aandacht besteden aan de rol die de Nederlandse overheid hierin kan spelen. Die omvat enerzijds regulerend en faciliterend beleid voor implementatie. Maar ook beleid voor innovatie. De vier belangrijkste vlakken waarop kansen en uitdagingen bestaan zijn: regelgeving, technologie, beschikbaarheid van energiedragers en bijbehorende infrastructuur en financiële aspecten.

Om stappen te zetten op de verschillende vlakken vergt een gecoördineerde aanpak, goede interactie met stakeholders en focus. Dit vergt een regierol vanuit de overheid op het gebied van verduurzaming van de scheepvaart. Deels kan dit belegd worden in het “Rijksregiebureau Maritieme Maakindustrie” dat is voorgesteld in de sectoragenda maritieme maakindustrie (denk aan de onderdelen techniek en financiële aspecten), maar niet alle onderdelen vallen onder dit bureau.

6.1 Regelgeving

Regelgeving is een cruciale factor in de verduurzaming van de zeevaart, maar ook een van de grootste uitdagingen gezien het internationale karakter van de zeevaart. Een wettelijk kader is cruciaal voor investeerders om te weten hoe de markt eruit gaat zien. Op basis hiervan kunnen keuzes gemaakt worden met betrekking tot inzet van verschillende technologieën voor verschillende scheepstypen en kunnen langetermijninvesteringen worden gepleegd, zowel in technologieontwikkeling, als in het plaatsen van nieuwe technologie aan boord. De IMO heeft in 2023 strategische en ambitieuze klimaatdoelstellingen voor 2050 vastgesteld, maar deze moeten nog worden vertaald naar concrete wet- en regelgeving. Het wettelijk kader in de EU is al vergevorderd: de zeevaart wordt vanaf 2024 stapsgewijs onder het EU-ETS gebracht, waarmee er een prijs komt op de uitstoot van broeikasgassen, en er worden vanaf 2025 normen opgelegd aan de broeikasgasuitstoot van de scheepsbrandstoffen (*FuelEU Maritime*). Ook komen de bunkerleveringen aan de zeevaart onder de Europese regelgeving voor hernieuwbare energie te vallen. Hiermee worden binnen de EU grote stappen gezet in het verduurzamen van de zeescheepvaart. De maatregelen horend bij de nieuwe doelstellingen van IMO moeten uiterlijk in 2025 vastgesteld worden. De Europese Commissie heeft aangegeven dat het Europese beleid bij toekomstige herzieningen in lijn wordt gebracht met nieuwe IMO-afspraken.

Naast de beleidsdoelen en de concrete beleidsinstrumenten die daarbij horen, dient regelgeving ook duidelijkheid te scheppen over welke oplossingen als duurzaam worden beschouwd, in welke mate en onder welke voorwaarden. Een belangrijk element hierbij zijn de milieueisen die worden gesteld voor het gebruik van verschillende energiedragers. Dit heeft bijvoorbeeld betrekking op de wijze waarop in de toekomst de uitstoot wordt gereguleerd van nu niet gereguleerde componenten, zoals ammoniak, methaan, lachgas, aldehyde en fijnstof (zie paragraaf 4.2.3). Het gaat hierbij niet alleen om het broeikaseffect van deze stoffen, maar ook om de milieu- en gezondheidseffecten. Het is belangrijk dat er heldere regelgeving komt voor deze stoffen, zodat motorfabrikanten de

juiste technologierichting kunnen kiezen. Dit wordt bij voorkeur geregeld in de IMO MARPOL Annex VI regelgeving waarin de huidige emissie-eisen voor schepen zijn vastgelegd.

Daarnaast is een helder regelgevend kader nodig voor certificering van grondstoffen en energiedragers. Hierbij dient aandacht te zijn voor ketenemissies zodat zekerheid bestaat over de duurzaamheid van zowel biobrandstoffen als e-brandstoffen (bijvoorbeeld rond gebruik van duurzame koolstof en hernieuwbare elektriciteit). Voor de EU bestaat zo'n kader in de Richtlijn Hernieuwbare Energie. Dit raamwerk wordt ook deels overgenomen in FuelEU Maritime en is dus van toepassing op brandstoffen die gebruikt worden op vaarten van en naar Europese havens. Voor brandstoffen die elders worden gebruikt, heeft de IMO in 2023 een richtlijn voor de berekening van de ketenemissies van brandstoffen aangenomen (IMO 2023b). De richtlijn bevat definities van duurzaamheidsaspecten, maar nog geen duurzaamheidscriteria die moeten worden nageleefd. Ook voor inzet van *Ship Based Carbon Capture* (of inzet van andere nabehandelingssystemen) is momenteel nog geen duidelijkheid of en onder welke voorwaarden de opgevangen CO₂ in de internationale regelgeving gaat gelden als reductiemaatregel.

Wetgeving is daarnaast nodig op het gebied van veiligheid van het gebruik van alternatieve energiedragers aan boord en het bunkeren hiervan in havens. Dit geldt ook voor andere technische en operationele maatregelen, zoals het gebruik van windvoortstuwing. De *Maritime Safety Committee* (MSC) van de IMO heeft in 2023 besloten om te gaan werken aan veiligheidsregelgeving voor nieuwe brandstoffen en technologieën met een lage broeikasgasintensiteit. Daarbij is cruciaal dat er bij de IMO ook voldoende capaciteit is voor de voorbereiding van die regelgeving. Zoals beschreven in hoofdstuk 3 concluderen Bach en Hansen (2023) dat een gebrek aan capaciteit om de verschillende opkomende technologieën te reguleren, waaronder bijvoorbeeld het opstellen van veiligheidsprotocollen, er mede oorzaak van was dat de klimaatambities van de IMO tot 2023 bescheiden waren in het licht van de Parijsafspraken en het niet goed lukt om ambities te vertalen naar concrete beleidsinstrumenten. Medio 2023 heeft de IMO zijn klimaatambities flink aangescherpt, maar de uitwerking daarvan in concrete beleidsinstrumenten moet nog gaan plaatsvinden. De ontwikkeling van een veiligheidskader voor bunkering dient bij voorkeur in samenwerking tussen meerdere landen geregeld te worden. Binnen de EU biedt het *European Sustainable Shipping Forum* (ESSF) hiervoor een platform. Ook wordt er aan dit onderwerp gewerkt in de *International Association of Ports and Harbors* (IAPH).

De ontwikkeling van regelgeving gebeurt primair op internationaal niveau. De directe invloed van de Nederlandse overheid en andere Nederlandse belanghebbenden op dit proces is momenteel beperkt. In de uitwerking en voorbereiding van deze wetgeving kan Nederland echter een voortrekkersrol spelen zoals benoemd in actielijn 5 van de Sectoragenda Maritieme Maakindustrie.

6.2 Technologie

Zoals bleek uit hoofdstuk 4 worden momenteel verschillende technologieën voor verduurzaming van de zeescheepvaart ontwikkeld en is er nog geen duidelijkheid over de verwachte ingroei van deze oplossingen in de markt. Technologieën voor verbrandingsmotoren zijn veelal al ver ontwikkeld. Voor methanol zijn eerste verbrandingsmotoren commercieel beschikbaar en vindt de eerste uitrol plaats. Ammoniak aandrijving is nog in een ontwikkelstadium, met name op het gebied van veiligheid en effecten op luchtkwaliteit.

Voor ammoniak, methanol of waterstof kunnen ook brandstofcellen ontwikkeld worden. Met hoge-temperatuurbrandstofcellen met geïntegreerde reformer en warmteterugwinning

is een wat hogere efficiëntie mogelijk dan met verbrandingsmotoren. Dergelijke systemen, met hoog vermogen (>1 MW) en geschikt voor zeevaart, zijn momenteel nog niet beschikbaar. Voor brandstofcellen zal er een grote behoefte zijn aan schaarse materialen, voor het brandstofcelsysteem zelf en tevens voor de bijbehorende accu's. Hier ligt potentieel een belangrijke uitdaging voor uitrol van deze technologie. Daarnaast wordt de rol van nucleaire voorstuwing verkend, in eerste instantie gericht op de offshore en defensie.

De onzekerheid over de toekomstige energiedragers en het tempo waarmee die kunnen en moeten worden uitgerold maakt het lastig voor scheepseigenaren om te investeren in nieuwe schepen, zeker omdat nieuwe schepen 30 jaar of langer mee kunnen gaan (Köhler et al., 2022). Scheepsbouwers en -eigenaren anticiperen hierop door inzet van *dual fuel* aandrijving. Het is ook mogelijk dat nieuw gebouwde schepen qua leidingen en brandstoftanks geschikt voor methanol of ammoniak opgeleverd worden, maar dat de motor in een later stadium – als er meer zekerheid is – omgebouwd wordt. Retrofit kan op langere termijn ook cruciaal worden om de resterende vloot voor de afschrijvingsdatum te verduurzamen, hoewel *drop-in* brandstoffen altijd directe verduurzaming mogelijk maken.

Op korte termijn (komende 10 jaar) is het belangrijk dat er pilottoepassingen gerealiseerd worden voor de technologieën die nog niet marktrijp zijn, om zowel duidelijkheid te verschaffen over verdere mogelijke kostenbesparingen in het ontwerp als de veiligheidsmaatregelen (bijvoorbeeld omtrent de benodigde veiligheidsruimtes rondom de bunkertank). Vanuit deze pilots zou in diezelfde periode ook een stap naar een opschalingsfase moeten worden gezet. Hier ligt een kans voor Nederland vanwege het groot maritiem cluster. Het toegekende groeifondsvoorstel voor een maritiem masterplan is hier een belangrijke stap in.

Efficiëntieverbetering van zowel het ontwerp als het gebruik van het schip blijft ook een potentieel effectief onderdeel van de verduurzaming van de zeescheepvaart. In paragraaf 4.3 zijn daar voorbeelden van gegeven. Deze maatregelen kunnen direct voordeel geven aan de gebruiker. Er is echter nog onderzoek en praktijkervaring nodig naar de precieze bijdrage die maatregelen aan emissiereductie voor verschillende scheepstypen kunnen leveren. Ook operationele maatregelen, zoals *slow steaming*, *condition based maintenance* en *just in time* planning, kunnen een significante bijdrage aan emissiereductie leveren. Dit wordt gestimuleerd onder de Carbon Intensity Index. De integratie van dergelijke operationele maatregelen met technische CO₂-reductiemaatregelen is nog onderbelicht en verdient aandacht.

Een verdere versnelling van de implementatie van innovaties kan plaatsvinden door het realiseren van een efficiëntieslag in het bouwproces van schepen. Dit kan door een meer modulaire manier van werken te implementeren (*model based system engineering*). Dit leidt tot meer standaardisatie van individuele onderdelen. Hierdoor kunnen nieuwe elementen ook tijdens de levensduur van het schip geïmplementeerd worden, en kunnen resultaten uit de operatie van bestaande schepen mee worden genomen bij ontwerp van nieuwe schepen. Hiervoor is verregaande samenwerking nodig tussen partijen en is data- en informatie-uitwisseling cruciaal. De overheid kan daarin een coördinerende rol spelen, maar ook vanuit aanbestedingen sturen op inzet van duurzame technieken en innovatieve bouwprocessen. Vanuit het maritiem masterplan wordt gewerkt aan de ontwikkeling van een sectorbrede standaard voor het uitwisselen van informatie, het *Joint Maritime Digital Platform* (JMDP). Het is belangrijk dat dergelijke nationale initiatieven aansluiten bij internationale ontwikkelingen.

6.3 Beschikbaarheid energiedragers en bijbehorende infrastructuur

Om voldoende hernieuwbare brandstoffen beschikbaar te hebben voor de zeevaart, is het cruciaal dat er een opschaling plaatsvindt van de productiecapaciteit van hernieuwbare elektriciteit, duurzame koolstof, waterstof (elektrolyzers) en biograndstoffen. Opschaling vindt sowieso plaats, maar in eerste instantie voor andere sectoren. De zeevaart zorgt voor een grote additionele vraag, maar kan tevens meeliften met de opschaling van productie voor andere sectoren. Zoals hiervoor beschreven kan een internationaal wetgevend kader investeerders zekerheid bieden over afzetmarkten. Een belangrijk punt bij de opschaling van de productie van hernieuwbare brandstoffen is de interactie met de rest van het energiesysteem. Momenteel gebruiken schepen in feite het restant uit het raffinageproces, maar naar hernieuwbare energiedragers bestaat in vele andere sectoren ook vraag, zoals in de industrie en in de luchtvaart. Daarom zal er beleidsmatig aandacht geschonken moeten worden aan hoe de energieproductie en -aanvoer voor de zeescheepvaart in de toekomst past in de verduurzaming van het algehele energiesysteem.

Nederland is waarschijnlijk niet in staat om de volledige hoeveelheid in Nederlandse havens gevraagde hernieuwbare brandstoffen voor de zeevaart te produceren (mede afhankelijk van hoe die bunkervraag zich gaat ontwikkelen). Het is waarschijnlijk dat er net als nu grote hoeveelheden geïmporteerd (moeten) gaan worden en mogelijk wordt een deel van de bunkervraag verplaatst naar andere regio's waar hernieuwbare energiedragers goedkoper beschikbaar zijn. De industrie zal in een klimaatneutraal scenario, met behoud van de huidige sectoren en energievraag, op grote schaal gebruikmaken van import van groene waterstof. In elk klimaatneutraal scenario van de netbeheerders voor 2050 vindt er grootschalige import plaats, variërend van grofweg 200 tot 900 PJ per jaar. Dit gebeurt mogelijk in de vorm van ammoniak (Netbeheer Nederland, 2023). De eerder benoemde energiedragers ammoniak en methanol (maar ook waterstof) worden bijvoorbeeld momenteel al grootschalig in de industrie en kunstmestsector gebruikt. Ook deze sectoren staan voor een verduurzamingsopgave. De zeevaart zal mede van op de wereldmarkt geproduceerde hernieuwbare brandstoffen afhankelijk zijn. Hierbij zal sprake zijn van deels concurrentie, deels van gunstige synergie met andere importerende sectoren. Vanuit Nederlandse maritieme *stakeholders* is daarom ook mogelijk samenwerking met het industriële cluster interessant. Mogelijk kan door samen te werken aanbod van duurzame energiedragers sneller worden gerealiseerd.

Voor nieuwe energiedragers (behalve *drop-in* biobrandstoffen) dient nieuwe bunkerinfrastructuur aangelegd te worden. Hierbij is van belang dat er een uniforme standaard komt over de hele wereld (zie paragraaf 6.1), en dat er in eerste instantie voldoende bunkerlocaties beschikbaar zijn langs relevante routes (zogenoemde groene corridors). Voor Nederland is dit geen groot probleem door de aanwezigheid van het bestaande energiecluster, in andere Europese havens is dit soms wel een probleem. Binnen groene corridors kunnen havens de beschikbaarheid van verschillende energiedragers coördineren zodat schepen overal waar nodig de juiste energiedragers kunnen bunkeren. Dit is een kans om toepassing en bunkering te testen en de weg te bereiden voor bredere inzet. Overheden kunnen hierbij een coördinerende functie vervullen, maar ook marktpartijen zullen hierbij een rol spelen. Zo investeert de Deense reder Maersk in schepen op methanol en maakt tegelijkertijd afspraken met havens en producenten over de beschikbaarheid van hernieuwbare methanol. Nederlandse reders zouden (gezamenlijk) een vergelijkbaar initiatief kunnen nemen.

6.4 Financiële aspecten

Het economisch perspectief van de energietransitie in de zeevaart is ook een belangrijke uitdaging. Om die transitie mogelijk te maken zijn grote investeringen nodig in productiecapaciteit voor duurzame brandstoffen en in de ontwikkeling en inzet van nieuwe aandrijflijnen, die vaak duurder zijn dan reguliere aandrijflijnen. Daarnaast zijn de kosten van duurzame brandstoffen hoger dan die van fossiele brandstoffen, en tussen de goedkopere en duurder biobrandstoffen en e-brandstoffen kan ook weer een factor twee verschil zitten. Schaarste aan duurzame brandstoffen of grondstoffen kan de marktprijs verder opdrijven. De onzekerheden zijn groot en zullen afhangen van de wereldwijde vraag, ook binnen andere sectoren, zoals de industrie.

Financiële instellingen en verzekeringsmaatschappijen kunnen een belangrijke rol spelen in de financiering van de transitie. Naarmate grote investeerders meer focus leggen op groene investeringen wordt het makkelijker voor rederijen of brandstofproducenten om de hoge kapitaalkosten gefinancierd te krijgen. Een voorbeeld van een privaat initiatief met impact op de verduurzaming van de zeescheepvaart zijn de zogeheten *Poseidon Principles*.²⁴ Dit initiatief is in 2019 van start gegaan en bevat richtlijnen voor het in lijn met de klimaatdoelen van de IMO handelen van financiële instellingen die actief zijn in de maritieme sector. Poseidon kent vier principes voor het financieren van investeringen in de maritieme sector. Die gaan over de beoordeling van de klimaatimpact, het afleggen van verantwoording over de duurzaamheid van het investeringsportfolio, de naleving van de principes en transparantie. Medio 2023 hebben 30 banken zich gecommitteerd. Gezamenlijk vertegenwoordigen deze banken een bedrag van ongeveer 200 miljard dollar aan investeringen in de zeescheepvaart, ofwel ruim een derde van de totale mondiale investeringen. Banken kunnen deze rol echter alleen pakken wanneer er geen sprake meer is van een onrendabele top. Regelgeving is cruciaal om deze onrendabele top weg te halen of te laten absorberen in de reguliere kosten.

Verladers kunnen ook een belangrijke rol spelen in verduurzaming van de scheepvaart. Steeds meer bedrijven rapporteren over de CO₂-emissies van hun producten over de hele keten, waaronder het transport. Vanaf 2024 wordt dit verplicht vanuit de *Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD)*. Zo moeten bedrijven de broeikasgasvoetafdruk van producten (scope 3) vermelden waardoor dit een aspect van concurrentie tussen bedrijven wordt. Dit kan een drijfveer zijn voor verladers om te willen betalen voor vermindering van hun scope 3 emissies en daarmee een manier voor rederijen om hogere kosten van hernieuwbare brandstoffen in de aanloopfase af te dekken en voor verduurzaming van scheepvaart in het algemeen.

Scheepseigenaren zien de noodzaak om emissies te verminderen, maar om echt de overstap te maken willen zij wel ervaring opbouwen en de risico's van een *lock-in* vermijden. Regelgeving is hierbij cruciaal, zoals is toegelicht in paragraaf 6.1. Op korte termijn, waarbij nog geen duidelijke wettelijke vereisten geformuleerd zijn, is er sprake van een ongelijk speelveld tussen scheepseigenaren die wel of niet investeren in duurzame oplossingen en is het lastig om financiering te krijgen voor investeringen of een vergoeding voor hogere operationele kosten. Overheden kunnen hierin een rol spelen via subsidies voor innovaties en voor eerste marktintroductie. Voor de lange termijn is duidelijkheid omtrent de richting en het beleidskader van de verduurzaming (zoals hiervoor besproken) cruciaal. Op nationaal niveau wordt een haalbaarheidsonderzoek naar een regeling ter

²⁴ [Home - Poseidon Principles for Financial Institutions](#)

demping van de prijsverschillen voor alternatieve energiedragers (eerste kwartaal 2024 gereed). Uiteindelijk geldt hoe dwingender de internationale regelgeving wordt, hoe minder risicovol een investering wordt. Op die manier kan ook makkelijker private financiering worden aangetrokken (Sumaila et al., 2021). Het Europese beleidskader biedt inmiddels helderheid door de CO₂-uitstoot uit de zeescheepvaart te beprijsen via het EU-ETS en tegelijkertijd de toenemende inzet van hernieuwbare brandstoffen af te dwingen. Hiermee krijgt de uitstoot van broeikasgassen een prijs en wordt investeren in verduurzaming financieel interessant. Een vergelijkbaar beleidskader vanuit de IMO kan de transitie in de mondiale zeevaart verder brengen.

Referenties

- Ampah, J.D., A.A. Yusuf, S. Afrane, C. Jin & H. Liu (2021), 'Reviewing two decades of cleaner alternative marine fuels: Towards IMO's decarbonization of the maritime transport sector', *Journal of Cleaner Production* 320, 128871.
- Asturias, J (2020), Endogenous transportation costs, *European Economic Review*, Volume 123,
- Bach, H. & T. Hansen (2023), 'IMO off course for decarbonization of shipping? Three challenges for stricter policy', *Marine Policy* 147.
- Bouman, E., A., Lindstad, E., Riialand, 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* 52 (2017) 408 – 421
- Brancaccio, G., M. Kalouptsi, and T. Papageorgiou (2020): "Geography, Transportation, and Endogenous Trade Costs," *Econometrica*, 88, 657–69
- Brancaccio, G., M. Kalouptsi & T. Papageorgiou (2022), 'The impact of oil prices on world trade', *Review of International Economics*, 31(2), p. 444-463.
- Brynolf, S. (2014), *Environmental Assessment of Present and Future Marine Fuels*
- Cariou, P. & L.M. Randrianarisoa (2023), 'Stakeholders' participation at the IMO marine environmental protection committee', *Marine Policy* 149.
- CE Delft (2021), *Impacts of FuelEU Maritime on the Dutch maritime sector*, Delft: CE Delft.
- CE Delft (2022a), *Energy efficiency in Shipping*, Delft: CE Delft. (niet openbaar)
- CE Delft (2022b), *Fit for 55 and 2030 milestones for maritime shipping, a pathway towards 2050*, Delft: CE Delft
- CE Delft (2022c), *Klimaatmaatregelen mobiliteit. Factsheets voor de KEV 2022*, Delft: CE Delft.
- CE Delft (2023), *Shipping GHG emissions 2030. Analysis of the maximum technical abatement potential*, Delft: CE Delft.
- CPB & PBL (2016), *WLO – Welvaart en Leefomgeving. Goederenvervoer en zeehavens*, Den Haag: Centraal Planbureau en Planbureau voor de Leefomgeving.
- Dat.mobility & Districon (2021), *Integrale Mobiliteitsanalyse. Achtergrondrapportage goederenvervoer integraal*, uitgegeven door Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving (WVL).
- Deul, M.L., C.E.C. Hulsbosch-Dam, A.W. Vredeveldt, N.P.M. Werter, A. Fernandes (2023), *Green Maritime Methanol 2.0. WP1 Development safety solutions*. TNO 2022 R11000
- DNV (2023a), *Alternative Fuels insight*. Geraadpleegd op 9-8-2023.
- DNV (2023b), *Maritime forecast to 2050. Energy Transition Outlook 2023*, DNV AS, Hovik, Norway.
- Edelenbosch, O., M. van den Berg, H.S de Boer et al. (2022), *Mitigating greenhouse gas emissions in hard-to-abate sectors*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- EEA (2022) *National emissions reported to the UNFCCC and to the EU Greenhouse Gas Monitoring Mechanism*, [National emissions reported to the UNFCCC and to the EU Greenhouse Gas Monitoring Mechanism — European Environment Agency \(europa.eu\)](https://www.eea.europa.eu/national-emissions-reports)
- EEA & EMSA (2021), *European Maritime Transport Environmental Report 2021*, Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- ESABCC (2023), *Scientific advice for the determination of an EU-wide 2040 climate change target and a greenhouse gas budget for 2030-2050*, European Scientific Advisory Board on Climate Change, DOI: 10.2800/609405.

- Einbu et al. (2022), Energy assessments of onboard CO₂ capture from ship engines by MEA-based post combustion capture system with flue gas heat integration.
- EPRS (2016), *The IMO – for ‘safe, secure and efficient shipping on clean oceans’*, European Parliament Research Service, PE 577.964.
- Equasis Statistics (2020), *The world merchant fleet in 2020*
- Europese Commissie, 2021, *Reducing emissions from the shipping sector*, Brussel: Europese Commissie
- EZK (2023a) *Naar een beleidsagenda voor een klimaatneutraal Nederland*, Den Haag: Ministerie van Economische Zaken en Klimaat.
- EZK (2023b) *Ontwerp Meerjarenprogramma Klimaatfonds 2024*, Den Haag: Ministerie van Economische Zaken en Klimaat.
- Geilenkirchen, G.P., K. Geurs, H.P. van Essen, A. Schroten en B. Boon (2010), *Effecten van prijsbeleid in verkeer en vervoer. Kennisoverzicht*, Bilthoven: Milieu- en Natuurplanbureau.
- Gerritse, E. & J. Harmsen (2023), *Green Maritime Methanol. A call to action*. TNO 2022 R12341
- Goodfuels (2023), *Now supplying goodfuels biomethanol in the port of Amsterdam*. <https://www.goodfuels.com/news/now-supplying-goodfuels-biomethanol-in-the-port-of-amsterdam>
- Harmsen, J. & P. 't Hart (2021), *Green Maritime Methanol. Towards A Zero Emission Shipping Industry*. TNO 2021 P10262
- HbR (2022), *Toekomstscenario's 2050*, Rotterdam: Havenbedrijf Rotterdam.
- HCSS & CE Delft (2023), *Decarbonising maritime bunkering in the Netherlands and the embargo on Russian oil*, Den Haag: The Hague Centre for Strategic Studies & CE Delft.
- Hoenders, R. (2018), *Achieving the goals of the Initial IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships: IMO policy context*.
- IEA (2020), *Advanced Biofuels – Potential for Cost Reduction*. IEA Bioenergy task 39. 2017.
- IenW (2020), *Uitgangspunten Referentieprognoses Goederenvervoer 2021 (RPGV2021)*, Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
- IenW (2022a), *Beleidsprogramma Infrastructuur en Waterstaat*, Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
- IenW (2022b), *Kabinetsaanpak Klimaatbeleid. Zee- en binnenvaart. Brief van de minister van Infrastructuur en Waterstaat aan de Voorzitter van de Tweede Kamer der Staten-Generaal. Vergaderjaar 2022-2023, 32813/31409, Nr. 1141*.
- IMO (2009), *Second IMO GHG Study 2009*, International Maritime Organization, London.
- IMO (2020), *Fourth IMO Greenhouse Gas Study*, International Maritime Organization, London.
- IMO (2023a), *Resolution MEPC.377(80): 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*, International Maritime Organization, London.
- IMO (2023b), *Resolution MEPC.376(80): IMO Guidelines on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels (LCA Guidelines)*, International Maritime Organization, London.
- IPCC (2021), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2022), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental panel on Climate Change*, Intergovernmental Panel on Climate Change.

- IRENA, 2021, *A pathway to decarbonise the shipping sectors by 2050*. Publication International Renewable Energy Agency, ISBN 978-92-9260-330-4
- Jones, C., Bullock, S., Ap Dafydd Tomos, B., Freer, M., Welfle, A., & Larkin, A. (2022), *Shipping's role in the global energy transition. A report for the International Chamber of Shipping*, Tyndall Centre for Climate Change Research, University of Manchester. <https://tyndall.ac.uk/news/new-shipping-emissions-report/>
- KiM (2020), *Trends en de Nederlandse zeevaart*, Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.
- KiM (2021), *Mobiliteitsbeeld 2021. Bekroonde mobiliteit*, Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.
- KiM (2022), *Energieketens voor CO₂-neutrale mobiliteit*, Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.
- Köhler, J., E. Dönitz & F. Schätter (2022), 'Transitions for ship propulsion to 2050: The AHOY combined qualitative and quantitative scenarios', *Marine Policy* 140.
- Kranenburg 2021, van Kranenburg, K., van Bree, T., Gavrilova, A., Harmsen, J., Schipper, C., Verbeek, R., Wieclawska, S., Wubbolts, F., 2021. *Transition to e-fuels: a strategy for the Harbour Industrial Cluster Rotterdam*, TNO 2021 R12635.
- Kroft, D. van der (2020), *The potential of drop-in bio-fuels for the maritime industry*.
- Lieshout, 2020, P.S. van Lieshout, V. de Jonge, R. Verbeek, A.W. Vredevelde, S. Finner: *Green Maritime Methanol: WP3 factsheet and comparison with diesel and LNG*. Report: TNO 2020 R11822, November 2020.
- Lindstad, TNO, ISL, SINTEF, TML (2015): *GHG emission reduction potential of EU-related maritime transport and on its impacts*; Ref: CLIMA.B.3/ETU/2013/0015.
- Lund, M.T., B. Aamaas, C.W. Stjern, Z. Klimont, T.K. Berntsen & B.H. Samset (2020), 'A continued role of short-lived climate forcers under the Shared Socioeconomic Pathways', *Earth System Dynamics*, 11, 977-993.
- MMMCZCS (2021), *Industry transition strategy*, <https://www.zerocarbonshipping.com/publications/industry-transition-strategy/>
- MMMCZCS (2022), *The role of onboard carbon capture in maritime decarbonization: A case study of the largest shipping segments, main carbon-based fuels, and full and partial application as part of a newbuild or retrofit*, Copenhagen: Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping, <https://www.zerocarbonshipping.com/publications/the-role-of-onboard-carbon-capture-in-maritime-decarbonization/>
- Martin, J., Dimanchev, E., & Neumann, A. (2022). *Carbon Abatement Costs for Hydrogen Fuels in Hard-to-Abate Transport Sectors and Potential Climate Policy Mixes*. MIT Center for Energy and Environmental Policy Research. <http://www.jstor.org/stable/resrep45426>
- MKC, e.a. (2020), *Green Maritime Methanol: WP 5 - System Design for Short Sea Shipping*. Six case studies of ships using methanol as a fuel.
- Nea (2023), *Eerste resultaten hernieuwbare energie voor vervoer 2022*, [Eerste resultaten hernieuwbare energie voor vervoer 2022 | Publicatie | Nederlandse Emissieautoriteit](#).
- Netbeheer Nederland (2023) *Het energiesysteem van de toekomst, de IJ3050 scenario's*, https://www.netbeheernederland.nl/upload/Files/Rapport_IJ3050_Scenario%27s_280.pdf
- Oum, T.H., W.G. Waters & S.Y. Yong (1990), *A survey of recent estimates of price elasticities of demand for transport*, The World Bank.
- PBL (2020), *Analysing International Shipping and Aviation Emission Projections of Integrated Assessment Models*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

- PBL (2021), *Reflectie op de leefomgevingsthema's in het Coalitieakkoord 2021-2025*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- PBL (2023), *Integrale Circulaire Economie Rapportage 2023*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- PBL (2024), *Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050. Trajecten naar een klimaatneutrale samenleving voor Nederland in 2050*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- PBL, TNO, CBS en RIVM (2022), *Klimaat- en Energieverkenning 2022*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- PBL & TNO (2024), *Klimaatneutrale mobiliteit in 2050. Een verkenning van beelden en paden daar naartoe*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving en TNO.
- Port of Rotterdam, 2023, *Bunker sales Port of Rotterdam. 2021 – 2022*.
- Prehn, M. (2021), 'Climate strategy in the balance who decides?', *Marine Policy* 131.
- Ros et al, (2022), *Advancements in ship-based carbon capture technology on board of LNG-fuelled ships*
- Rosenberg, A. & A.M. Leitaó (2023), *Mapping of Zero-Emission Pilots and Demonstration Projects. Fourth Edition*, Getting to Zero Coalition, Global Maritime Forum.
- Ricardo & DNV (2023), *Study on the readiness and availability of low- and zero-carbon ship technology and marine fuels*, London: International Maritime Organization, <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/WhatsNew/Documents/MEPC80.INF10.pdf>
- RIVM (2023), *Greenhouse gas emissions in the Netherlands 1990-2021. National Inventory Report 2023*, Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.
- Ship & Bunker (2022), *Feature: 10 years of bunker prices. FEATURE: 10 Years of Bunker Prices.* <https://shipandbunker.com/news/world/366958-feature-10-years-of-bunker-prices>
- Ship & Bunker (2023), *Global Average Bunker Prices - Global 20 Ports Average*. Geraadpleegd op 11 September 2023. <https://shipandbunker.com/prices/av/global/av-g20-global-20-ports-average>
- Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP), 2011. [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Technical%20and%20Operational%20Measures/Resolution%20MEPC.203\(62\).pdf](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Technical%20and%20Operational%20Measures/Resolution%20MEPC.203(62).pdf)
- Sumaila, U.R., M. Walsh, K. Hoareau et al. (2021), 'Financing a sustainable ocean economy', *Nature Communications* 12:3259.
- TNO (2023), *TNO kennisinbreng mobiliteit voor Klimaat- en Energieverkenning (KEV) 2022*, Amsterdam: TNO.
- TNO & Marin (2021), *Validation scheme for the Green Deal for Shipping, Inland Shipping and Ports (C-230) – Validation of alternative fuels, hydrogen in a combustion engine*.
- Transport & Environment, 2022, *EU ports climate performance; an analysis of supply chain and at-berth emissions*
- UNCTAD (2022), *Review of maritime transport 2022*, New York: United Nations Publications.
- Verbeek, 2015. R. Verbeek, M. Verbeek: *LNG for trucks and ships: fact analysis: Review of pollutant and GHG emissions*. TNO report 2014 R11668. Date February 2015.
- WKR (2023), *Wetenschap onderstreept noodzaak tot versterking klimaatbeleid*. Brief van de Wetenschappelijke Klimaatraad aan de voorzitter van de Tweede Kamer der Staten-Generaal, WKR2023-003.

Wong, W.F. (2022), 'The round trip effect: Endogenous transport costs and international trade', *American Economic Journal: Applied Economics*, 14 (4), 127-166, <https://doi.org/10.1257/app.20190721>

Statistieken

CBS Statline, 2022, Emissies naar lucht op Nederlands grondgebied

CBS (2023), *Biotransportbrandstoffen; aanbod, verbruik en bijmenging*, <https://opendata.cbs.nl/stat-line/#/CBS/nl/dataset/84714NED/table?ts=1692002450738>; geraadpleegd op 14-08-2023.

Eurostat (2019), Country level - gross weight of goods handled in main ports, by type of cargo https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/product/page/mar_mg_am_cwhc

Eurostat (2023a), Maritime transport – main annual results. Country level – gross weight of goods handled in all ports, [Statistics | Eurostat \(europa.eu\)](#). Geraadpleegd op 24-05-2023.

Eurostat (2023b). Passagiers van en aan boord in Europese havens. [Statistics | Eurostat \(europa.eu\)](#). Geraadpleegd op 24-05-2023.