

# Levenscyclusanalyse voor duurzame binnenvaart op de Zuid-Hollandse vaarwegen

Samenvatting

Q.I. van der Knokke



# Levenscyclusanalyse voor duurzame binnenvaart op de Zuid-Hollandse vaarwegen

door

Q.I. van der Knokke

Nederlandstalige samenvatting van de masterscriptie  
“Life-Cycle Assessment for Sustainable Inland Shipping on South Holland’s Waterways”.

Het volledige onderzoeksverslag en gerelateerde digitale materialen  
zijn te vinden op <https://static.quan.cat/inlandshipping>.

Projectduur: September 2023 – Februari 2024  
Begeleid door: Drs. L.F.C.M. van Oers Universiteit Leiden  
Dr.ir. J.F.J. Pruyn TU Delft  
Ewald Vonk Provincie Zuid-Holland

Voor vragen of opmerkingen over dit onderzoek kan contact op worden genomen  
met de auteur op [quan@vanderknokke.nl](mailto:quan@vanderknokke.nl).



# Samenvatting

In het kader van een transitie naar duurzaam vervoer van personen en goederen is het terugdringen van klimaat- en milieueffecten in elke sector belangrijk. Dit is ook het geval voor de binnenvaart, die van nature efficiënter is dan weg- of luchtvervoer, en zeker in Zuid-Holland, waar de binnenvaart al verantwoordelijk is voor een aanzienlijk deel van het goederenvervoer.

Twee soorten milieueffecten zijn van belang: klimaatverandering, veroorzaakt door broeikasgassen zoals CO<sub>2</sub>, en plaatselijke milieu- en gezondheidseffecten (zoals verzuring of luchtverontreiniging), veroorzaakt door de uitstoot van bijvoorbeeld fijnstof, stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>) en zwaveloxiden (SO<sub>x</sub>).

Om meer kennis te verkrijgen over een mogelijke energietransitie in de binnenvaart, worden in dit onderzoek de milieueffecten van de Zuid-Hollandse binnenvaartsector in kaart gebracht door middel van een levenscyclusanalyse (LCA). Deze techniek zet de verschillende soorten milieueffecten van verschillende systemen naast elkaar, en maakt het mogelijk om deze te vergelijken. In dit geval wordt er gekeken naar negen verschillende energiesystemen voor een binnenvaartschip van gemiddeld formaat, dat voornamelijk containers vervoert tussen Alphen aan de Rijn en Rotterdam of Antwerpen. Deze energiesystemen bestaan uit een motortechniek (verbrandingsmotor, brandstofcel, en/of elektromotor) en een energiedrager (diesel, verschillende soorten waterstof, of accucontainers). Bovendien wordt er gekeken naar hoe deze milieueffecten zullen veranderen in de loop van de 21ste eeuw, volgens een scenario waarin het elektriciteitsnet geleidelijk volledig hernieuwbaar wordt, en diesel uit wordt gefaseerd en vervangen wordt door bio- en synthetische diesel.

De resultaten van het onderzoek wijzen erop dat de grootste bijdragen aan de milieueffecten van de binnenvaart veroorzaakt worden bij het varen (voor verbrandingsmotoren, voornamelijk het gebruik van diesel, en bovenal bij motoren van een oudere standaard) en het produceren van de brandstof (voor diesel en waterstof), en dat ook de productie van accu's (voor batterij-elektrisch varen) en brandstofcellen (voor varen op een waterstof-brandstofcelsysteem) een zekere bijdrage leveren. De milieueffecten van andere onderdelen van de levenscyclus van een schip, zoals het produceren en onderhouden van het schip zelf, de infrastructuur en het produceren en verwerken van motorolie zijn in verhouding klein. De grootste bijdrage aan klimaatverandering komt door de uitstoot van CO<sub>2</sub>, en de grootste bijdragen aan plaatselijke milieu- en gezondheidseffecten zijn de uitstoot van fijnstof, NO<sub>x</sub> en SO<sub>x</sub>.

Als deze verschillende systemen met elkaar worden vergeleken, blijkt dat batterij-elektrisch varen de grootste besparing van (klimaat- én plaatselijke) milieueffecten oplevert, zelfs met de elektriciteitsmix van 2020 – en deze winst groeit naarmate de elektriciteitsmix verder verduurzaamt. Dit geldt voor het onderzochte schip, dat voornamelijk korte routes vaart en daarom regelmatig van accu's zou kunnen wisselen. Een binnenvaartschip dat langere afstanden moet varen en niet onderweg kan stoppen om van accu's te wisselen verliest mogelijk dit voordeel, als de extra milieueffecten van accuproductie groter zijn dan de winst bij het varen. In dat geval is waterstof in een brandstofcelsysteem een goed alternatief om de uitstoot bij het varen te beperken.

De milieuwinst van waterstof is minder helder dan voor accu's. De productie van grijze waterstof (geproduceerd uit aardgas) of blauwe waterstof (ook geproduceerd uit aardgas, maar waarbij CO<sub>2</sub> waar mogelijk wordt afgevangen en opgeslagen) heeft ook flinke milieueffecten, zeker wat klimaatverandering betreft. De productie van waterstof uit elektriciteit via elektrolyse (gele waterstof, of als de elektriciteit volledig hernieuwbaar is, groene waterstof) heeft lage klimaateffecten met de verwachte hernieuwbare elektriciteitsmix op de lange termijn, maar zeer hoge klimaateffecten met de elektriciteitsmix van nu, omdat het omzetten van elektriciteit naar waterstof en terug minder efficiënt is dan het direct gebruiken van elektriciteit uit accu's. Waterstof kan ook toegepast worden in een verbrandingsmotor, maar dit is minder efficiënt, en qua milieueffecten alleen wenselijker dan brandstofcellen als het motorvermogen zodanig groot is dat de productie van brandstofcellen zwaarder weegt dan de besparing in uitstoot bij het varen, wat voor de gemiddelde binnenvaartmotor niet het geval is.

Bio- en synthetische diesel zijn ook een optie om de klimaateffecten van de binnenvaartsector te verminderen, als deze alternatieve brandstoffen geproduceerd worden door hernieuwbare bos- en landbouw. Ook de lokale milieueffecten van het varen kunnen afnemen, maar dit staat tegenover veel grotere lokale effecten bij het produceren van de brandstoffen. Een belangrijkere drempel bij het invoeren van deze brandstoffen in de binnenvaart is de grote druk op land- en watergebruik. Als de hele Nederlandse binnenvaartsector van bio- en synthetische brandstof wordt voorzien, is daarvoor een landoppervlak ter grootte van Overijssel voor nodig. Hierdoor zijn bio- en synthetische diesel geen realistische oplossing voor de hele sector, maar mogelijk is er een kleine rol voor deze brandstoffen weggelegd bij zeer grote schepen over zeer lange afstanden die niet onderweg kunnen stoppen voor het verwisselen van accu's of bijtanken van waterstof.

Deze conclusies passen in bestaande beleidsplannen op provinciaal, landelijk, en Europees niveau. Zo bestaan er subsidies voor het vervangen van oude dieselmotoren of het toepassen van nabehandelingssystemen, wat lokale milieu- en gezondheidseffecten flink terug kan dringen. En het stimuleren van samenwerking, innovatie en ondersteuning op het gebied van varen op accu's (korte afstanden) of waterstof (lange afstanden) draagt bij aan het terugbrengen van klimaat- én milieueffecten.

# Inhoudsopgave

<b>Samenvatting</b>	<b>iii</b>
<b>1 Inleiding en methode</b>	<b>1</b>
1.1 De binnenvaart in Zuid-Holland . . . . .	1
1.2 Kansen en uitdagingen in de energietransitie van de binnenvaart . . . . .	1
1.3 Probleemdefinitie . . . . .	3
1.4 Systeem en data . . . . .	5
<b>2 Resultaten</b>	<b>7</b>
2.1 Klimaatverandering en plaatselijke milieu- en gezondheidseffecten . . . . .	7
2.2 Gebruik van fossiele brandstoffen en schaarse grondstoffen . . . . .	13
2.3 Land- en watergebruik . . . . .	14
<b>3 Discussie en conclusies</b>	<b>15</b>
3.1 Interpretatie van de resultaten . . . . .	15
3.2 Welk energiesysteem is het beste? . . . . .	17
3.3 Conclusies voor beleidsmakers en andere belanghebbenden . . . . .	17
3.4 Conclusies voor verder onderzoek . . . . .	17
<b>Bronvermelding</b>	<b>19</b>







# Inleiding en methode

Om klimaatverandering tegen te gaan, de natuur te beschermen, en de gezondheid onder de bevolking te verbeteren, is het belangrijk om de schadelijke uitstoot van elke sector in te perken.

Één van de sectoren waarvoor het terugbrengen van uitstoot erg belangrijk maar ook erg moeilijk is, is de transportsector. In 2020 was transport verantwoordelijk voor 16,2% van de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen, die klimaatverandering veroorzaken. De grootste bijdrage hieraan komt van weg- en luchtvervoer, maar ook vervoer over water levert hier een flink aandeel (1,7% van het wereldwijde totaal) aan (Ritchie e.a., 2020). Bovendien gaan de schadelijke milieueffecten van vervoer verder dan alleen broeikasgassen: lokale luchtvervuiling door verbrandingsmotoren heeft schadelijke gevolgen voor milieu en gezondheid.

In dit onderzoek wordt gekeken naar de klimaat- en milieueffecten, en de mogelijkheden voor het terugbrengen hiervan, van één specifieke branche binnen de transportsector: de binnenvaart. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een levenscyclusanalyse (LCA) en gegevens over de binnenvaartsector in Zuid-Holland.

## 1.1. De binnenvaart in Zuid-Holland

De term “binnenvaart” kan worden samengevat als het vervoer van personen of goederen over binnenwateren (rivieren, kanalen, meren, enz.) door middel van binnenvaartschepen. De binnenvaartsector kenmerkt zich door een grote diversiteit aan soorten goederen vervoerd, soorten en maten schepen, en vaarprofielen.

In Zuid-Holland speelt de binnenvaart een grote rol in het vervoer van goederen: 41% van het goederenvervoer vindt plaats over water, 50% meer dan het Nederlandse gemiddelde (van der Geest & De Leeuw van Weenen, 2016). De vele waterwegen, de Rijndelta, en de haven van Rotterdam, die zich in Zuid-Holland bevinden, dragen hieraan bij.

## 1.2. Kansen en uitdagingen in de energietransitie van de binnenvaart

Vervoer over water heeft een inherent efficiëntie-voordeel over weg- en luchtvervoer dankzij de lage wrijving tussen schip en water. Tegelijkertijd heeft vervoer over water, waaronder ook de binnenvaart, bepaalde schadelijke milieueffecten die verminderd moeten worden. Deze milieueffecten kunnen onderverdeeld worden in **klimaatverandering**, veroorzaakt door de uitstoot van broeikasgassen zoals CO<sub>2</sub>, en **plaatselijke milieu- en gezondheidseffecten** (zoals verzuring of luchtverontreiniging), veroorzaakt door de uitstoot van bijvoorbeeld fijnstof, stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>) en zwaveloxiden (SO<sub>x</sub>).

Deze milieueffecten komen voornamelijk voort uit het verbranden van diesel, de fossiele brandstof die de energiedrager voor vrijwel de gehele binnenvaartsector is. Ondanks de hierboven genoemde efficiëntie is de uitstoot van bepaalde stoffen in verhouding hoog, omdat binnenvaartschepen en de voortstuwingssystemen hiervan een lange levensduur hebben, en de implementatie van nieuwe emissienormen hierdoor erg traag gaat. Naast de brandstofverbranding bij het varen komt er ook schadelijke uitstoot vrij bij het fabriceren van

binnenvaartschepen en voortstuwingssystemen, het produceren van de brandstof en oliën, het aanleggen en onderhouden van vaarwegen, en het verwerken van afvalstromen.

### 1.2.1. Voortstuwingssystemen en energiedragers

Een *shortlist* van kansrijke technieken voor een duurzamere binnenvaart (EICB & TNO, 2021), gebaseerd op milieuvoordelen en economische haalbaarheid, vat deze samen in twee mogelijkheden: **schonere verbrandingsmotoren** en **elektrificatie**. Elektromotoren zijn uitstootvrij bij het varen, en ook schonere verbrandingsmotoren (bijvoorbeeld onder de nieuwe EURO VI-standaard voor wegmotoren, die verder gaat dan de huidige Stage V-standaard voor de binnenvaart) kunnen een flink lagere uitstoot van plaatselijk vervuilende stoffen hebben. In combinatie met een brandstofcelsysteem kan elektriciteit verkregen worden uit brandstoffen zoals waterstof zonder het te verbranden.

Om ook de uitstoot van CO<sub>2</sub> te verlagen moet een schoon voortstuwingssysteem gecombineerd worden met een nieuwe energiedrager. Hiervoor bestaan veel mogelijke opties, waaronder (Arcos & Santos, 2023; Cozzolino, 2018; EICB & TNO, 2021; European Commission, Joint Research Centre & Moirangthem, 2016; Valera-Medina e.a., 2018):

**Biodiesel** Een brandstof vergelijkbaar met diesel in toepassing, maar gemaakt van plantaardige of dierlijke vetten. Biodiesel kan als duurzaam beschouwd worden (met netto nul CO<sub>2</sub>-uitstoot) als het geproduceerd wordt uit een hernieuwbare energiebron, zoals koolzaadolie uit duurzame landbouw.

**Synthetische diesel** Een andere dieselvervanger, die op verschillende manieren geproduceerd kan worden (o.a. biomassa vergassen, en dan omzetten naar een vloeibare brandstof via het Fischer-Tropsch-proces). Net als biodiesel kan synthetische diesel als duurzaam beschouwd worden als het geproduceerd wordt uit een duurzame energiebron, bijvoorbeeld biomassa uit hernieuwbare bosbouw.

**Methanol** Methanol is een brandstof in gasvorm, dat voornamelijk geproduceerd wordt met aardgas of door het vergassen van kolen. Methanol heeft een laag zwavelgehalte, en het is mogelijk om bio-methanol op grote schaal te produceren (European Commission, Joint Research Centre & Moirangthem, 2016).

**Ammoniak** Ammoniak (NH<sub>3</sub>) is een brandstof die op verschillende manieren geproduceerd kan worden, waaronder uit waterstof. Als deze waterstof duurzaam geproduceerd wordt, is ammoniak een duurzame brandstof die efficiënter op te slaan en te vervoeren is dan waterstof zelf. Tegelijkertijd is ammoniak mogelijk te onveilig om toegepast te worden in de binnenvaart.

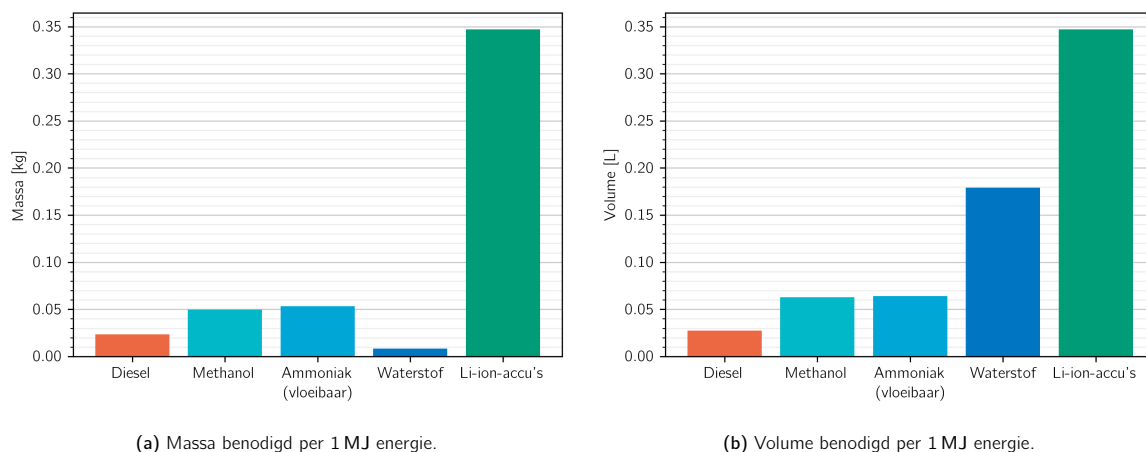
**Waterstof** Waterstofgas (H<sub>2</sub>) is een brandstof in gasvorm die uitsluitend bestaat uit waterstofmoleculen. Het kan geproduceerd worden uit water (en energie, uit een fossiele brandstof of uit elektriciteit), en kan gebruikt worden als brandstof waarbij geen CO<sub>2</sub> en weinig of geen plaatselijke vervuiling vrijkomt.

**Elektrische accu's** In plaats van een brandstof kan elektriciteit direct gebruikt worden in een elektromotor, door het aan boord van een schip op te slaan in lithium-ion accu's.

Behalve kosten en ontbrekende infrastructuur voor grootschalige productie, is er een grote praktische beperking voor de toepassing van nieuwe energiedragers in de binnenvaart. Diesel heeft een zeer hoge energiedichtheid (weinig massa en volume per hoeveelheid energie), terwijl deze andere energiedragers – en zeker accu's – veel meer gewicht en ruimte innemen aan boord van een schip (zie Figuur 1.1).

### 1.2.2. Relevante beleidstrends

Op provinciaal, landelijk en Europees niveau zijn er veel beleidstrends die het ontwikkelen van een duurzame binnenvaartsector bevorderen. Zo bestaan er belangrijke samenwerkingen tussen overheden en de industrie (rederijen, verscheepers, scheepswerven, havens) op het gebied van onderzoek naar en ontwikkeling van duurzame scheepvaart op accu's of waterstof. Toekomstige strengere regels omtrent uitstoot van broeikasgassen en verontreinigende stoffen zullen de noodzaak van duurzame binnenvaart nog verder onderstrepen. Er bestaan ook al subsidies voor het toepassen van schonere verbrandingsmotoren voor binnenvaartschepen, en voor het toepassen van nieuwe technieken zoals varen op accu's.



**Figuur 1.1:** Massa en gewicht per 1 MJ energie van een aantal relevante energiedragers (EICB & TNO, 2021; Valera-Medina e.a., 2018; Wolfram, 2022).

## 1.3. Probleemdefinitie

In dit onderzoek wordt de milieupact van de binnenvaart in kaart gebracht door de jaarlijkse levenscyclus-uitstoot van één binnenvaartschip te bekijken. Daarbij worden een aantal van de bovenstaande kansrijke alternatieve voortstuwingssystemen en energiedragers vergeleken, en wordt rekening gehouden met een toekomstscenario waarin de mix van energiebronnen in het elektriciteitsnetwerk verduurzaamt, en waarin diesel geleidelijk vervangen wordt door biodiesel en synthetische diesel. Dit kan worden samengevat in de volgende onderzoeksvraag:

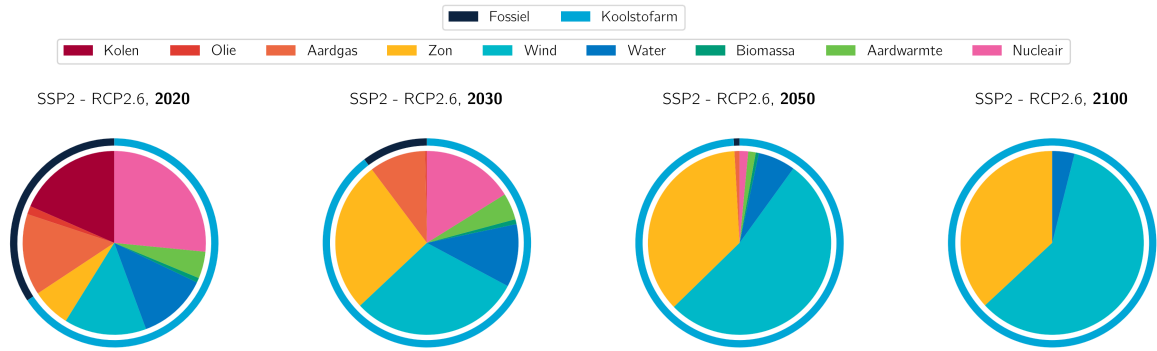
### 🔍 Onderzoeksvraag

Wat is zijn de milieueffecten, en de processen die hier het meest aan bijdragen, van de levenscyclus van de binnenvaart in Zuid-Holland, als er een vergelijking wordt gemaakt tussen verbrandingsmotoren en elektromotoren, en tussen diesel, bio-/synthetische diesel, waterstof, en lithium-ion-accu's als energiedragers, met inachtnaam van een toekomstige energietransitie?

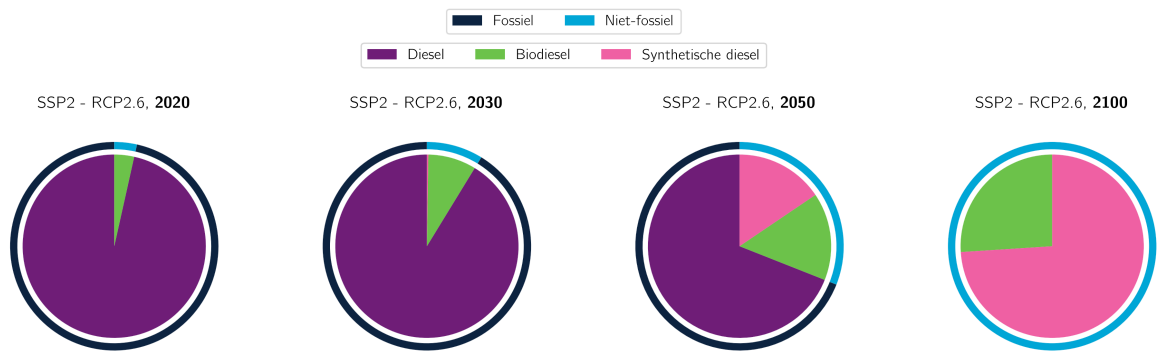
### 1.3.1. Scenario

In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van een scenario voor toekomstige sociaal-economische ontwikkelingen. Dit is gebaseerd op het een *shared sustainability pathway* (SSP), ontwikkeld door het IPCC (Arias e.a., 2021), dat toegepast wordt om een database voor levenscyclus-data (LCI) te verkrijgen met aanpassingen voor toekomstige ontwikkelingen in met name de energie- en vervoerssectoren. Er is gekozen voor het scenario SSP2-RCP2.6, met ontwikkelingen gebaseerd op een voortzetting van trends uit het verleden, maar met gemiddelde klimaatmaatregelen in lijn met het Akkoord van Parijs. Dit is toegepast op de LCI-database met het model *REMIND* (Baumstark e.a., 2021).

In het onderzoek wordt gekeken naar resultaten voor milieupact met de scenario-data voor de jaartallen 2020, 2030, 2050, en 2100. Met name van belang is hoe in deze jaartallen de beschikbaarheid van energiebronnen in het elektriciteitsnet (steeds groter aandeel hernieuwbare elektriciteit) en van dieselalternatieven (geleidelijke uitfasering van fossiele diesel en vervanging door bio-/synthetische diesel) veranderen. Dit wordt weergegeven in respectievelijk Figuur 1.2 en Figuur 1.3. Het contrast tussen het eerste jaartal (2020) en het laatste jaartal (2100) is groot: aan het einde van de eeuw wordt er in dit scenario alleen hernieuwbare elektriciteit (zon, wind, en een klein aandeel waterkracht) en alternatieve diesel geproduceerd. Dit gaat uiteraard gepaard met andere vergaande veranderingen in de onderliggende data, zoals verbeteringen in efficiënties, vervoersmiddelen, en energieopslag.



Figuur 1.2: Vergelijking van de Europese elektriciteitsmix in de vier onderzochte jaartallen, volgens het gebruikte scenario.



Figuur 1.3: Vergelijking van de Europese dieselmix in de vier onderzochte jaartallen, volgens het gebruikte scenario.

### 1.3.2. Case study-schip

De bedoeling is om tot conclusies te komen die relevant zijn voor de hele sector, maar voor bepaalde berekeningen moet er toch gekozen worden voor een bepaald vaarprofiel. Hiervoor wordt het schip *Leendert-Angelina* genomen, dat gekozen is als gemiddeld voor de Zuid-Hollandse binnenvaart én kansrijk voor hermotorisering met een duurzamer energiesysteem, gebaseerd op een eerdere inventarisatie van de sector (van der Geest e.a., 2023).

Een aantal eigenschappen van dit schip, dat voornamelijk tussen Rotterdam en Alphen aan den Rijn vaart, staan in Tabel 1.1.

Tabel 1.1: Eigenschappen van de *Leendert-Angelina* (De Binnenvaart, 2023; van der Geest e.a., 2023).

Eigenschap	Waarde
Bouwjaar	2002
Tonnage	1700 t
Lengte × breedte × diepgang	85,96 m × 9,50 m × 3,00 m
Motor	Mitsubishi S12R-C2MPTK
Motorvermogen	1278 pk ≈ 940 kW



Figuur 1.4: *Leendert-Angelina* (De Binnenvaart, 2023).

### 1.3.3. Alternatieven

In Tabel 1.2 wordt een overzicht gegeven van de details van de negen verschillende alternatieven die worden vergeleken in deze levenscyclusanalyse. Er wordt gekeken naar diesel, in verbrandingsmotoren onder twee verschillende emissienormen, waterstof van drie verschillende productiemethodes, in een verbrandingsmotor of brandstofcelsysteem, en naar elektrische lithium-ion-accu's.

Tabel 1.2: Details van de energiesystemen en -voorziening van alle alternatieven die worden beschouwd in deze LCA.

Alternatief	Energiebron	Brandstofproductie	Energiedrager	Voortstuwing
ICE.I.Diesel	(a) Ruwe olie	(a) Raffinage	Mix <sup>1</sup> van (a) diesel,	Verbrandingsm., CCR1
	(b) Koolzaadolie	(b) Transesterificatie	(b) biodiesel,	
	(c) Houtsnippers	(c) Vergassing van hout, FT	(c) synthetische diesel	
ICE.V.Diesel	(a) Ruwe olie	(a) Raffinage	Mix <sup>1</sup> van (a) diesel,	Verbrandingsm., Stage V
	(b) Koolzaadolie	(b) Transesterificatie	(b) biodiesel,	
	(c) Houtsnippers	(c) Vergassing van hout, FT	(c) synthetische diesel	
ICE.V.H <sub>2</sub> .Gr	Waterstof	SMR	Waterstof	Verbrandingsm., Stage V
ICE.V.H <sub>2</sub> .Bl	Waterstof	SMR, CO <sub>2</sub> -afvang	Waterstof	Verbrandingsm., Stage V
ICE.V.H <sub>2</sub> .Yl	Elektriciteitsnet <sup>2</sup>	Elektrolyse	Waterstof	Verbrandingsm., Stage V
HFC.H <sub>2</sub> .Gr	Aardgas	SMR	Waterstof	PEM-brandstofcel, accu, elektromotor
HFC.H <sub>2</sub> .Bl	Aardgas	SMR, CO <sub>2</sub> -afvang	Waterstof	PEM-brandstofcel, accu, elektromotor
HFC.H <sub>2</sub> .Yl	Elektriciteitsnet <sup>2</sup>	Elektrolyse	Waterstof	PEM-brandstofcel, accu, elektromotor
BE	Elektriciteitsnet <sup>2</sup>	Direct (via oplaadstation)	Electricity	Accucontainers, accu, elektromotor

## 1.4. Systeem en data

### 1.4.1. Systeemmodel

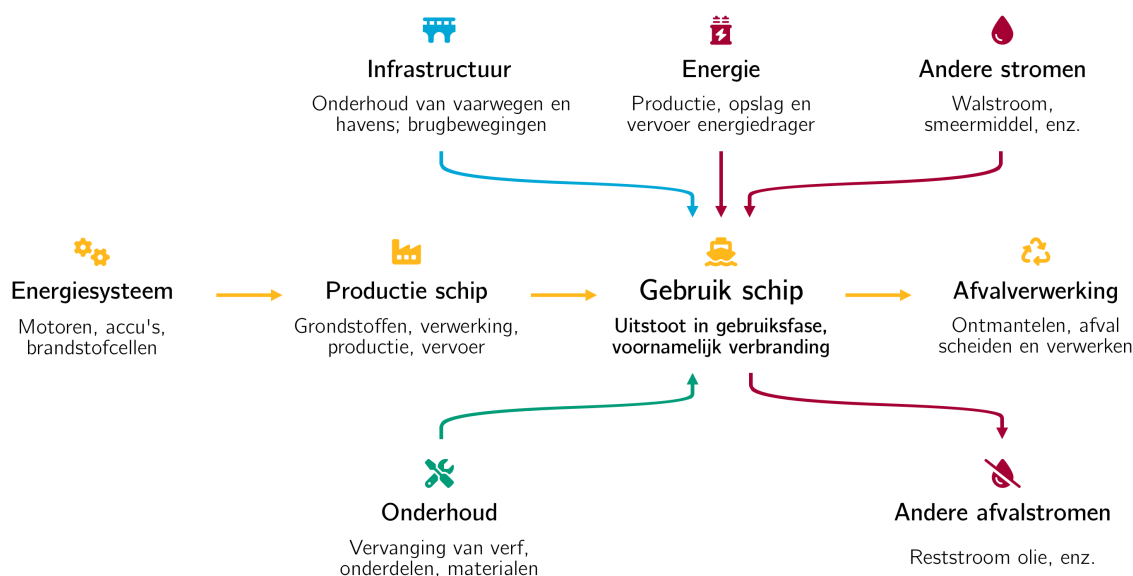
Behalve de uitstoot in de brandstofketen wordt een uitgebreid aantal onderdelen van het binnenvaartsysteem meegenomen in de LCA, waaronder infrastructuur en de levenscyclus van het schip zelf. Dit is afgebeeld in Figuur 1.5. Een uitgebreider overzicht van de systeemmodellen voor de verschillende alternatieven en de bijbehorende dataverzameling is te vinden in het volledige onderzoeksverslag.

### 1.4.2. Levensduur en efficiëntie

In het LCA-model wordt rekening gehouden met de levensduur van elk systeemonderdeel. Bijvoorbeeld: omdat het eindproduct gelijk staat aan één jaar aan vervoer per binnenvaartschip, wordt de milieuimpact voor het produceren en verwerken van een accu met een levensduur van 10 jaar door 10 gedeeld. Verder wordt er bij gebruik van energie en energiedragers rekening gehouden met de efficiëntie van het energiesysteem – voornamelijk gebaseerd op *tank-to-propeller* -efficiënties uit literatuurgegevens. De belangrijkste van de gebruikte levensduren en efficiënties, en de bronnen hiervoor, staan respectievelijk in Tabel 1.3 en Tabel 1.4.

<sup>1</sup>Een mix van fossiele diesel en bio-/synthetische diesel, veranderend in de loop van de eeuw, zoals gemodelleerd in het gebruikte scenario.

<sup>2</sup>Het Europese elektriciteitsnet, waarbij het aandeel hernieuwbare energiebronnen toeneemt in de loop van de eeuw, zoals gemodelleerd in het gebruikte scenario.



**Figuur 1.5:** Versimpelde weergave van de onderdelen van het systeem dat wordt beschouwd binnen de *scope* van dit LCA-onderzoek. Voor elk van deze onderdelen worden de directe en indirecte milieueffecten bepaald.

**Tabel 1.3:** Waardes voor levensduur gebruikt in de LCA.

Onderdeel	Levensd.	Bron
Schip (excl. aandrijving)	60 y	van Hassel, 2013
Verbrandingsmotor	40 y	STC-Nestra e.a., 2015
Elektromotor	40 y	<i>conservatieve schatting</i>
Lithium-ion-accu	10 y	ZES, 2021
Container	15 y	Ecoinvent, 2017
Waterstoftank	10 y	Knop, 2022
Brandstofcel	15 y	Ecoinvent, 2017
Oplaadsysteem accu's	10 y	Sowder, 2023

**Tabel 1.4:** Efficiënties van energiesystemen gebruikt in de LCA.

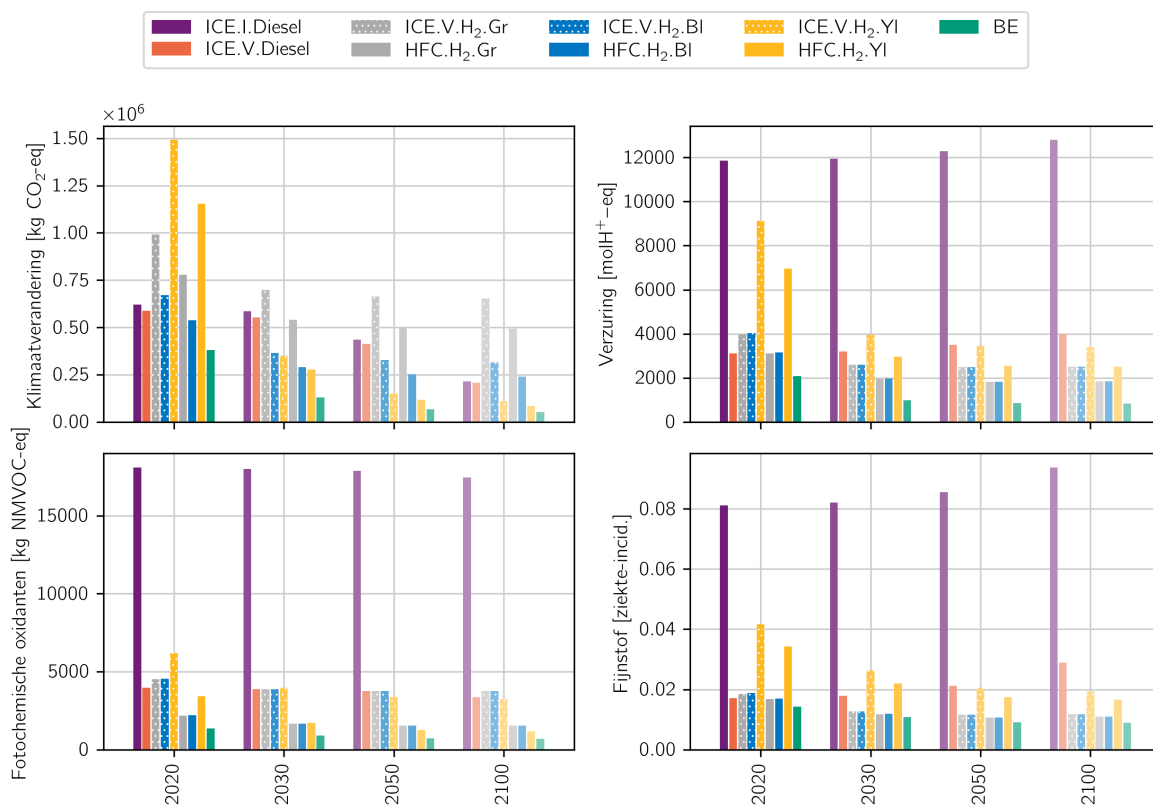
Alternatief	Eff.	Bron
ICE.I.Diesel	36%	Abma en Verbeek, 2017
ICE.V.Diesel	38%	Abma en Verbeek, 2017; Koe-dood Marine Group, 2022
ICE.V.H <sub>2</sub>	33%	Heid e.a., 2021
HFC.H <sub>2</sub>	44%	Boersema e.a., 2023
BE	75%	Albatayneh e.a., 2020

# 2

## Resultaten

### 2.1. Klimaatverandering en plaatselijke milieu- en gezondheidseffecten

In Figuur 2.1 zijn de karakterisatieresultaten van de LCA te zien, in de impactcategorie “klimaatverandering”, en in de impactcategorieën “verzuring”, “vorming van fotochemische oxidanten” en “vorming van fijnstof” (verschillende vormen van plaatselijke milieu- en gezondheidseffecten), volgens de Europese definitie voor impactcategorieën EF v3.1.



Figuur 2.1: Karakterisatieresultaten van de levenscyclusanalyse, voor impactcategorieën met betrekking tot klimaatverandering en plaatselijke milieu- en gezondheidseffecten.

### Uitleg karakterisatieresultaten

In grafieken met karakterisatieresultaten, zoals Figuur 2.1, worden de verschillende alternatieven met elkaar vergeleken. Elke grafiek behandelt een andere *impactcategorie* (vorm van milieupact), en in elke grafiek stelt elke staaf de totale impact van een bepaald alternatief voor. Elke groep staven is één van de verschillende jaartallen, zodat de verhouding tussen de verschillende alternatieven kan worden vergeleken én hoe deze in de loop der tijd kan worden verwacht te veranderen.

### Interactieve resultaten

Een interactieve versie van de resultaten is beschikbaar op [https://qlcav.quan.cat/?project=inland\\_shipping](https://qlcav.quan.cat/?project=inland_shipping)). Hier kunnen de resultaten worden gesorteerd en gefilterd, en kunnen er meer scenario's en impactcategorieën bekeken worden.

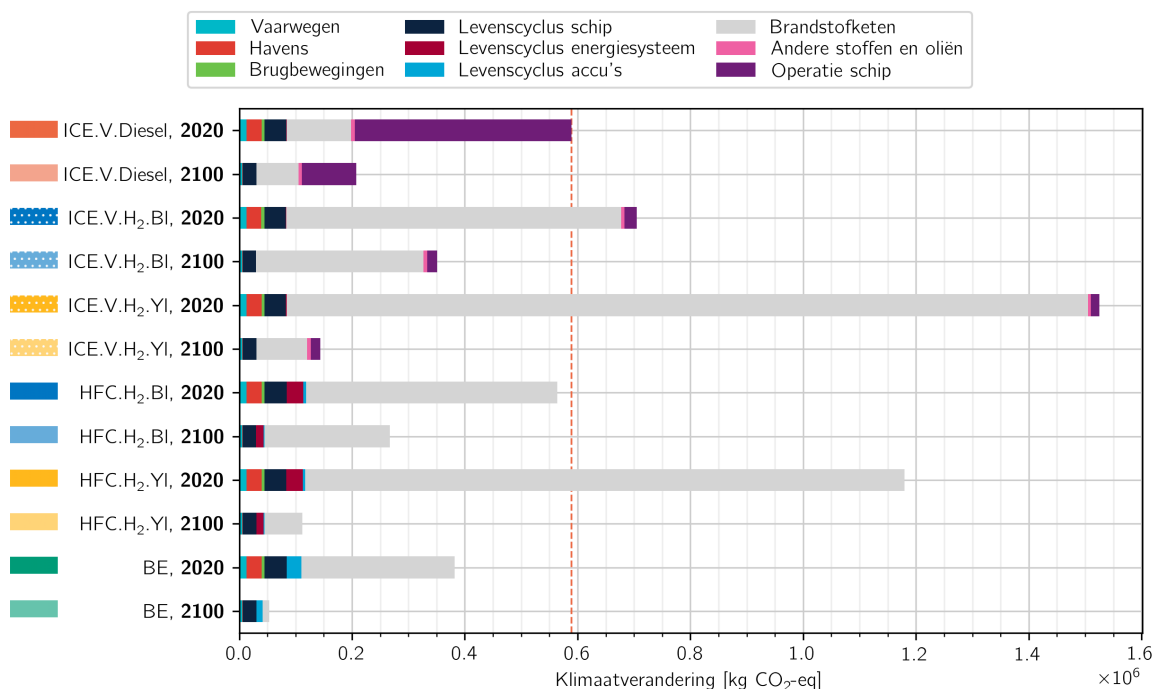
Deze webapplicatie, de *LCA Viewer*, is ontwikkeld voor dit onderzoek, maar kan ook gebruikt worden voor resultaten van andere LCA-onderzoeken. De code is te vinden op <https://github.com/Q-Quan/LCAViewer>.

## 2.1.1. Contributieanalyse

In Figuur 2.2, Figuur 2.3 en Figuur 2.4 is te zien hoe de resultaten van verschillende impactcategorieën tot stand komen, door ze op te splitsen naar bijdrage van de verschillende systeemonderdelen.

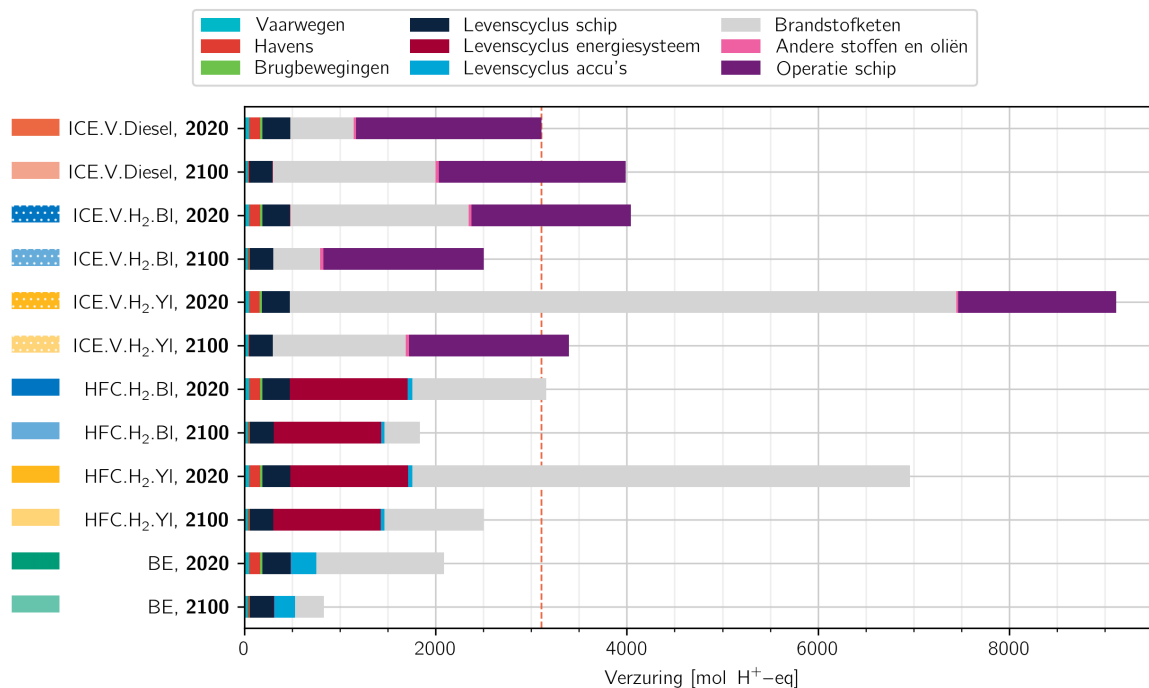
### Uitleg contributieanalyse

In de grafieken van de contributieanalyses hoort elke grafiek weer bij een verschillende impactcategorie. Elke balk stelt de milieupact van één van de alternatieven/jaartal voor, en de balk is opgesplitst in verschillende gekleurde segmenten, die de bijdrage aan het totaal van bepaalde systeemonderdelen of uitgestoten stoffen aangeven.

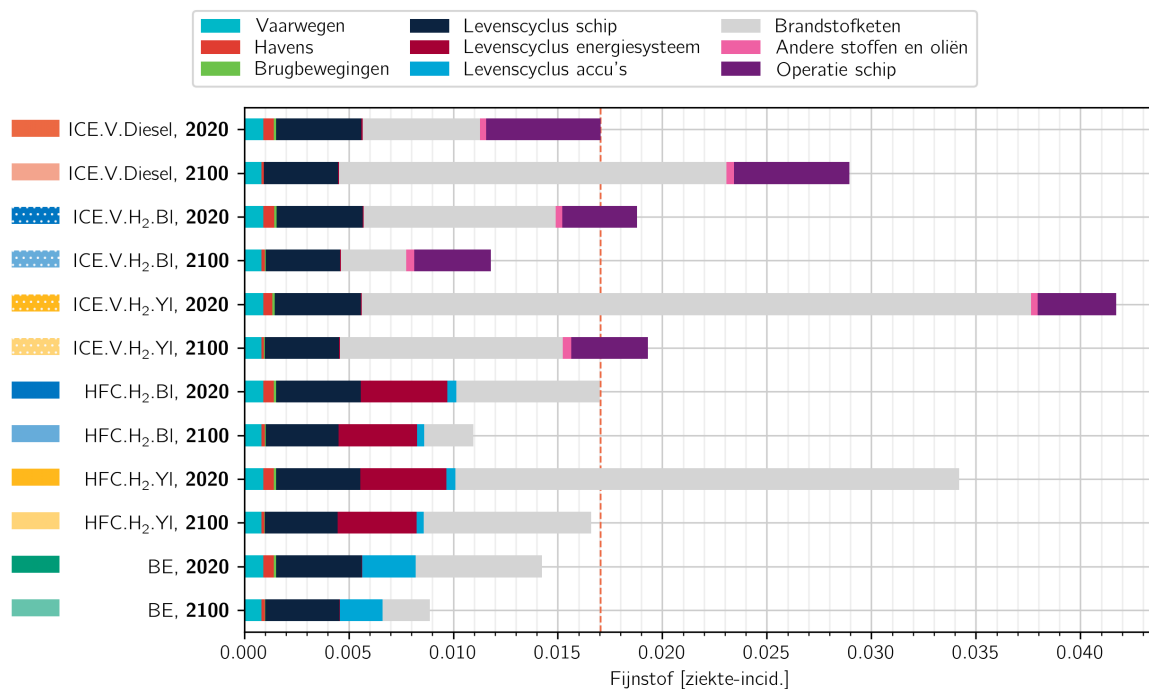


Figuur 2.2: Contributieanalyse van de impactcategorie klimaatverandering, opgesplitst per systeemonderdeel.



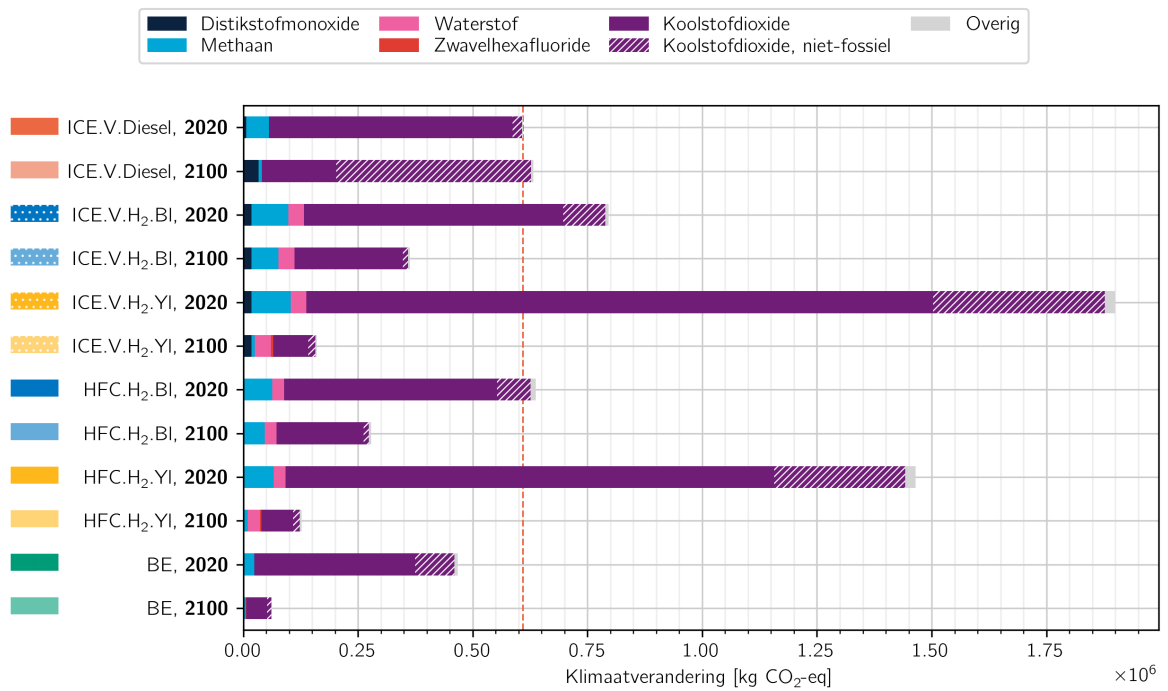


Figuur 2.3: Contributieanalyse van de impactcategorie verzuring, opgesplitst per systeemonderdeel.

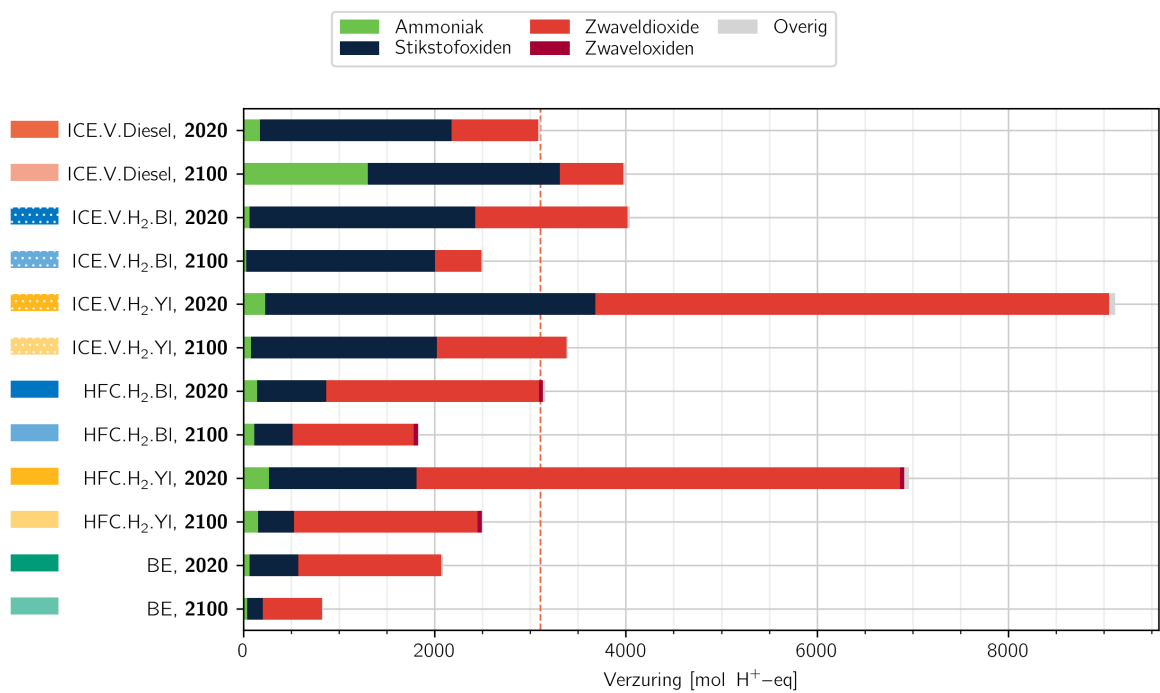


Figuur 2.4: Contributieanalyse van de impactcategorie vorming van fijnstof, opgesplitst per systeemonderdeel.

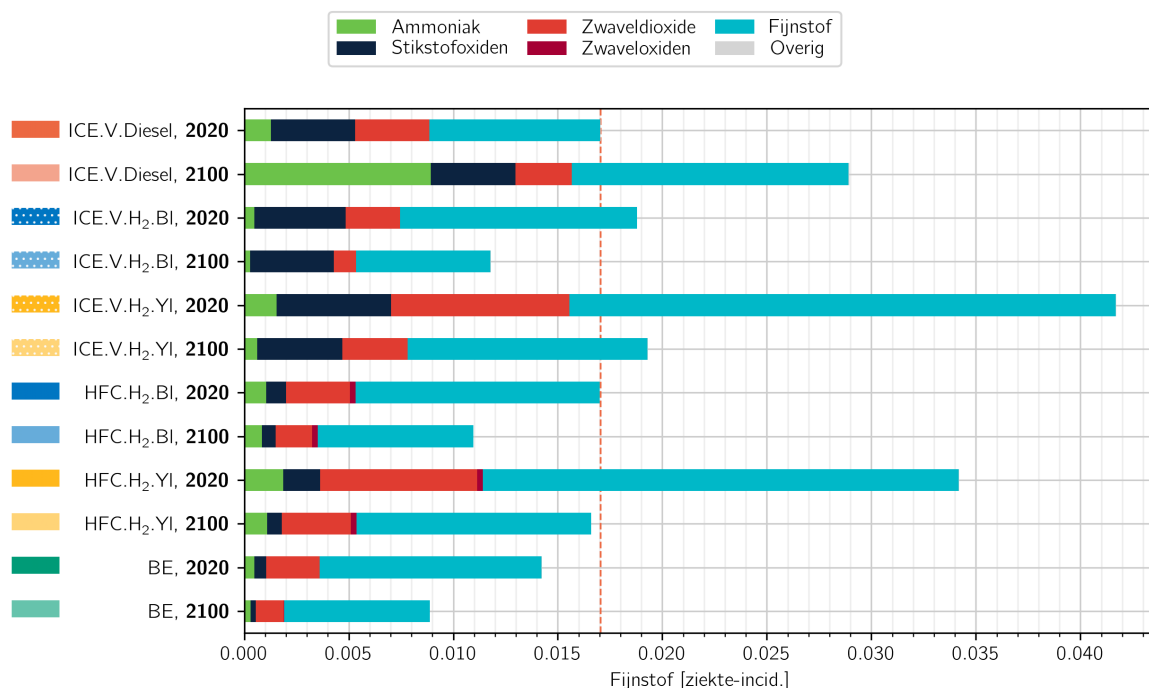
In Figuur 2.5, Figuur 2.6 en Figuur 2.7 is een tweede contributieanalyse te zien, opgesplitst naar bijdrage van de verschillende uitgestoten stoffen.



Figuur 2.5: Contributieanalyse van de impactcategorie klimaatverandering, opgesplitst per uitgestoten stof.



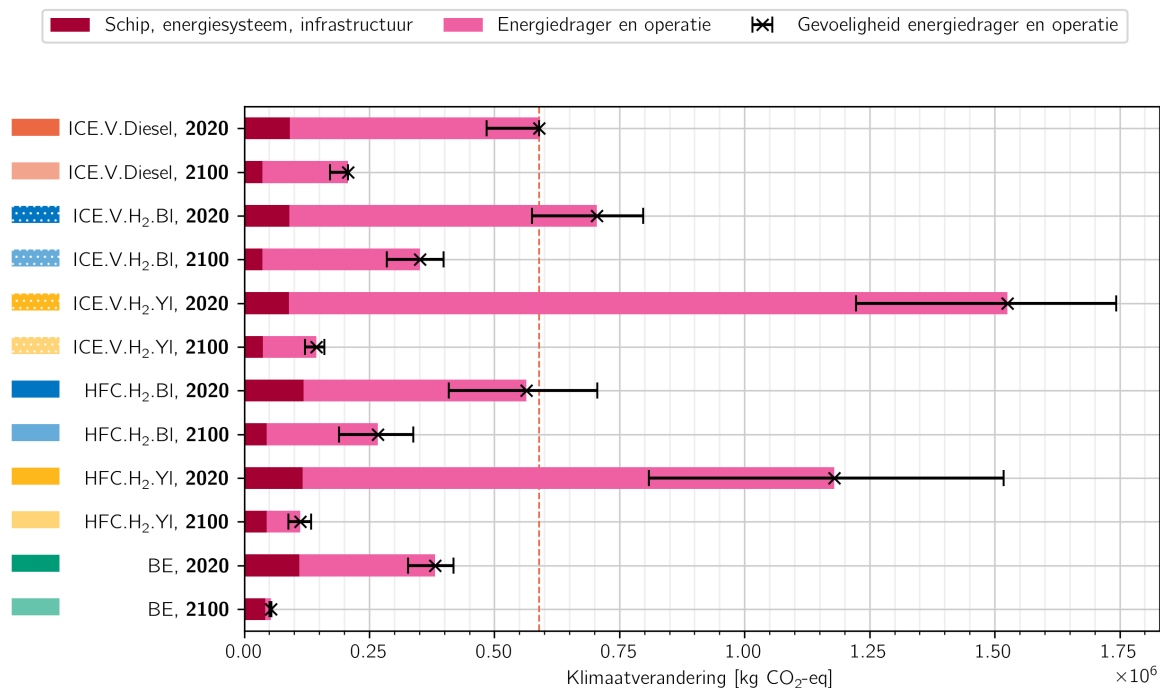
Figuur 2.6: Contributieanalyse van de impactcategorie verzuring, opgesplitst per uitgestoten stof.



Figuur 2.7: Contributieanalyse van de impactcategorie vorming van fijnstof, opgesplitst per uitgestoten stof.

### 2.1.2. Efficiëntie van energiesystemen

De efficiëntiecijfers gegeven in Tabel 1.4 zijn zorgvuldig gekozen, maar beschikbare gegevens over de efficiënties van energiesystemen kunnen erg verschillen. In Figuur 2.8 zijn de foutmarges veroorzaakt door de mogelijke efficiëntiewaardes te zien, voor de impactcategorie klimaatverandering.



Figuur 2.8: Gevoeligheidsanalyse naar efficiëntie van energiesystemen van de impactcategorie klimaatverandering.

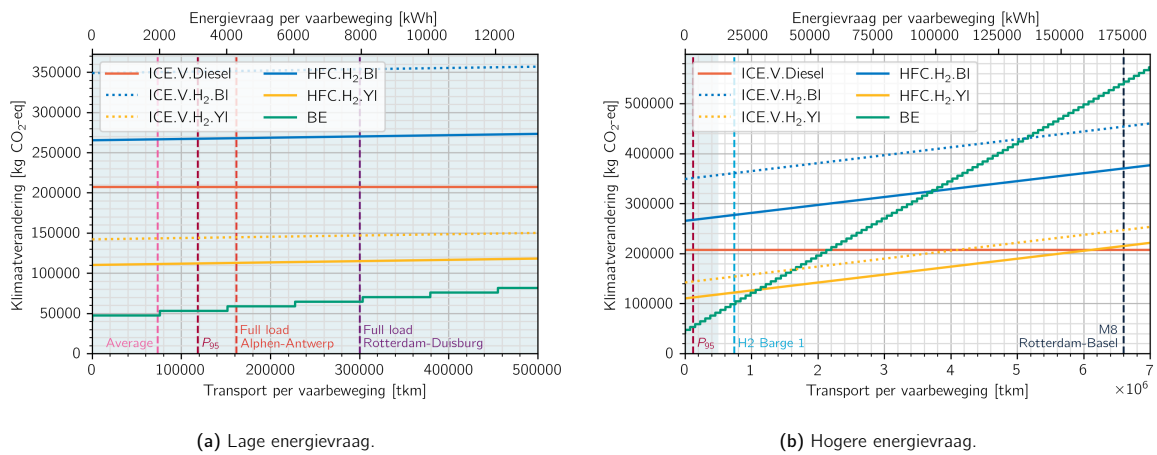
### 2.1.3. Energievraag en motorvermogen

In dit onderzoek is uitgegaan van het vaarprofiel van de *Leendert-Angelina*, met een korte vaarafstand en gemiddelde afmetingen. Hierdoor is er in het model rekening gehouden met een lage energievraag per vaarbeweging (weinig energie-opslag nodig aan boord), en een motor van gemiddelde maat en vermogen.

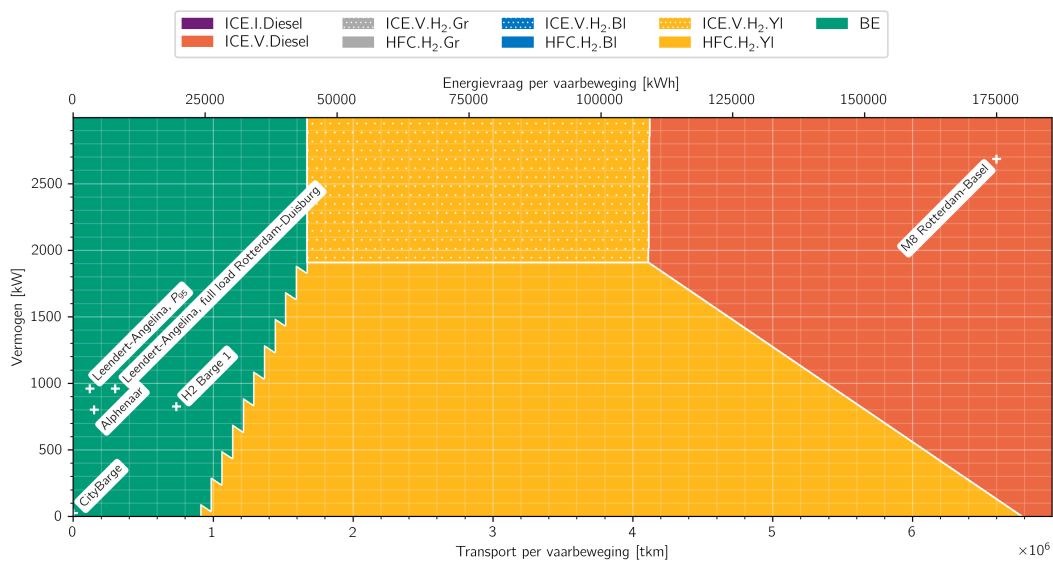
In Figuur 2.9 is te zien hoe de resultaten in de impactcategorie klimaatverandering veranderen afhankelijk van de energievraag per vaarbeweging. ■■■■■ batterij-elektrisch varen begint met de laagste impact op klimaatverandering (2100), maar verliest dit voordeel boven een bepaalde energievraag, door de extra uitstoot die vrijkomt bij het produceren van accu's.

Figuur 2.10 toont een vergelijkbare grafiek, waarin rekening wordt gehouden met de energievraag én het motorvermogen. Deze grafiek is gekleurd naar het alternatief met de laagste impact op klimaatverandering (2100), afhankelijk deze twee eigenschappen.

In de grafieken staan een paar andere vaarprofielen aangegeven ter vergelijking.



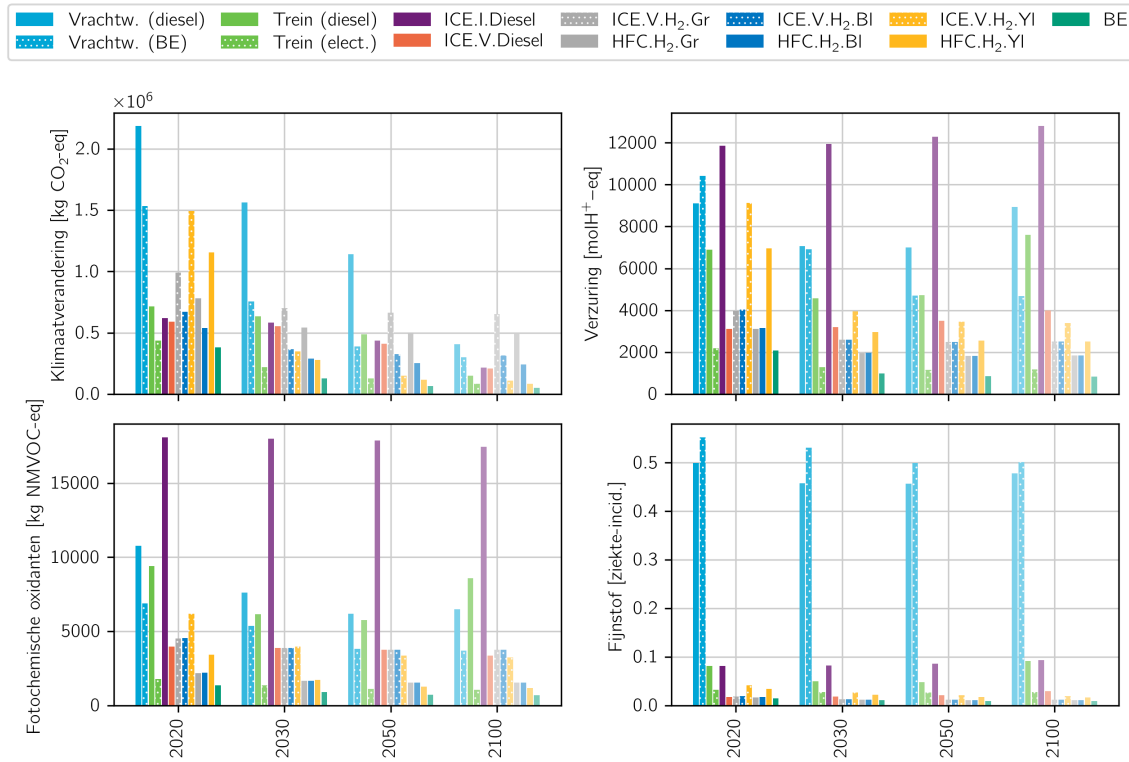
Figuur 2.9: Gevoeligheidsanalyse naar energievraag per vaarbeweging van de impactcategorie klimaatverandering (2100).



Figuur 2.10: Gevoeligheidsanalyse naar energievraag per vaarbeweging en motorvermogen, gekleurd naar alternatief met de minste impact, van de impactcategorie klimaatverandering (2100).

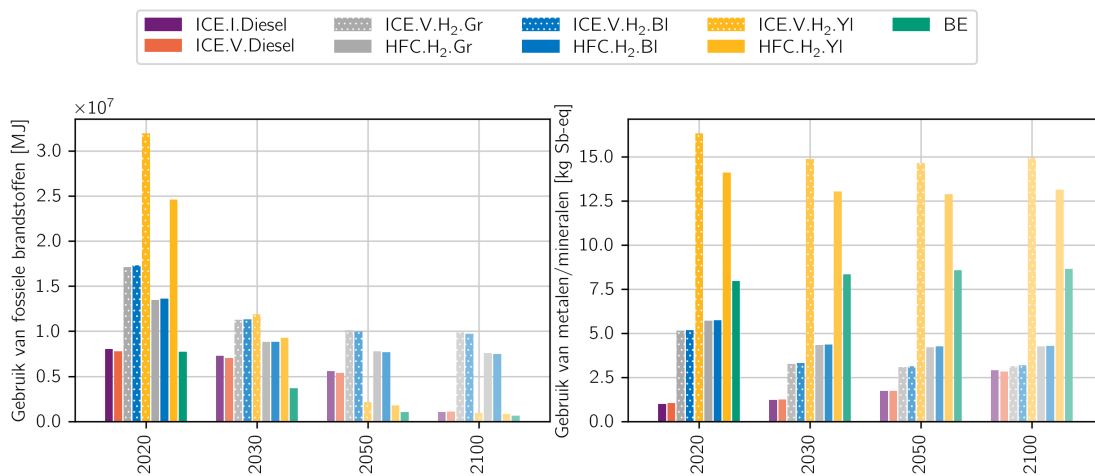
### 2.1.4. Vergelijking met andere vervoersmodaliteiten

Om de verkregen resultaten in context te plaatsen worden in Figuur 2.11 de verkregen resultaten vergeleken met de milieueffecten van vervoer per vrachtwagen (diesel of elektrisch) en goederentrein (diesel of elektrisch). Deze gegevens zijn verkregen uit levenscyclus-databases gebaseerd op andere LCA-onderzoeken, en zijn vergelijkbaar in scope met de resultaten van dit onderzoek.



Figuur 2.11: Karakterisatieresultaten, inclusief vergelijking met databasegegevens voor vervoer per vrachtwagen of goederentrein.

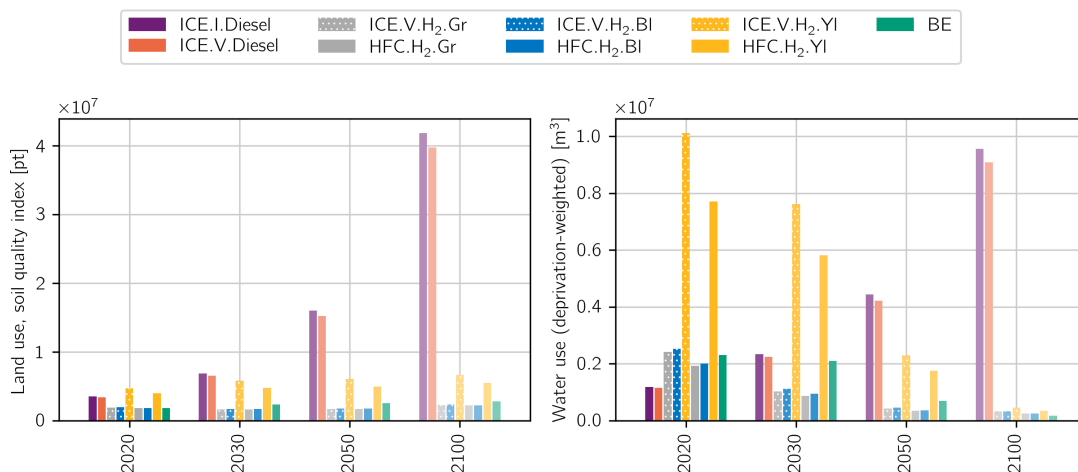
## 2.2. Gebruik van fossiele brandstoffen en schaarse grondstoffen



Figuur 2.12: Karakterisatieresultaten van de LCA, voor impactcategorieën met betrekking tot gebruik van grondstoffen.

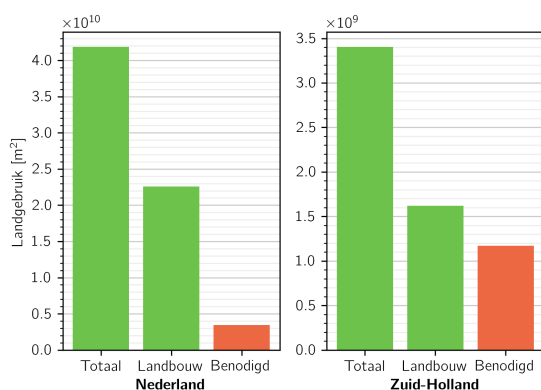
Figuur 2.12 toont resultaten in de impactcategoriëen “gebruik van fossiele brandstoffen” en “gebruik van metalen/mineralen”. Zoals te verwachten is het gebruik van fossiele brandstoffen hoog met de achtergrondgegevens van 2020 en daalt dit effect in de loop der tijd, naarmate een energietransitie plaatsvindt. Meer opvallend is dat het gebruik van schaarse metalen/mineralen minder hoog is voor accu's dan voor het gebruik van gele waterstof. Dit komt doordat er in het elektriciteitsysteem (waar voor gele waterstof inefficiënt mee wordt omgegaan) verschillende schaarse materialen gebruikt worden die zeldzamer zijn, en dus een grotere bijdrage leveren, dan het lithium dat in accu's verwerkt wordt.

### 2.3. Land- en watergebruik

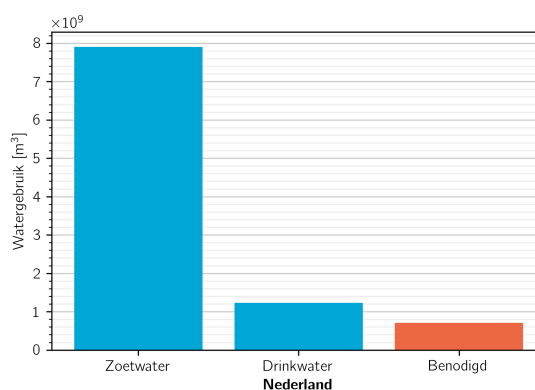


Figuur 2.13: Karakterisatiereultaten van de LCA, voor impactcategoriëen met betrekking tot gebruik van land en water.

Figuur 2.13 toont het effect op land- en watergebruik van de verschillende alternatieven. In beide gevallen heeft diesel (2100) de grootste impact (met de productie van gele waterstof in 2020 uitgezonderd, die hoog scoort bij watergebruik vanwege verdamping uit stuwmeren). In Figuur 2.14 en Figuur 2.15 wordt deze impact van diesel concreet gemaakt, door de benodigde landoppervlakte en volume water te vergelijken met het totaal momenteel beschikbare land en water. Hieruit blijkt dat het produceren van bio- en synthetische diesel een onrealistisch hoge druk uitoefent op land en water: zo zou er voor de hele Nederlandse binnenvaart ongeveer 12% van het totale Nederlandse landoppervlak nodig zijn.



Figuur 2.14: Landoppervlakte nodig om de hele Nederlandse/Zuid-Hollandse binnenvaartsector van bio- en synthetische diesel te voorzien, in vergelijking met de huidige landbouwgrondoppervlakte en totale oppervlakte.



Figuur 2.15: Watergebruik nodig om de hele Nederlandse binnenvaartsector van bio- en synthetische diesel te voorzien, in vergelijking met het totale gebruik van zoetwater en de huidige productie van drinkwater in Nederland.

# 3

## Discussie en conclusies

### 3.1. Interpretatie van de resultaten

Er zijn veel verschillende dingen te reserveren in de LCA-resultaten met betrekking tot de verschillende potentiële energiedragers en voortstuwingssystemen voor de binnenvaart. Geen van deze is “de beste oplossing” in elk opzicht: welk alternatief de voorkeur verdient hangt af van welke vormen van milieuimpact belangrijker worden gevonden, of prioriteit wordt gegeven aan voor- en nadelen op korte of lange termijn, en welk type binnenvaartschip en vaarprofiel wordt bekeken.

#### 3.1.1. Emissieloos varen

“Emissieloos varen”, een term die vaak gebruikt wordt als het gaat om duurzame binnenvaart, is per definitie alleen mogelijk met een batterij-elektrische of brandstofcel-oplossing, omdat er bij een verbrandingsmotor altijd uitstoot vrijkomt. Uit de resultaten blijkt dat een batterij-elektrische oplossing inderdaad de meest milieuvriendelijke oplossing is – met de laagste impact voor klimaatverandering én plaatselijke milieu- en gezondheidseffecten – en dat waterstof-brandstofcellen ook een kansrijk alternatief zijn. Maar andere resultaten tonen aan dat er belangrijke praktische overwegingen zijn die deze oplossingen minder kansrijk maken.

Tegelijkertijd moet ook gezegd worden dat “emissieloos varen” niet betekent dat er geen milieuimpact is. Zelfs in het meest gunstige geval blijft er bepaalde uitstoot bestaan elders in de keten. In het geval van waterstof wordt er veel uitstoot ‘verplaatst’ van de operatiefase naar de brandstofketen, wat *burden shifting* wordt genoemd, en met achtergrondgegevens voor 2020 is deze uitstoot in totaal hoger dan die van varen op diesel.

#### 3.1.2. Batterij-elektrisch varen

Wanneer de hele levenscyclus in beschouwing wordt genomen en er wordt gekeken naar de verwachte ontwikkeling voor 2030 en daarna, blijkt een batterij-elektrische oplossing de meest gunstige te zijn voor het onderzochte binnenvaartschip. Deze oplossing heeft de laagste impact op klimaatverandering, verzuring, vorming van fijnstof en fotochemische oxidanten, en het gebruik van fossiele brandstoffen. Daarentegen is het gebruik van metalen/minerale grondstoffen relatief hoog en neemt ook het land- en watergebruik matig toe in vergelijking met het huidige geval (fossiele diesel).

Zoals te zien is in Sectie 2.1.3, neemt het voordeel van elektrische accu's af naarmate er meer energiec capaciteit aan boord nodig is, vanwege de grote milieuimpact van accuproductie. Wat klimaatverandering betreft is dit alternatief niet meer voordelig vereiste energiec capaciteit van meer dan ongeveer 25 000 kWh. Boven deze grens heeft waterstof een kleiner effect op klimaatverandering. Afhankelijk van toekomstige ontwikkelingen in accutechnologie of de levensduur van accu's zou deze grens hoger kunnen komen te liggen.

In de praktijk kan het zo zijn dat economische en praktische beperkingen eerder optreden dan dit omslagpunt. Een batterij-elektrische oplossing kan goedkoper zijn over de gehele levensduur van een binnenschip, maar vergt veel hogere initiële investeringskosten dan een verbrandingsmotor voor diesel, voornamelijk door de productie van batterijen. En er zijn praktische beperkingen aan het aantal accu's dat een binnenschip kan vervoeren. Met ongeveer 2500 kwh per accucontainer (met huidige batterijtechnologie) wordt het onpraktisch of zelfs onmogelijk om voldoende accucontainers voor een lange route te aan boord te hebben. Een oplossing hiervoor is het onderweg stoppen om accu's te wisselen, maar de haalbaarheid hiervan hangt af van hoe vaak dat nodig zou zijn, wat weer afhangt van de accucapaciteit en de lading van het schip.

Voor korte vaarroutes en lichte ladingen, zoals kleinschalig of modulair vervoer over korte afstanden, blijft een batterij-elektrische oplossing het beste alternatief.

### 3.1.3. De verschillende kleuren waterstof

Er zijn drie soorten waterstof bekeken in dit onderzoek: grijze waterstof (geproduceerd uit aardgas), blauwe waterstof (grijze waterstof, met afvang en opslag van CO<sub>2</sub>), en gele waterstof (geproduceerd uit elektriciteit via elektrolyse). Op de lange termijn, met het gebruikte scenario voor verduurzaming van het elektriciteitsnet, is deze gele waterstof gelijk aan groene waterstof.

Wat verduurzaming en afschalen van fossiele brandstof betreft is deze gele/groene waterstof dan ook de enige langetermijnoplossing. Na elektrische batterijen is gele waterstof (in een brandstofcel of verbrandingsmotor) de energiedrager met de laagste impact op de klimaatverandering, voor achtergrondgegevens voor 2050 of later. Opgemerkt moet worden dat de productie van gele waterstof minder dan half zo efficiënt is als rechtstreeks gebruik van elektriciteit via accu's, vanwege inefficiënties en verliezen bij omzetting, transport en opslag, wat ook bevestigd wordt uit de resultaten.

Wat plaatselijke milieu- en gezondheidseffecten (verzuring, fijnstof) betreft is gele waterstof echter niet de meest milieuvriendelijke vorm van waterstof. Voor deze twee impactcategorieën zijn de effecten van gele waterstof vergelijkbaar met die van diesel (Stage V), wat 25% tot 50% hoger dan die van grijze of blauwe waterstof is. Het moet belangrijk om het in gedachten te houden dat deze effecten plaatsvinden in een ander deel van het gemodelleerde systeem (bij brandstofproductie in het geval van waterstof, en bij het varen in het geval van diesel) en dus op een andere geografische locatie; voor de provincie Zuid-Holland is de uitstoot van waterstofproductie misschien minder dringend om aan te pakken omdat deze vooral plaats zouden vinden in industriegebieden, verder weg van bevolkingscentra en waarschijnlijk gemakkelijker af te vangen of te beperken, in tegenstelling tot uitstoot langs vaarwegen.

In ieder geval is het voor de invoering van waterstof (geel/groen, als het beperken van klimaatverandering de hoogste prioriteit heeft) als brandstof belangrijk dat de infrastructuur voor de productie en distributie van waterstof aanzienlijk wordt opgeschaald ten opzichte van wat nu beschikbaar is, en dat er onderzoek wordt gedaan naar het verbeteren van de efficiëntie en de technologie voor het afvangen van puntbronnen in de noodzakelijke productieprocessen voor waterstof/elektriciteit. Bestaande projecten en samenwerkingsverbanden in Zuid-Holland en de rest van Nederland zijn hier een goede basis voor.

### 3.1.4. Waterstof in verbrandingsmotoren of brandstofcellen

Voor waterstof zijn er twee verschillende energiesystemen onderzocht: verbranding in een verbrandingsmotor, vergelijkbaar met een dieselmotor, of directe elektriciteitsproductie in een brandstofcel. Een verbrandingsmotor is praktischer en goedkoper om toe te passen maar stoot nog steeds NO<sub>x</sub> en fijnstof uit. In de LCA-resultaten scoort een brandstofceloplossing hierdoor steeds net wat beter in de impactcategorieën voor plaatselijke milieu- en gezondheidseffecten dan de verbrandingsmotor.

De gevolgen voor klimaatverandering zijn ook lager voor een brandstofcel, evenals het gebruik van land en water, vanwege het efficiëntere gebruik van waterstof in een brandstofcel dan een verbrandingsmotor.

### 3.1.5. Varen op biodiesel en synthetische diesel

Bio-/synthetische diesel heeft geen last van de praktische bezwaren die accu's en (in mindere mate) waterstof ondervinden: het is toe te passen in diesel-verbrandingsmotoren en heeft een hoge energiedichtheid,



waardoor het makkelijk op te slaan en te vervoeren is, ook voor lange vaarroutes. Daar staat tegenover dat de milieuwinst beperkt is: elektriciteit en waterstof kan de impact op klimaatverandering verder terugdringen, en de impact op plaatselijke milieu- en gezondheidseffecten stijgt zelfs door extra uitstoot bij het produceren van bio-/synthetische diesel.

Een belangrijker bezwaar voor de grootschalige toepassing van bio-/synthetische diesel in de binnenvaartsector is te zien in Sectie 2.3: de druk op land en water nodig voor land- en bosbouw die dit voor zou stellen is onredelijk groot. Dit probleem wordt in alle waarschijnlijkheid groter in de toekomst, door verwachte vraag naar deze brandstoffen door andere sectoren, concurrentie met voedselvoorziening, en afname in vruchtbaar land door klimaatverandering. Hierdoor is er waarschijnlijk maar een beperkte rol weggelegd voor bio-/synthetische diesel in de toekomst van de binnenvaart, zoals voor vaarbewegingen met een zeer hoge energievraag.

### 3.2. Welk energiesysteem is het beste?

Zoals uit deze discussiepunten blijkt, zijn elektrische accu's de ideale energiedrager voor een binnenvaartschip wat milieueffecten betreft, zolang de benodigde energiec capaciteit aan boord laag is. Als er meer energiec capaciteit nodig is, zou een schip waterstof kunnen gebruiken (uit elektrolyse met behulp van hernieuwbare elektriciteit, voor een minimale impact op klimaatverandering). Een vloeibare brandstof zoals bio-/synthetische diesel kan nog steeds worden overwogen, maar alleen voor zeer hoge energiec capaciteiten en als een van de andere genoemde energiedragers niet mogelijk is, ook niet door andere opties zoals het onderweg wisselen van accu. Al deze brandstoffen zijn geschikt voor een elektrisch aandrijfsysteem (zelfs diesel, indien nodig in een hybride elektrisch systeem), hoewel waterstof beter kan worden gebruikt in een verbrandingsmotor in plaats van een brandstofcel als het vereiste vermogen erg hoog is. Al deze overwegingen kunnen worden samengevat in een beslisboom, weergegeven in Figuur 3.1.

In de beslisboom wordt alleen rekening gehouden met de impactcategorie klimaatverandering, en worden er harde grenzen gegeven op basis van het operationele profiel van *Leendert-Angelina* (gebaseerd op Figuur 2.10). Voor schepen met andere vaarprofielen zullen deze grenzen hoger of lager liggen.

### 3.3. Conclusies voor beleidsmakers en andere belanghebbenden

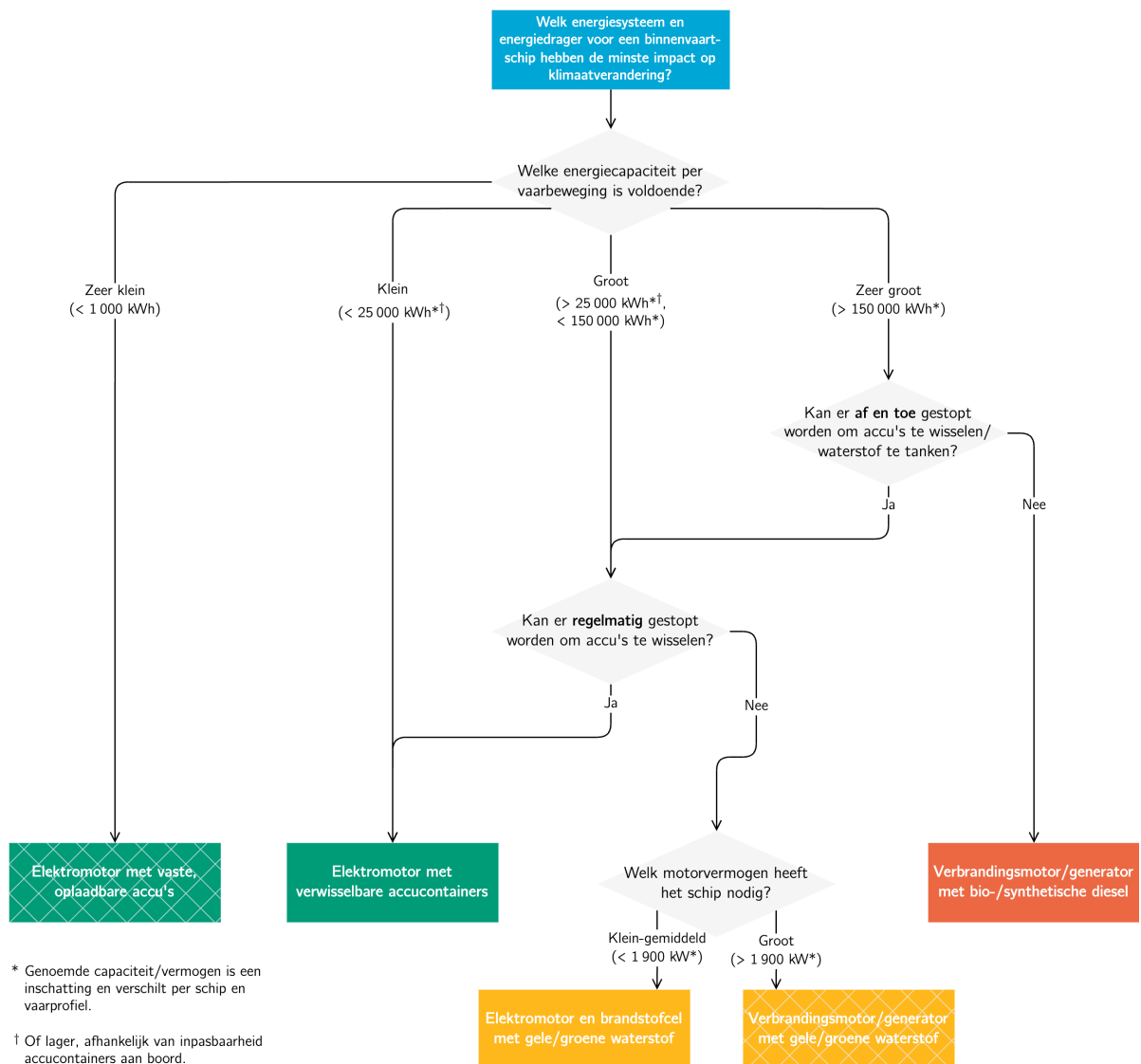
De resultaten van dit onderzoek ondersteunen bestaande beleidstrajecten. Zo worden er subsidies verstrekt voor duurzamere verbrandingsmotoren voor bestaande schepen, wat plaatselijke milieu- en gezondheidseffecten op de korte termijn flink kan beperken. En er bestaan al subsidies of samenwerkingsverbanden ter bevordering van varen op accu's of op waterstof, wat effecten op klimaatverandering kan beperken.

Hierbij moet benadrukt worden dat de gunstige resultaten voor accu's, en met name de tamelijk gunstige resultaten voor waterstof, afhankelijk zijn van het gebruikte toekomstscenario. Het is hiervoor daarom belangrijk dat er op elk niveau ingezet blijft worden op verduurzaming van de energie- en elektriciteitsvoorziening, uitbreiding van netcapaciteit en -stabiliteit, en ontwikkeling van de nodige infrastructuur, bijvoorbeeld voor waterstofproductie, -vervoer, en -opslag.

### 3.4. Conclusies voor verder onderzoek

Dit onderzoek is gebaseerd op veel onderliggende aannames en achtergrondgegevens. Voor een grondiger kwantitatief onderzoek, zoals een uitgebreidere LCA, is het van belang om de invloed op de resultaten van o.a. de geografische locatie goed in kaart te brengen, en om nauwkeurige praktijkmetingen van uitstoot van verschillende binnenvaartbrandstoffen te verkrijgen en te gebruiken. Ook zou zo een onderzoek rekening kunnen houden met nog meer kansrijke brandstoffen, zoals methanol, en mogelijke toekomstige ontwikkelingen in accu-, brandstofcel- en elektrolysetechnologie.

Een breder onderzoek zou rekening kunnen houden met de socio-economische effecten van een mogelijke energietransitie in de binnenvaart. Hierbij kan bijvoorbeeld gekeken worden naar de kosten over de levenscyclus van verschillende alternatieven (*life-cycle cost analysis*, LCCA), of naar de verschillende actoren die hierbij betrokken zijn.



**Figuur 3.1:** Beslisboom voor het optimale energiesysteem en energiedrager voor een binnenvaartschip, wat impact op klimaatverandering betreft, met achtergronddata voor het jaar 2100 en gebaseerd op de eigenschappen en vaarprofiel van de *Leendert-Angelina*.

# Bronvermelding

- Abma, D., & Verbeek, R. (2017, juni 25). *Validated Mathematical Ship Energy Model*. TNO.
- Albatayneh, A., Assaf, M. N., Alterman, D., & Jaradat, M. (2020). Comparison of the Overall Energy Efficiency for Internal Combustion Engine Vehicles and Electric Vehicles. *Environmental and Climate Technologies*, 24(1), 669–680. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2020-0041>
- Arcos, J. M. M., & Santos, D. M. F. (2023). The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production. *Gases*, 3(1), 25–46. <https://doi.org/10.3390/gases3010002>
- Arias, P., Bellouin, N., Coppola, E., Jones, R., Krinner, G., Marotzke, J., Naik, V., Palmer, M., Plattner, G.-K., Rogelj, J., Rojas, M., Sillmann, J., Storelvmo, T., Thorne, P., Trewin, B., Achuta Rao, K., Adhikary, B., Allan, R., Armour, K., ... Zickfeld, K. (2021). Technical Summary. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. Matthews, T. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu & B. Zhou (Red.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (33–144). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>
- Baumstark, L., Bauer, N., Benke, F., Bertram, C., Bi, S., Gong, C. C., Dietrich, J. P., Dirnhaichner, A., Giannousakis, A., Hilaire, J., Klein, D., Koch, J., Leimbach, M., Levesque, A., Madeddu, S., Malik, A., Merfort, A., Merfort, L., Odenweller, A., ... Luderer, G. (2021). REMIND2.1: Transformation and innovation dynamics of the energy-economic system within climate and sustainability limits. *Geoscientific Model Development*, 14(10), 6571–6603. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-6571-2021>
- Boersema, R., Vuijk, W., van Loenhout, J., & Castelijns, M. (2023, oktober 18). *Onderbouwing Aannames Condor H2 Fiche Klimaatfonds I&W*. Condor H2.
- Cozzolino, F. (2018). *Life Cycle Assessment of Biofuels in EU/CH*. Verkregen december 7, 2023, van [https://www.psi.ch/sites/default/files/2019-09/Cozzolino\\_377125\\_%20Research%20Project%20Report.pdf](https://www.psi.ch/sites/default/files/2019-09/Cozzolino_377125_%20Research%20Project%20Report.pdf)
- De Binnenvaart. (2023). *Leendert-Angelina*. De Binnenvaart. Verkregen november 2, 2023, van [https://www.debinnenvaart.nl/schip\\_detail/17058/](https://www.debinnenvaart.nl/schip_detail/17058/)
- Ecoinvent. (2017). *Ecoinvent Database*. Ecoinvent. Verkregen december 4, 2022, van <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>
- EICB & TNO. (2021, april 1). *Toekomst Duurzame Binnenvaart: Samenvatting En Conclusies*. <https://kennis.zuid-holland.nl/onderzoeken/toekomst-duurzame-binnenvaart/>
- European Commission, Joint Research Centre & Moirangthem, K. (2016). *Alternative fuels for marine and inland waterways* (D. Baxter, Red.). Publications Office of the European Union. Verkregen maart 19, 2023, van <https://data.europa.eu/doi/10.2790/227559>
- Heid, B., Martens, C., & Orthofer, A. (2021, juni 25). *How Hydrogen Combustion Engines Can Contribute to Zero Emissions*. McKinsey & Company. Verkregen november 24, 2023, van <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/how-hydrogen-combustion-engines-can-contribute-to-zero-emissions>
- Knop, V. (2022, februari 7). *A World Of Energy - Hydrogen Storage*. Verkregen november 15, 2023, van <http://www.awoe.net/Hydrogen-Storage-LCA.html>
- Koedood Marine Group. (2022). *Stage V*. Koedood Marine Group. Verkregen november 3, 2023, van <https://www.koedood.nl/stage-v/>
- Ritchie, H., Roser, M., & Rosado, P. (2020). CO2 and Greenhouse Gas Emissions. *Our World in Data*. Verkregen februari 20, 2023, van <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>
- Sowder, G. (2023, juli 21). *EV Charger Maintenance Costs Don't Need to Break the Bank*. Qmerit Network. Verkregen december 7, 2023, van <https://qmerit.com/blog/ev-charger-maintenance-costs-dont-need-to-break-the-bank/>
- STC-Nestra, RebelGroup & EICB. (2015, december). *Inventarisatie milieuprestaties bestaande binnenvaartvloot West-Europa* (N072). STC-Nestra. Rotterdam.
- Valera-Medina, A., Xiao, H., Owen-Jones, M., David, W. I. F., & Bowen, P. J. (2018). Ammonia for Power. *Progress in Energy and Combustion Science*, 69, 63–102. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.07.001>
- van der Geest, W., & De Leeuw van Weenen, R. (2016, juni 16). *Kansen voor binnenvaart in de provincie Zuid-Holland*. *Panteia*. Verkregen februari 20, 2023, van <https://www.zuid-holland.nl/publish/pages/14478/eindrapportagekansenvoorbinnenvaartindeprovinciezuid-holland.pdf>

- van der Geest, W., Prins, J., & Hoogland, E. (2023, juli 20). *Schone Binnenvaart Zuid-Holland: Huidige Vloot Op de Provinciale Vaarwegen; Inzichten En Kansen*. Panteia. Zoetermeer.
- van Hassel, E. (2013). *Structuurverandering in het segment van de grote drogeladingbinnenvaartschepen* (Working Papers). University of Antwerp, Faculty of Business and Economics. <https://EconPapers.repec.org/RePEc:ant:wpaper:2013025>
- Wolfram, S. (2022). *Wolfram/Alpha*. Verkregen november 15, 2022, van <https://www.wolframalpha.com>
- Zero Emission Services. (2021). *ZESpack*. Zero Emission Services. Verkregen november 3, 2023, van <https://zeroemissionservices.nl/en/zespac-2/>