



RWS INFORMATIE

Routeradar 2019 Innovatiemonitor

Techniekontwikkeling

Datum: 8 oktober 2020
Status: DEFINITIEF

Colofon

Uitgegeven door	Rijkswaterstaat
Auteur	Uitvoeringsteam Routeradar 2019 <ul style="list-style-type: none">- Stephan van Zyl (TNO)- Maarten Verbeek (TNO)- Ruud Roelen (TNO)- Paul Mentink (TNO)
	Redactie: <ul style="list-style-type: none">- Floris Mulder (RWS)- Katinka Regtien (IenW)- ERAC B.V.
Informatie	Projectleider Floris Mulder
Telefoon	088-797 1111
E-mail	floris.mulder@rws.nl
Datum	8 oktober 2020
Status	Definitief

Inhoudsopgave

Begrippenlijst	5
Afkortingenlijst	7
Managementsamenvatting	9
1. Algemene inleiding.....	12
1.1 Introductie	12
1.2 Doelstelling en doelgroepen	13
2 Methodiek	15
3 Techniekontwikkeling: Energiedragers.....	16
3.1 Inleiding.....	16
3.2 Conventionele brandstoffen (benzine, diesel, LPG).....	16
3.2.1 Feedstock, productie en distributie.....	16
3.3 Elektrisch	16
3.3.1 Feedstock, productie en distributie.....	16
3.4 Waterstof	17
3.4.1 Trends rondom de grondstoffen (feedstock)	17
3.4.2 Technologische ontwikkelingen rondom de productie- en distributie van waterstof.....	20
3.5 Gasvormig.....	21
3.5.1 Feedstock, productie en distributie.....	21
3.6 Vloeibare biobrandstoffen (hoge mixen)	22
3.6.1 Trends rondom de grondstoffen (feedstock)	22
3.6.2 Technische ontwikkelingen rondom de verwerking en het productieproces van biobrandstoffen	24
3.6.3 Technische ontwikkelingen rondom de distributie van biobrandstoffen	27
3.7 Conclusie: techniekontwikkeling energiedragers	27
4 Techniekontwikkeling: Infrastructuur	29
4.1 Inleiding.....	29
4.2 Conventioneel (benzine, diesel, LPG)	29
4.3 Elektrisch	29
4.3.1 Hogere vermogens.....	30
4.3.2 Gelijksstroom laden	30
4.3.3 Inductief laden	31
4.3.4 In-motion charging	31
4.3.5 Smart charging	31
4.4 Waterstof	32
4.5 Gasvormig.....	32
4.6 Vloeibare biobrandstoffen (hoge mixen)	33
4.7 Conclusie: techniekontwikkeling infrastructuur	33
5 Techniekontwikkeling: Vervoermiddelen.....	34
5.1 Inleiding.....	34

5.2	Conventioneel (benzine, diesel, LPG)	34
5.2.1	Benzine	34
5.2.2	Diesel.....	35
5.2.3	LPG.....	36
5.3	Elektrisch	37
5.3.1	Batterijtechnologie.....	37
5.3.2	Batterij management systemen (BMS)	39
5.3.3	Energiemanagementstrategieën (EMS)	39
5.3.4	In-wheel motorconcepten	39
5.3.5	Oplaadtechnieken	40
5.4	Waterstof	40
5.4.1	Brandstofcel.....	40
5.4.2	Waterstof in de verbrandingsmotor	41
5.4.3	Waterstof als bouwsteen voor synthetische brandstoffen	42
5.5	Gasvormig.....	42
5.5.1	Mono-Fuel motoren.....	42
5.5.2	Dual-Fuel motoren	42
5.6	Vloeibare biobrandstoffen (hoge mixen)	43
5.6.1	Wegvervoer	43
5.6.2	Binnenvaart	46
5.6.3	Mobiele werktuigen	47
5.7	Conclusie: techniekontwikkeling vervoermiddelen	47
6	Beleidsadvisering techniekontwikkeling	49
7	Referenties.....	51
8	Bijlagen	52
8.1	Waterstofproductie- en distributieroutes.....	52

Begrippenlijst

Begrip	Toelichting
Brandstofplatform	De maatschappelijke organisatie rond een brandstofspoor veelal bestaande uit bedrijven en industriële organisaties, branche- en maatschappelijke organisaties en regionale overheden. Er zijn vier brandstofplatforms: Formule E-team (FET), Bio-LNG, Duurzame biobrandstoffen en H ₂ Platform.
Brandstofspoor	Het spoor rond de implementatie van een bepaalde energiedrager. Dit spoor bestaat uit de drie velden zoals hieronder genoemd en de maatschappelijke beweging hier omheen.
Duurzame energiedrager in mobiliteit (DEM)	Hiermee refereren we aan de benaming van thema 2 in het Klimaatakkoord. Het betreft hier brandstoffen/energiedragers in transport. In de huidige beleidspraktijk heeft dit betrekking op de transitie van elektriciteit, waterstof en CNG/LNG (verplicht in AfID richtlijn) richting hernieuwbaar en biobrandstoffen. Verwante termen (met andere definities) die in dit verband vaak gebruikt worden zijn: 'alternatieve', 'duurzame' of 'innovatieve' brandstoffen.
Geavanceerde biobrandstoffen	Deze biobrandstoffen zijn gemaakt van grondstoffen zoals genoemd in de Annex 9, lijst A van de REDII.
Indicator	Een meetbaar verschijnsel dat verwijst naar de toestand van (een) sleutelfactor(en), dan wel naar een streefwaarde.
Marktfase	Binnen het innovatieproces worden zes marktfasen onderscheiden: R&D/onderzoekfase, prototype/pilot fase, markt voorbereiding fase, marktintrductie fase, opschalingsfase en beheerfase. In grove lijnen zijn de eerste drie fasen gericht op technologieontwikkeling en de laatste drie fasen op marktontwikkeling (zie hoofdstuk 3 voor een verdere toelichting).
Marktsegment	Waar aan de orde is per veld een nadere onderverdeling gemaakt in marktsegmenten. Vooral het veld vervoermiddelen is opgesplitst in diverse marktsegmenten (personenwagen, bestelwagen, vrachtauto, bussen etc.) aangezien tussen deze marktsegmenten per brandstofspoor grote verschillen kunnen bestaan.
Meetwaarde	De vastgestelde realisatie van de indicator op dit moment (zie datum document Routeradar 2019). Geeft aan hoe het 'nu' gesteld is met de realisatie van een streefwaarde.
Zero-emissie voertuigen	Definitie van zero-emissie voertuigen in kader Nederlands beleidsvoornemen nieuwverkopen personenwagens zero-emissie in 2030: deze beperkt zich tot personenwagens

Begrip	Toelichting
	<p>met tailpipe zero-emissies. Dit komt overeen met emissie vrije voertuigen volgens de Europese typekeuring (ETAP). Dit zijn voertuigen die géén emissietesten hoeven te ondergaan om op de weg te worden toegelaten. In de praktijk komt dit neer op batterij elektrische voertuigen en voertuigen op waterstof.</p> <p>De term zero-emissie wordt door een aantal partijen ook gebruikt voor biobrandstoffen. Aandachtspunt daarbij is dat dit niet betrekking heeft op tailpipe milieu emissies, maar wel dat de inzet van BB over de hele keten genomen een stevige bijdrage kan leveren aan CO₂-reductie.</p>
PMC	Een Product Markt Combinatie is een unieke combinatie van een duurzame energiedrager en een marktsegment, zoals: een waterstof-bus, een batterij-elektrische personenwagen etc.
Sleutelfactor	Omstandigheid die van essentieel belang is voor een product om tot een volgende marktphase te komen.
Streefwaarde	Ambitie die in afstemming met de stakeholders, dan wel beleid is opgesteld voor een afgesproken ijkjaar, ook wel 'zichtjaar' genoemd. Deze wordt uitgedrukt in een bepaalde indicator (bijvoorbeeld: aantal H ₂ tankstations in 2030).
Velden	<p>Elke modaliteit kent drie velden, namelijk:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Energiedragers: de ontwikkeling of productie van de brandstof; - Infrastructuur: de ontwikkeling van tank- en laadinfrastructuur; - Vervoermiddelen: waarin de energiedrager voor de aandrijving gebruikt wordt.

Afkortingenlijst

Afkorting	Uitleg
AC	Adviescommissie
AFID	Alternative Fuels Infrastructure Directive
B7	Diesel
BB	Biobrandstoffen
BEV	Batterij-elektrische voertuigen. Dit type voertuig heeft enkel een elektromotor.
CNG/LNG	Compressed Natural Gas (aardgas)/ Liquid Natural Gas (vloeibaar aardgas)
CO ₂	Koolstofdioxide
DEM	Duurzame Energiedragers Mobiliteit
DK-TI	Demonstratieregeling Klimaattechnologieën en -innovaties in transport
DuMo	Programma directie Duurzame Mobiliteit van I&W
E10	Euro 95 (Benzine met 10% ethanol)
E20	benzine met 20% ethanol
E5	Euro 98 (Benzine met 5% ethanol)
EC	Europese Commissie
ERAC	European and Regional Affairs Consultants
EV	Elektrisch Voertuig
FCEV	Fuel cell electric vehicle (Waterstof elektrisch voertuig)
FCH-JU	Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking
FEV	Volledig elektrische voertuigen (fully-electric vehicles), zelfde als BEVs. Dit type voertuig heeft enkel een elektromotor.
H ₂	Waterstof
HBE	Hernieuwbare brandstofeenheden
HRS	Hydrogen Refuelling Station
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil (dieselvervanger)
IEA	Internationaal Energieagentschap
IenW	Ministerie van Infrastructuur & Waterstaat
INNOM	Routeradar innovatiemonitor
KA	Klimaatakkoord
KC	Kennis Consortium (TNO, CE Delft en ECN)
LEF	LEF staat voor LEF Future Centre: een centrum voor complexe maatschappelijke vraagstukken en uitdagingen. Dit centrum wordt gefaciliteerd door RWS
M&E	Monitoring & Evaluatie programma van DuMo

Afkorting	Uitleg
MIA	Milieu-investeringsaftrek
NEA	Nederlandse Emissieautoriteit
NO _x	Verzamelnaam voor verschillende stikstofoxiden
OEM	Original Equipment manufacturers (autoproducenten)
OKA	Ontwerp Klimaatakkoord
PHEV	Plug-in hybride voertuigen. Dit type voertuig heeft naast een elektromotor ook nog een brandstofmotor
PM	Roetdeeltjes (kunnen verschillende grootte hebben)
PMV	Provinciale Milieu Vordering
R&D	Research & Development
REDII	Renewable Energy Directive II
RWS	Rijkswaterstaat
SDE/ SDE+	Stimulering Duurzame Energieproductie
SBM	Routeradar Straatbeeldmonitor
SMR	Steam Methane Reforming: een chemisch proces waarbij een koolwaterstof in aanwezigheid van stoom en/of zuurstofgas en eventueel een katalysator wordt omgezet in een waterstofrijk gasmengsel (lees: reformaat). De meest toegepaste reformeringstechniek voor het produceren van waterstof is stoomreforming van aardgas.
Stekkerauto	Dit zijn personenauto's met een elektromotor, waarvan de accu kan worden opgeladen met behulp van een stekker. Hieronder vallen zowel volledig elektrische personenauto's (FEV's), die enkel een elektromotor hebben (en emissievrij zijn), als plug-in hybrides (PHEV's).
Tailpipe	Uitlaatpijp (verwijst naar emissies op uitsluitend dit niveau)
TTW	Tank-to-wheel (verwijst naar emissies in dit deel van de keten, dus exclusief productie)
Vamil	Willekeurige afschrijving milieu-investeringen
WTT	Well-to-tank (verwijst naar emissies in dit deel van de keten > dus inclusief productie)
WTW	Well-to-wheel (verwijst naar emissies in gehele keten inclusief productie)
ZEV	Zero-emissie voertuigen
ZE-vervoer	Zero-emissie vervoer

Managementsamenvatting

Algemeen

Energiedragers

Er vinden geen grote ontwikkelingen meer plaats op het gebied van productie en distributie van conventionele energiedragers. Daarentegen wordt de opwekking van elektriciteit steeds duurzamer. Verwacht wordt dat de CO₂-emissie per opgewekte hoeveelheid elektriciteit tussen 2017 en 2030 met ongeveer 80% zal afnemen. Daarnaast zal het elektriciteitsnetwerk in de toekomst anders, maar ook zwaarder worden belast. De vraag naar elektriciteit zal in verschillende sectoren, waaronder mobiliteit, toenemen. Door vraag, aanbod en eventuele buffercapaciteit slim te sturen kan de noodzaak voor verzwaring van het elektriciteitsnetwerk beperkt blijven.

Waterstof wordt momenteel veelal geproduceerd door middel van een gecentraliseerde reformer en gedistribueerd middels "tube trailers" (tankwagens met gecompriëerde waterstof). De productie en distributie van waterstof zullen nog een sterke transitie doormaken. Technologische ontwikkelingen op het gebied van waterstof richten zich op de volgende vlakken:

- Bevoorrading via pijpleiding of lokale productie om de hoeveelheid voertuigbewegingen voor bevoorrading van tankstations in de hand te houden;
- Waterstof als bouwsteen voor synthetische brandstoffen.

Het is nog enigszins onzeker welke route uiteindelijk zal domineren. Wel zullen zowel productie als distributie van waterstof efficiënter worden. De ontwikkelingen bij de productie en distributie van biobrandstoffen vinden op de volgende vlakken plaats:

- Herkomst van de grondstoffen, die gebruikt worden om biobrandstoffen te maken, zowel geografisch als soort grondstof;
- Technische ontwikkelingen rondom de verwerking en het productieproces van biobrandstoffen, waarbij nog onduidelijk is welke technologie uiteindelijk zal doorzetten;
- Technische ontwikkelingen rondom de distributie van biobrandstoffen.

Infrastructuur

Voor de tankinfrastructuur van fossiele brandstoffen worden geen (aanzienlijke) technische ontwikkelingen verwacht. Voor waterstof geldt dat de afvuilsnelheid in de nabije toekomst nog verder zal toenemen. Voor elektriciteit geldt dat de techniekontwikkelingen in de laadinfrastructuur zich in eerste instantie richten op het verhogen van de competitiviteit van elektrisch rijden ten opzichte van voertuigen op conventionele energiedragers. De volgende ontwikkelingslijnen moeten hieraan bijdragen:

- Hogere vermogens moeten de laadsnelheid verhogen en daarmee de laadtijd verlagen en het aantal benodigde laadpalen verminderen;
- Gelijkstroom laden moet bijdragen aan de flexibiliteit van het elektriciteitsnetwerk en (toekomstige) lagere voertuigkosten;

- Inductief laden moet het gebruik van de openbare ruimte verminderen en de beeldvervuiling beperken;
- "In-motion-charging" moet de inzet van het voertuig verder verhogen, door tijdens de rit de accu op te laden. Daarnaast moet het de voertuigkosten verlagen door een kleinere benodigde accucapaciteit;
- Door "smart charging" kan op een "slimme" manier worden bepaald welk voertuig wanneer wordt opgeladen. Hierdoor kan de druk op het elektriciteitsnet worden verminderd en kunnen kosten worden bespaard.

Vervoermiddelen

Er vinden nog steeds verbeteringen en vernieuwingen plaats om verbrandingsmotoren voor conventionele energiedragers zoals benzine en diesel efficiënter en zuiniger te maken, bijvoorbeeld door nieuwe verbrandingsconcepten of warmteterugwinning. Bij batterij-elektrische voertuigen spelen de volgende ontwikkelingen een centrale rol:

- Batterijtechnologie (minder gebruik en afhankelijkheid van kobalt, meer oplaadcycli, "solid-state" batterijen, hogere energie dichtheid, maar ook meer energie-opslag per kilo of volume, lagere kosten per kWh, lagere brandbaarheid, betere recyclebaarheid, lagere CO₂-uitstoot bij de productie);
- Batterij management systemen (BMS), voor een langere levensduur en betere brandveiligheid;
- Energiemanagementstrategieën (EMS);
- "In-wheel" motorconcepten;
- Oplaadtechnieken (snelladen en draadloos laden, bidirectioneel laden zodat elektrische voertuigen als buffer kunnen dienen en er minder verzwaring van het elektriciteitsnetwerk nodig is, smart charging).

Waterstof kan op meerdere manieren in de mobiliteit ingezet worden, bijvoorbeeld als brandstof in een brandstofcel, direct als brandstof in een verbrandingsmotor en als bouwsteen voor synthetische brandstoffen (E-fuels). Deze laatste toepassing lijkt veelbelovend, maar is nog ver verwijderd van praktische grootschalige toepassing. Momenteel zijn brandstofcellen nog kostbaar. Verwacht wordt dat de komende jaren de efficiency en levensduur van brandstofcellen toenemen en de kosten dalen, waardoor waterstof-voertuigen steeds interessanter zullen worden.

Bij LNG- en CNG-voertuigen zijn er ontwikkelingen rondom het verhogen van de efficiency van de "mono-fuel" gasmotor en de reductie van het methaanslip. Bij "dual-fuel" motoren spelen ontwikkelingen als de Westport-injector en RCCI ("reactivity controlled compression ignition"). RCCI bevindt zich echter nog in een vroege fase en zal de komende jaren nog niet beschikbaar zijn voor gebruik in serieproducten.

Beleidsadvisering¹

Op basis van de kennis uit dit rapport is een beleidsadvisering geschreven. De belangrijkste adviezen staan hieronder weergegeven:

¹ Deze beleidsadvisering is onder verantwoordelijkheid van Rijkswaterstaat opgesteld.

- Richt beleidsinstrumenten op een gelijktijdige groei van de energiedrager zelf, de noodzakelijke infrastructuur en de vloot en presenteer deze in onderlinge samenhang;
- Richt beleid op het mobiliteitssysteem én het energiesysteem. Juist in de koppeling liggen de mogelijkheden om maatschappelijke vragen te beantwoorden. Dit levert vaak ook nieuwe business cases op. Zo is Tesla het enige automerk dat in deze coronatijd winst maakt, (mede) omdat ze CO₂-credits verkopen aan fabrikanten die minder duurzame voertuigen verkopen [NOS, 2020];
- Onderzoek de mogelijke gevolgen voor de veiligheid wanneer er verschillende duurzame energiedragers worden aangeboden bij hetzelfde tankstation ("multifuel" tankstations);
- Onderzoek wat de ideale looptijd en voorwaarden zijn voor vergunningen bij tank- en laadinfrastructuur en hoe deze meer flexibel kunnen meebewegen met de ontwikkelingen in de markt. Daarbij bestaat er een spanningsveld tussen kortlopende vergunningen, die flexibel kunnen inspringen op innovaties en lange termijn concessies (15 jaar), die door de langere afschrijvingstijd de business case voor investeringen in duurzame infrastructuur verbeteren;
- Voorkomen moet worden dat er op korte termijn veel infrastructuur wordt gerealiseerd die op middellange termijn technisch achterhaald is (lock-in effect). Mogelijk zal bij de start de infrastructuur overgedimensioneerd (moeten) worden. Het advies is om samen met de sector te kijken welke mix van technologie (modulair bouwen), financieringsinstrumenten (voor risico investeringen) en normering hier het beste resultaat gaat geven;
- Onderzoek de gevolgen van mobiliteit op het lokale energiesysteem, bijvoorbeeld door mobiliteit verplicht op te nemen in de Regionale Energiestrategieën (RES'en);
- Ga vroeg in gesprek met netbeheerders om mogelijke barrières ten aanzien van de benodigde netwerkaanpassingen in kaart te brengen en waar mogelijk tijdig te slechten;
- Onderzoek hoe waterstof-infrastructuur kan worden gerealiseerd op een manier dat de levering van waterstof niet leidt tot veel extra voertuigkilometers, bijvoorbeeld door lokale waterstofproductie of toevoer via pijpleidingen;
- Schrijf de verbrandingsmotor niet af. Volg de onderzoeken op het gebied van ultra-schone verbrandingsmotoren in combinatie met klimaatneutrale brandstoffen (zoals groene waterstof) voor het zware wegtransport. Deze bieden wellicht ook mogelijkheden voor de binnenvaart en mobiele werktuigen. Als dit leidt tot een kwalitatief hoogwaardige toepassing die voldoet aan de milieu-eisen, betaalbaar is en overeenkomstig qua functionaliteiten, dan vraagt dit om aanpassing van de wetgeving om deze toepassing ook als (nagenoeg) zero-emissie oplossing te beschouwen. Dit kan ook een extra boost geven aan de ontwikkeling van groene waterstof.

1. Algemene inleiding

1.1 Introductie

Achtergrond

De Routeradar heeft als basisopgave de monitoring van de Visie Duurzame Energiedragers in Mobiliteit. Deze visie kwam voor het eerst tot stand in 2014, toen nog onder de naam 'Brandstofvisie'. De Brandstofvisie werd in een samenspel van 350 stakeholders uitgewerkt en bevat een beschrijving welke duurzame brandstoffen wanneer kunnen worden ingezet om een bijdrage te leveren aan de klimaatdoelen op het gebied van CO₂-reductie in transport. Deze visie heeft in 2020 een actualisatie gekregen onder de naam 'Visie Duurzame Energiedragers in Mobiliteit'. Oogmerk daarbij is nog altijd het terugdringen van de broeikasgassenuitstoot in transport.

Klimaatakkoord

Over het reduceren van de uitstoot heeft Nederland zowel internationaal als nationaal afspraken gemaakt. Zo vormen duurzame energiedragers een belangrijk onderdeel in het mobiliteitsdeel van het Klimaatakkoord uit 2019. De uitvoering hiervan vindt deels plaats bij de programmadirectie Duurzame Mobiliteit. Tevens is er het programma Meerjarig Missie-gedreven Innovatieprogramma Duurzame Mobiliteit (MMIP-DM). Dit programma kijkt verder dan alleen de realisatie van klimaatdoelen. Duurzame mobiliteit is namelijk ook van vitaal belang voor de opbouw van een concurrerende positie van Nederland in de mondiale post-fossiele economie.²

Scope

De primaire focus van de Routeradar ligt op de ontwikkeling van duurzame energiedragers/brandstoffen voor mobiliteit. Dit is gevolg van het feit dat de Routeradar is opgezet als monitor van de Visie Duurzame Energiedragers in Mobiliteit. Daarnaast is er ook ander beleid dat bijdraagt aan duurzame mobiliteit. Denk aan minder transport, meer gebruik van fietsen en openbaar vervoer, verandering van vervoerswijze ('modal shift'), efficiëntere logistiek, et cetera. Deze elementen komen grotendeels terug in de andere onderdelen van het Klimaatakkoord: 'Verduurzaming logistiek' en 'Verduurzaming personenmobiliteit'. Deze vallen niet binnen de scope van de Routeradar, maar de Routeradar draagt wel bij aan de monitoring hiervan op alle deelonderdelen die duurzame energiedragers betreffen.

Daarbij heeft de Routeradar 2019 een dubbele scope die in twee verschillende delen wordt behandeld: de Routeradar Straatbeeldmonitor en de Routeradar Innovatiemonitor. Beide worden hieronder verder toegelicht.

De Routeradar Straatbeeldmonitor

De Routeradar Straatbeeldmonitor (RR-SBM) presenteert voor de zes vervoersmodaliteiten (wegvervoer, binnenvaart, mobiele werktuigen, zeevaart, luchtvaart en spoor) de getalsmatige voortgang en ontwikkelingen van de duurzame energiedragers in mobiliteit als volgt:

² Een meer uitgebreide analyse van het Nederlandse beleid en bijbehorende doelstellingen kan gevonden worden in ieder van de Routeradar 2019 Straatbeeldmonitor rapporten onder de paragrafen 2.2 en 2.3.

1. Door het afzetten van de streefwaarden (targets van beleid en platforms) per zichtjaar tegen de realisaties (meetwaarden) in 2019;
2. Door in te zoomen op drie onderdelen: (1) energiedragers, (2) infrastructuur, en (3) vervoermiddelen;
3. Door de emissiereducties per product-marktcombinatie te berekenen op basis van de realisaties in aantallen en afgelegde kilometers.³

De Routeradar Innovatiemonitor

In de Routeradar Innovatiemonitor wordt binnen het gebied van duurzame energiedragers voor mobiliteit gekeken naar de techniek- en marktontwikkelingen in Nederland en internationaal. Daarbij ligt de focus vooral op het vaststellen van de potentie tot opschaling.

Het begrip "innovatie" heeft in de Routeradar Innovatiemonitor twee verschillende betekenissen. Binnen het Techniekontwikkeling rapport heeft het begrip innovatie betrekking op de eerste drie product ontwikkeling fasen⁴: -R&D fase; -prototype fase; -marktvoorbereiding fase. Binnen de drie Marktontwikkeling rapporten praten we over de innovatie binnen de product ontwikkeling fasen 3 en 4: -markt introductie fase; -markt opschaling fase. Dit onderscheid is belangrijk omdat voor elke fase specifieke beleidsinstrumenten nodig zijn.

Technische ontwikkelingen

De Innovatiemonitor (RR-INNOM) schetst daarbij de stand van de technische ontwikkelingen van alle brandstofsporen, door in te zoomen op de drie velden:

1. Energiedragers;
2. Infrastructuur;
3. Vervoermiddelen.

Marktontwikkelingen

De marktontwikkelingen worden specifiek in beeld gebracht voor de modaliteiten:

- Wegvervoer;
- Binnenvaart;
- Mobiele werktuigen.

Per modaliteit wordt uitsluitend gefocust op het veld 'Vervoermiddelen'. Daarbij worden per marktsegment (personenwagen, bestelwagen, vrachtwagen etc.) de volgende sleutelfactoren onderzocht:

1. Beschikbaarheid (van merken en modellen in Nederland);
2. Betaalbaarheid. Betreft de betaalbaarheid van het gebruik zoals dat door middel van een Total Cost of Ownership (TCO) berekening kan worden vastgesteld ten opzichte van een conventioneel referentievoertuig;
3. Kritische specificaties. Dit betreft de functionele gebruikersspecificaties (zoals actieradius, tank-/laadtijd, bagageruimte etc.) die bepalend zijn voor een succesvolle opschaling van een voertuig binnen een bepaald marktsegment.

1.2 Doelstelling en doelgroepen

³ De methodiek en een aantal termen worden in meer detail beschreven in hoofdstuk drie van ieder van de RR-2019 Straatbeeldmonitor rapporten.

⁴ Zie voor bespreking van markt cq productfasen de RR-2019 Straatbeeldmonitor: paragraaf 3.2.2

Doelstelling

Het hoofdoel van de Routeradar 2019 is om feitelijke informatie met betrekking tot de ontwikkeling van duurzame energiedragers in transport te verzamelen en overzichtelijk te presenteren.

De rapportage in zijn geheel evalueert de voortgang met betrekking tot de introductie en marktopschaling van verschillende duurzame energiedragers en vervoermiddelen, inclusief de benodigde tank-/laadinfrastructuur in het mobiliteitssysteem.

De resultaten van de Routeradar 2019 zijn input voor een proces van evaluatie van beleid en beleidsadviesing. Daarbij beperken deze rapporten zich qua conclusies en aanbevelingen strikt tot zaken die op grond van de gepresenteerde informatie geconcludeerd kunnen worden.

Definitie duurzame energiedragers in transport

In de huidige beleidspraktijk heeft dit begrip betrekking op de transitie van conventionele fossiele energiedragers (diesel, benzine, LPG) naar hernieuwbare nieuwe energiedragers als elektriciteit, waterstof, hernieuwbaar gas (bio-LPG, bio-CNG, bio-LNG) en biobrandstoffen. In principe vallen hier nog veel meer duurzame energiedrager opties onder, maar die worden in de Routeradar 2019 niet gemonitord. Reden is dat deze producten nog in de vroege productfase-ontwikkeling zitten, waardoor zij nog niet voor grootschalige marktinzet in aanmerking komen.

Verwante termen (met andere definities) die in dit verband vaak gebruikt worden zijn: 'alternatieve', 'duurzame' of 'innovatieve' brandstoffen. Voor alle duurzame energiedragers geldt overigens dat ook deze vaak niet hernieuwbaar geproduceerd worden. Het streven is daarom om dit vanaf volgende jaar te gaan monitoren. Dit zal gebeuren door zowel de realisaties als de streefwaarden (ambities/doelstellingen) van de hernieuwbaarheid van de verschillende energiedragers in beeld te brengen en te laten zien welke voortgang hier jaarlijks gemaakt wordt.

Doelgroepen

De Routeradar 2019 wordt uitgevoerd in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW). De rapportage is bedoeld voor de volgende doelgroepen en rapportages:

1. Beleidsmedewerkers die duurzaam mobiliteitsbeleid formuleren, herijken of inzicht willen in het huidige beleid met betrekking tot de zes belangrijkste transportmodaliteiten⁵;
2. Leden van de brandstofplatforms⁶;
3. Deelnemers aan Green Deals en convenanten en andere stakeholders op het gebied van duurzame mobiliteit;
4. Monitoring van het mobiliteitsdeel van het Klimaatakkoord, dit betreft:
 - a. Duurzame energiedragers;
 - b. Stimulering elektrisch (personen)vervoer;
 - c. Verduurzaming logistiek;
 - d. Verduurzaming personenmobiliteit;
 - e. Innovatie binnen mobiliteit (MMIP, niveau 4);
5. Monitoring van de EU-richtlijn AFID (Alternative Fuels Infrastructure Directive) in het kader van de rapportages aan de Europese Commissie door Nederland;
6. Jaarlijks updaten van de Visie voor duurzame energiedragers in transport.

⁵ Wegvervoer, Mobiele werktuigen, Binnenvaart, Zeevaart, Spoor en Luchtvaart

⁶ Formule E-Team, LNG Platform (inclusief CNG), Biobrandstoffen Platform en H₂ Platform

2 Methodiek

Het rapport Techniekontwikkeling van de Routeradar Innovatiemonitor schetst per voer-, vaar- of werktuig en brandstofspoor de voornaamste ontwikkelingen van de stand der techniek. Dit deel focust uitsluitend op de belangrijkste ontwikkelingen en pretendeert niet een volledig beeld te geven. De focus is hier nationaal en (vooral) internationaal.

De behandelde velden zijn:

- **Techniekontwikkeling van energiedragers** (productie- en distributie);
- **Techniekontwikkeling van infrastructuur** (bevoorrading: tanken, vullen, laden);
- **Techniekontwikkeling van vervoermiddelen** (modaliteit-breed).

De behandelde brandstoffen zijn:

- **Conventioneel** (benzine, diesel, LPG);
- **Elektrisch** (met name accu-elektrisch);
- **Waterstof** (met name brandstofcel-elektrisch);
- **Gasvormig** (met name (bio-)CNG en (bio-)LNG);
- **Hoge-mix vloeibare biobrandstoffen** (met name FAME en HVO).

Het resulterende overzicht van lopende R&D-inspanningen dient om de lezer een globale indruk te geven van toekomstige marktontwikkelingen/-trends en mogelijk te verwachten prestaties (bijvoorbeeld efficiency, kosten, technologische stand) van verschillende duurzame energiedragers. Dit kan de lezer helpen om een beeld te vormen voor de toekomstverwachtingen van de diverse energiedragers.

3 Techniekontwikkeling: Energiedragers

3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk behandelt de techniekontwikkeling op het niveau van de verschillende duurzame energiedragers in mobiliteit. Hierin worden veelbelovende onderzoeks- en ontwikkelpaden ("R&D pathways") uitgelicht, waar op nationaal en internationaal niveau aan wordt gewerkt. De nadruk ligt op de technologische aspecten van het productie- en distributieproces van energiedragers (well-to-tank).

3.2 Conventionele brandstoffen (benzine, diesel, LPG)

3.2.1 *Feedstock, productie en distributie*

In de feedstock en productie- en distributiemethode van de conventionele brandstoffen (benzine, diesel, LPG) zit relatief beperkte techniekontwikkeling. Fossiele benzine en diesel worden nog steeds gewonnen uit aardolie. Deze aardolie wordt op verschillende locaties in de wereld gewonnen en vervolgens getransporteerd naar raffinaderijen. LPG wordt aangemerkt als een bijproduct van dit raffinageproces. De eindproducten diesel, benzine en LPG worden aan tankstations aangeleverd met tankwagens.

Bij het winnen, raffineren en distribueren van deze brandstoffen komt CO₂-vrij. Deze emissies zijn in verschillende studies meermaals onderzocht. Voor fossiele diesel geldt dat de CO₂-emissies als gevolg van winnen, productie en distributie ongeveer 17% bedragen van de totale CO₂-ketenemissies. Voor benzine en LPG is dat respectievelijk ongeveer 16% en 11%.

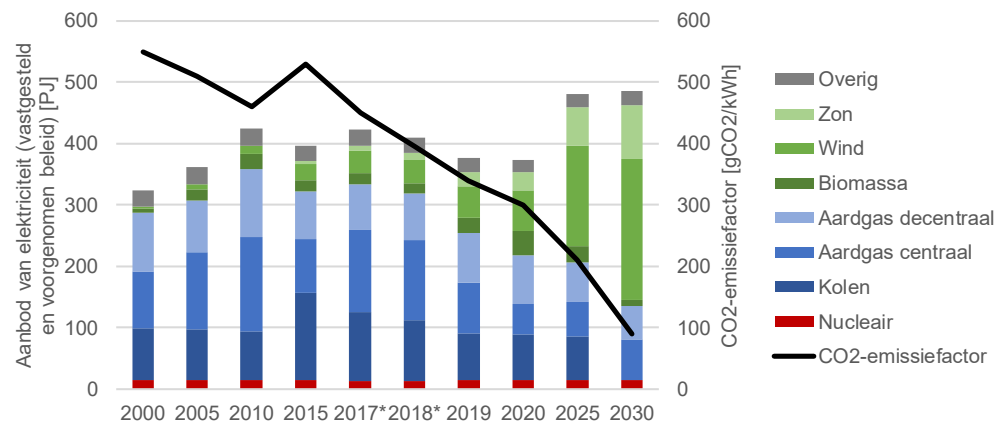
3.3 Elektrisch

3.3.1 *Feedstock, productie en distributie*

De productie van elektriciteit is in transitie. Onderstaande figuur laat zien dat het aandeel elektriciteit uit fossiele grondstoffen in Nederland naar verwachting aanzienlijk zal afnemen tussen 2017 en 2030. Daarentegen zal de hoeveelheid en het aandeel duurzaam opgewekte elektriciteit toenemen in deze periode. Vooral de hoeveelheid elektriciteit opgewekt met windturbines zal aanzienlijk stijgen.

Als gevolg van deze transitie zal de CO₂-emissie per opgewekte hoeveelheid elektriciteit tussen 2017 en 2030 met ongeveer 80% afnemen. Dit betekent dat ook de totale CO₂-ketenemissies van elektrische auto's aanzienlijk zullen afnemen.

Figuur 1: Ontwikkeling van de grondstof/productiemethode en CO₂-emissiefactor van elektriciteit in Nederland op basis van vaststaand en voorgenomen beleid



De distributie van elektriciteit gaat via een fijnmazig netwerk, waardoor bijna overal in Nederland elektriciteit beschikbaar is op locaties waar mensen wonen en werken. In de toekomst zal het elektriciteitsnetwerk anders, maar ook zwaarder belast worden. De vraag naar elektriciteit zal toenemen in verschillende sectoren, waaronder mobiliteit. Daarnaast verandert het elektriciteitsaanbod in termen van tijd (wanneer de zon schijnt of de wind waait) en locatie van de bron (er vindt decentralisatie plaats, bijvoorbeeld door het toepassen van zonnepanelen op woningen). Dit betekent dat zonder aanvullende maatregelen, of slimme oplossingen zoals lokale energieopwekking en/of opslag o.a. in elektrische voertuigen (kostbare) verzwaring van het elektriciteitsnetwerk noodzakelijk zal zijn. Door vraag, aanbod en eventuele buffercapaciteit slim te sturen kan de noodzaak voor verzwaring van het elektriciteitsnetwerk beperkt blijven.

3.4 Waterstof

3.4.1 Trends rondom de grondstoffen (feedstock)

De energie-efficiency en de CO₂-uitstoot van waterstofproductie hangen sterk af van de gehanteerde productiemethode en de distributiewijze. Waterstof kan op twee manieren worden geproduceerd: via 'steam reforming' (SMR) van (fossiele) methaan of door elektrolyse van water (met behulp van elektriciteit). Afhankelijk van de gebruikte grondstof en de technologie wordt de waterstof aangeduid met een kleur:

- Bij de productie van **grijze waterstof** wordt gebruik gemaakt van fossiele brandstoffen;
- **Blauwe waterstof** wordt vervaardigd met dezelfde productiemethode als grijze waterstof, maar de uitgestoten CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen (carbon capture & storage, CSS);
- **Groene waterstof** wordt vervaardigd door elektrolyse op basis van groene stroom (elektrolyse) of via vergassing van biomassa (SMR).

Naast de productieroute is ook de distributieroute van belang voor de energie-efficiency en de CO₂-uitstoot. Over het algemeen onderscheidt men drie distributieroutes:

- Levering middels tube trailers (tankwagens waarin waterstof gecomprimeerd is tot circa 200 bar);
- Transport via pijpleiding;
- Transport van elektriciteit ten behoeve van elektrolyse op de locatie waar de waterstof wordt gebruikt.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de energie-efficiency en de CO₂-uitstoot van enkele relevante waterstofproductie- en distributiemethoden. De energie-efficiency wordt uitgedrukt in de hoeveelheid energie (in MJ) die nodig is om een energie-eenheid waterstof (in MJ_{H₂}) te produceren en te transporteren. De CO₂-uitstoot wordt uitgedrukt in de hoeveelheid CO₂ (in grammen, well-to-tank) die vrijkomt voor eenzelfde hoeveelheid waterstof (in MJ_{H₂}).

Hieruit blijkt dat de productie van groene waterstof tot minder CO₂-emissie leidt dan blauwe of grijze waterstof. In het geval van grijze en blauwe waterstof geldt dat elektrolyse (ELE) tot meer CO₂-emissies leidt dan steam-reforming (SMR). Route SMR2 (grijs) waarbij waterstof via tube trailers (tankwagens) wordt vervoerd, is momenteel de meest gebruikte distributiemethode. Volgens het H₂-platform zal dit naar verwachting zal dit de komende jaren nog zo blijven. Vanwege de lage CO₂-uitstoot en hoge energie-efficiency is route ELE4 gewenst.

Tabel 1: Uitstoot en energie-efficiency van verschillende waterstofroutes [JRC, 2014]

Route	Uitstoot [gCO ₂ eq.WTT / MJ _{H₂}]	Energie-efficiency [MJ / MJ _{H₂}]
SMR1 (grijs)	104,4	0,81
SMR2 (grijs)	108,1	0,88
SMR3 (blauw)	43,2	0,87
SMR4 (groen)	15,7	1,05
ELE1 (grijs)	226,3	3,92
ELE2 (grijs)	408,7	2,96
ELE3 (blauw)	126,5	3,60
ELE4 (groen)	13,0	0,87

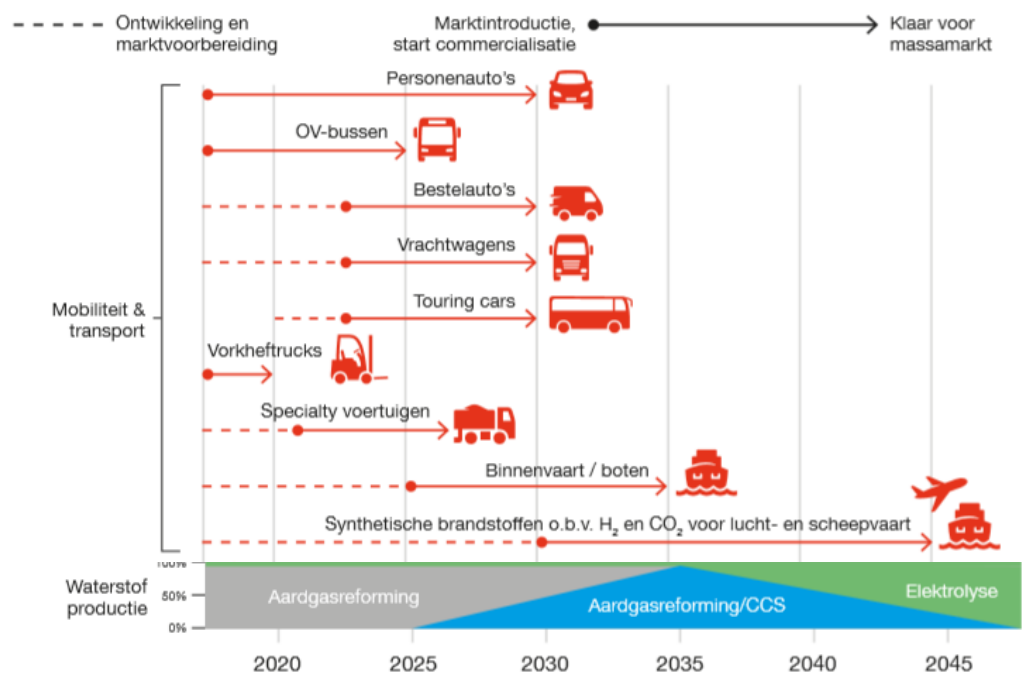
- **SMR1 (grijs)** - de waterstof wordt opgewekt middels een gecentraliseerde reformer, waterstof transport via pijpleiding en compressie bij het verkooppunt;
- **SMR2 (grijs)** - de waterstof wordt opgewekt middels een gecentraliseerde reformer, levering van de waterstof middels tube trailers (tankwagens waarin waterstof gecomprimeerd is tot circa 50 bar) en compressie bij het verkooppunt;
- **SMR3 (blauw)** - vergelijkbaar met SMR 1, maar met carbon capture and storage (CCS);
- **SMR4 (groen)** - vergelijkbaar met SMR 1, maar door gebruik van biomassa (biogas);
- **ELE1 (grijs)** - de waterstof wordt opgewekt middels gecentraliseerde elektrolyse, waterstof transport via pijpleiding en compressie bij het verkooppunt;

- **ELE2 (grijs)** - de waterstof wordt opgewekt middels gecentraliseerde elektrolyse (grijze stroom), waterstof transport via pijpleiding en compressie bij het verkooppunt;
- **ELE3 (blauw)** - de waterstof wordt opgewekt middels gecentraliseerde elektrolyse, waterstof transport via pijpleiding en compressie bij het verkooppunt;
- **ELE4 (groen)** - de waterstof wordt opgewekt middels gecentraliseerde elektrolyse, waterstof transport via pijpleiding en compressie bij het verkooppunt.

Een verdere toelichting op de hierboven genoemde routes is terug te vinden in de bijlagen.

In de contouren van een Routekaart Waterstof [TKI NieuwGas, 2018] wordt een transitiepad geschetst voor de overgang van grijze waterstof (SMR2) naar groene waterstof (ELE4). Behalve het feit dat de productie van waterstof nog een ontwikkeling zal doormaken, zal waterstof naar verwachting ook in verschillende marktsegmenten en vervoersmodaliteiten een zogenaamde ingroeiperiode kennen. Ook in de industrie en ander markten voor waterstof zal er een opschaling plaatsvinden. Deze transitie vindt de komende 30 jaar plaats, zoals is weergegeven in onderstaande figuur.

Figuur 2: Mogelijke transitie van waterstofproductie en mogelijke ingroei van waterstof als energiedrager in diverse modaliteiten [TKI NieuwGas, 2018]



De achterliggende gedachte voor een transitie via blauwe waterstof (op basis van aardgasreforming) heeft onder andere te maken met het feit dat bestaande technologie gebruikt kan (blijven) worden, dat op korte termijn een flinke CO₂-reductie bereikt kan worden, en dat de elektrolyse route voor waterstofproductie veel elektriciteit kost en voorlopig nog relatief duur is.

3.4.2 *Technologische ontwikkelingen rondom de productie- en distributie van waterstof*

De technologische ontwikkelingen rondom de productie en distributie van waterstof richten zich op de volgende vlakken:

- Bevoorrading via pijpleiding of lokale productie om de hoeveelheid voertuigbewegingen voor bevoorrading van tankstations in de hand te houden;
- Waterstof als bouwsteen voor synthetische brandstoffen.

3.4.2.1. Bevoorrading via pijpleiding en lokale productie van waterstof

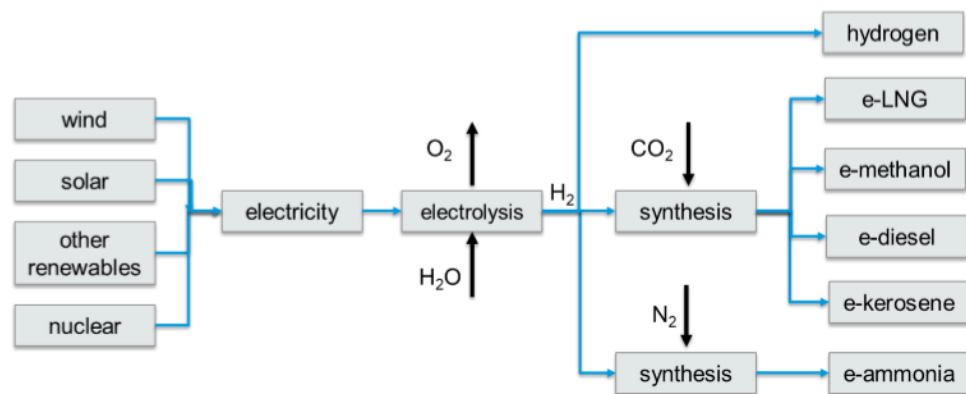
Volgens het H₂-platform zullen de meeste waterstoftankstations de komende jaren worden bevoorrad met behulp van tube trailers (tankwagens). Door de lage energiedichtheid van waterstof, kunnen deze tube trailers maar een beperkte hoeveelheid waterstof vervoeren. Daarom zijn voor de bevoorrading van de waterstofstations middels 'tube trailers' tot ongeveer 2,3 leveringen per dag per waterstof-vulpunt nodig. Voor een tankstation met drie waterstof-vulpunten zou dit zeven leveringen per dag betekenen. In totaal zou daardoor de hoeveelheid vrachtwagenkilometers in Nederland met 0,5% toenemen [TNO, 2019]. Of dit leidt tot onaanvaardbare veiligheidsrisico's dient nader te worden geanalyseerd.

Het aantal bevoorradingen per 'tube trailer' kan worden beperkt door het realiseren van lokale productie van (groene) waterstof of bevoorrading middels pijpleidingen. Lokale productie van waterstof zou betekenen dat er alleen elektriciteit naar de tankstations wordt geleid en dat deze ter plekke wordt gebruikt om waterstof met behulp van een elektrolyser te produceren. De kosten van dergelijke elektrolyzers zijn nog relatief hoog. Waterstoftransport via pijpleidingen gebeurt momenteel al vanuit Rotterdam naar België voor industriële toepassingen. Het waterstofstation bij Rhooon is aangesloten op deze (private) pijpleiding. In de toekomst zouden tankstations mogelijk kunnen worden aangesloten op een eventueel te realiseren waterstoftransportnetwerk ofwel 'waterstofbackbone' [Waterstof Coalitie, 2018].

3.4.2.2. Waterstof als bouwsteen voor synthetische brandstoffen (e-fuels)

Waterstof kan ook gebruikt worden als bouwsteen voor zogenaamde "e-fuels". Met behulp van een chemisch proces (synthese) kunnen verschillende vloeibare en gasvormige e-fuels worden geproduceerd uit waterstof en CO₂. Voorbeelden van dergelijk e-fuels zijn e-LNG, e-methanol, e-diesel en e-kerosine.

Figuur 3: Productieproces van synthetische brandstoffen [TNO, 2019]



Een voordeel van dergelijke brandstoffen ten opzichte van andere duurzame energiedragers zoals waterstof en elektriciteit is de hogere energiedichtheid. Dit is vooral van belang bij vervoersmodaliteiten die grote afstanden moeten afleggen zonder dat ze tussendoor kunnen tanken, zoals zeescheepvaart en luchtvaart. Technisch kunnen e-fuels ook voor andere modaliteiten ingezet worden. Het is echter de vraag in welke mate deze e-fuels gebruikt zullen worden in het wegverkeer.

Dit heeft onder andere te maken met:

- Hoge productiekosten vanwege:
 - Grote hoeveelheid benodigde duurzame elektriciteit;
 - Benodigde productiefaciliteiten;
 - Benodigde ruimte voor elektriciteitsopwekking en brandstofproductie;
 - Beschikbaarheid van CO₂;
- De luchtverontreinigende emissies die vrijkomen bij de verbranding van e-fuels zijn vergelijkbaar met de emissies van de fossiele equivalenten.

3.5 Gasvormig

3.5.1 Feedstock, productie en distributie

CNG is gecomprimeerd aardgas of biogas. Het aardgas dat bij Nederlandse tankstations kan worden getankt wordt gedistribueerd via het aardgasnetwerk, waarop bijvoorbeeld ook woningen zijn aangesloten. Het aardgas wordt bij de pomp, voordat het getankt wordt, gecomprimeerd. Gegeven het feit dat het Nederlandse aardgasnetwerk laagcalorisch aardgas bevat, is ook CNG in Nederland laagcalorisch (ook wel G25). In andere Europese landen is CNG ook beschikbaar als hoogcalorisch gas (ook wel G20). Dit hoogcalorisch gas bevat meer methaan en minder stikstof dan laagcalorisch gas.

In Nederland wordt het grootste deel van het laagcalorisch aardgas dat via het gasnet wordt aangevoerd, gewonnen in Groningen en de Noordzee. De verwachting is dat er in de toekomst ook steeds meer CNG uit het buitenland zal worden geïmporteerd.

De hernieuwbare tegenhanger van aardgas is groengas dat wordt geproduceerd uit biogas of syngas. Biogas wordt geproduceerd uit vergisting van biomassa zoals mest en mais, of komt als stortgas vrij bij het verwerken van organisch afval. Naast biogas kan groengas ook uit syngas gemaakt worden. Syngas ontstaat bijvoorbeeld na vergassing van biomassa, zoals hout en is in dat geval ook biogeen.

De sector streeft ernaar dat alle CNG in Nederland groene CNG wordt. Momenteel is dit voor een groot deel het geval. De markt is hierbij wel afhankelijk van de beschikbaarheid van zogenaamde groengascertificaten. De vergroening vindt namelijk plaats door middel van deze Garanties van Oorsprong (GvO's), ook wel 'groengascertificaten' genoemd. Dit zijn certificaten waarmee kan worden bewezen dat de geleverde energie duurzaam is geproduceerd. Aangezien CNG wordt geleverd via het aardgasnetwerk, bestaat het aardgas dat fysiek in de voertuigen belandt, voor een groot deel uit fossiel aardgas en is een klein gedeelte uit biomassa geproduceerd. Echter, voor iedere hoeveelheid energie die wordt getankt, is dezelfde hoeveelheid energie in de vorm van groene CNG geproduceerd.

De in Nederland beschikbare LNG is op dit moment op basis van fossiel aardgas. Dit aardgas wordt in het land van herkomst gekoeld en vervolgens per schip als LNG getransporteerd naar Nederland en per truck gedistribueerd. De CO₂-ketenemissies van deze fossiele LNG zijn ongeveer 32% hoger dan de uitlaatemissies. In potentie kan LNG ook worden gemaakt uit biomassa. Dit wordt aangeduid als bio-LNG of LBG (Liquified Biogas). De sector zet in op een groei van het aandeel bio-LNG. LNG en bio-LNG worden niet toegepast in personen- en bestelauto's.

3.6 Vloeibare biobrandstoffen (hoge mixen)

Zoals in de RouteRadar – Straatbeeldmonitor 2019 gerapporteerd, was de fysieke bijdrage van hernieuwbare energie in de transportsector in Nederland 24,3 PJ in 2018 [NEa, 2019]. In het kader van de RED-richtlijn wordt dit gerapporteerd als 41,6 PJ (overeenkomend met een aandeel van 8,5% hernieuwbare energie). Hierin worden de volgende rekenregels gebruikt:

- Op afval gebaseerde (geavanceerde) biobrandstoffen tellen dubbel;
- Hernieuwbare elektriciteit in de weg telt met een factor 5 mee;
- Hernieuwbare elektriciteit in het spoorvervoer telt met een factor 2,5 mee.

Volgens recente informatie van NEa [NEa, 2020] is de verplichting voor brandstofleveranciers om 12,5% hernieuwbare energie te leveren in 2019 ook gehaald. Het aandeel van conventionele biobrandstoffen (op basis van landbouwgewassen) is teruggebracht tot ongeveer 1% van de totale hoeveelheid transportbrandstoffen. Het aandeel geavanceerde biobrandstoffen (op basis van afval/residuen) is 2%. Andere soorten biobrandstoffen spelen de hoofdrol (meer dan 9%). Net als voorgaande jaren bestaat het overgrote deel van de geleverde hernieuwbare energie in 2019 uit vloeibare biobrandstoffen. Dieselvervangende biobrandstoffen vormen het grootste deel (76%) van de hernieuwbare energie, gevolgd door benzinevervangende biobrandstoffen (20%). De resterende 4% hernieuwbare energie voor vervoer betreft elektriciteit en biogas.

Voor de monitoring van de techniekontwikkeling rondom biobrandstoffen is het belangrijk om weer te geven welke trends er plaatsvinden en welke biobrandstoffen er nu en in de toekomst een grote rol spelen. De volgende sectie geeft inzicht in:

- Trends rondom de grondstoffen (feedstock), die gebruikt worden om biobrandstoffen te maken;
- Technische ontwikkelingen rondom de verwerking en het productieproces van biobrandstoffen;
- Technische ontwikkelingen rondom de distributie van biobrandstoffen.

3.6.1 Trends rondom de grondstoffen (feedstock)

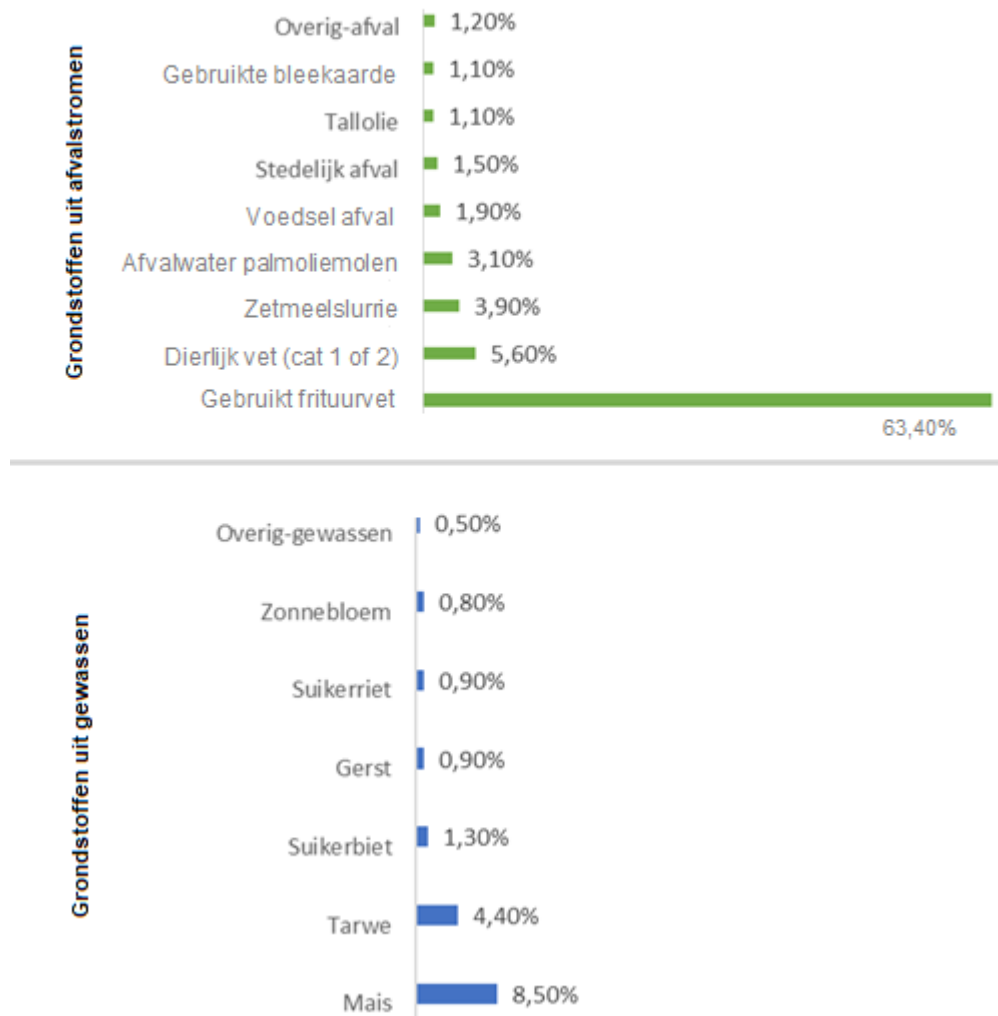
De verdeling van de grondstoffen voor biobrandstoffen in 2019 is te zien in onderstaande figuur⁷. In 2019 werd meer dan 80% van de biobrandstoffen geproduceerd uit afval. Binnen de afvalcategorie speelt gebruikte frituurolie de belangrijkste rol. Dit heeft te maken met de in 2018 geïntroduceerde doelstelling voor geavanceerde biobrandstoffen. Hierdoor worden de productie en levering van biobrandstoffen uit afval en residuen gestimuleerd, hetgeen resulteert in een hoge bijdrage aan het geheel. De doelstelling voor geavanceerde biobrandstoffen in 2019 was 0,8%. Het verbruik van deze brandstoffen lag in 2019 ruim boven deze doelstelling (1,9%) [NEa, 2020].

Van de grondstoffen die worden gebruikt voor de productie van biobrandstoffen voor het Nederlandse transport komt minder dan 10% daadwerkelijk uit Nederland. De grondstoffen uit Nederland bestaan bijna geheel uit afvalstoffen; Nederlandse gewassen zijn nauwelijks gebruikt. Nederland staat hiermee op de derde plaats als leverancier van gebruikte frituurolie (voor biobrandstoffen voor Nederlands transport in 2019), na China en Amerika.

Figuur 4: Verdeling van grondstoffen voor biobrandstoffen in 2019 [NEa, 2020]

⁷ Groen: grondstoffen uit afvalstromen; Blauw: grondstoffen uit gewassen.

Verdeling van de grondstoffen voor biobrandstoffen in 2019



3.6.2 Technische ontwikkelingen rondom de verwerking en het productieproces van biobrandstoffen

Biobrandstoffen worden van oudsher geproduceerd uit olieachtige en zetmeelrijke gewassen. Dit soort biobrandstoffen worden aangeduid als eerste generatie of conventionele biobrandstoffen.

Er bestaan twijfels en zorgen dat deze biobrandstoffen niet voldoen aan de gestelde duurzaamheidseisen met mogelijke negatieve gevolgen voor het landgebruik.

Het in de REDII geïntroduceerde subdoel voor geavanceerde biobrandstoffen moet ervoor zorgen, dat biobrandstoffen uit afval- en reststromen een hoger aandeel in het totaal innemen.

Hiervoor zijn enkele conversieroutes geschikt. Deze zijn samengevat in twee groepen:

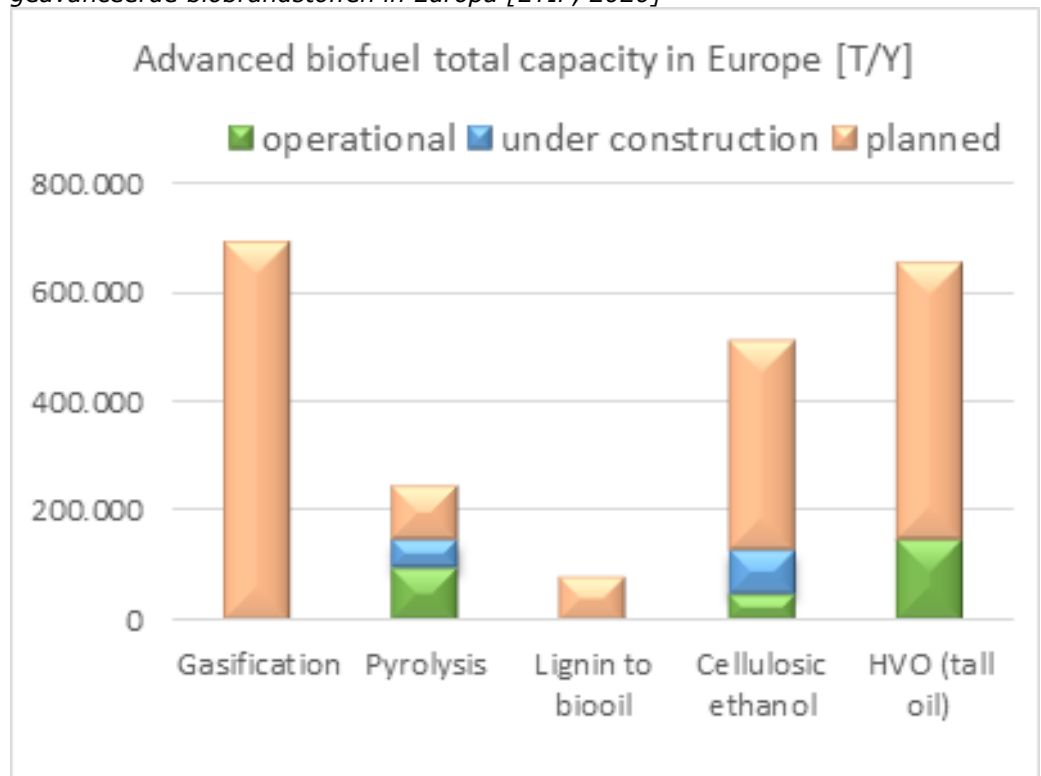
- Gebuikt frituurvet **ieroutes** worden gebruikt om ligno-cellulose (houtachtige) grondstoffen om te vormen naar met name vloeibare

biobrandstoffen. In de praktijk gaat het om processen als alcoholische fermentatie en (anaerobe) verwerking;

- **Thermochemische routes** worden gebruikt om grondstoffen om te vormen naar biogas (biomethaan/CNG/LNG). In de praktijk gaat het om processen als vergassing, pyrolyse en hydrothermale liquefactie (HTL).

Verdere details over de conversieroutes volgen in de paragrafen hieronder. De productiecapaciteit van de genoemde conversie-routes zijn vandaag nog klein, maar gaat naar verwachting de komende jaren sterk groeien. Onderstaande figuur geeft een overzicht van de huidige en de geplande productie capaciteit van geavanceerde biobrandstoffen in Europa. De huidige productiecapaciteit bedraagt circa 300.000 TJ/jaar. Als alle geplande faciliteiten daadwerkelijk worden gerealiseerd, zal de productiecapaciteit uitgroeien tot meer dan 2.000.000 TJ per jaar (groefactor: zeven keer).

Figuur 5: Overzicht van de huidige en geplande productie capaciteit van geavanceerde biobrandstoffen in Europa [ETIP, 2020]



De gehele productiecapaciteit van geavanceerde biobrandstoffen is niet alleen bedoeld voor de sector transport. Sterker: verschillende sectoren concurreren met elkaar voor de beschikbare hoeveelheid biobrandstoffen. In Nederland, bijvoorbeeld, zet naast de transport sector ook de gebouwde omgeving sterk in op groen gas (voor het verwarmen van huizen en als vervanging van "Gronings gas").

De hoge vraag naar biobrandstoffen en de onderlinge concurrentie tussen sectoren zorgen er op globaal niveau voor, dat de prijzen van 'duurzame grondstoffen' stijgen.

3.6.2.1. Biochemische conversieroutes

Biochemische conversieroutes gaan over het algemeen over alcoholische fermentatie en anaerobe processen. De volgende secties gaan hier dieper op in.

Alcoholische fermentatie

Hoewel de technologie nog niet uitgerijpt is (TRL 8), lijkt alcoholische fermentatie kansrijk voor de productie van ethanol uit "droge" afvalstromen, zoals hout en GFT-afval (groente, fruit en tuin afval). Binnen en buiten de EU bestaan er verschillende demo- en proeffabrieken. De meeste bestaande fabrieken in Europa zijn demonstratieprojecten uit Zweden, Noorwegen, Finland, Duitsland en Frankrijk. Deze omvatten onder andere:

- Clariant (sunliquid plant) in Duitsland;
- Chempolis Ltd. (Chempolis Biorefining Plant) in Finland;
- North European Oil Trade Oy (Ethanolix GOT) in Zweden (capaciteit: 1-4 kt).

Verder zijn er nog twee fabrieken in aanbouw in Roemenië (capaciteit: 50 kt) en Oostenrijk (capaciteit: 50 kt). Op dit moment kan alcoholische fermentatie nog niet concurreren met bestaande ethanol-productietechnologieën. De meeste faciliteiten staan daardoor ook stil of draaien op lage capaciteit. Onder andere het hoge energieverbruik en de hoge productiekosten staan een grootschalige productie in de weg. De komende jaren zal daarom ook veel onderzoek gedaan worden om de robuustheid en de (kosten-) effectiviteit van alcoholische fermentatie te verbeteren.

Anaerobe verwerking

Anaerobe verwerking wordt met name gebruikt voor de productie van biogas en biomethaan uit "natte" afvalstromen, zoals mest en RWZI's (rioolwaterzuiveringsinstallaties). De technologie is al commercieel inzetbaar (TRL 9).

3.6.2.2. Thermochemische routes

In vergelijking met de biochemische routes heeft de productie van biobrandstoffen via thermochemische routes (vergassing, pyrolyse) een lager technology-readiness-level (TRL).

Vergassing

Geschikte grondstoffen laten zich door middel van vergassing omvormen tot synthetisch aardgas (SNG) en vervolgens ook tot vloeibare biobrandstoffen zoals methanol en DME Fischer-Tropsch (FT)-vloeistoffen. De huidige technologie is nog niet ver ontwikkeld (TRL 6-8), niet kosteneffectief en tot op heden maar beperkt toegepast. Er zijn slechts twee operationele demonstratieprojecten die op kleine schaal Fischer Tropsch (FT)-vloeistoffen produceren [Uslu et al, 2019]).

Daarnaast zijn er nog de Guessing vergasser in Oostenrijk en het Zweedse GoBiGas, maar beide installaties zijn gesloten vanwege economische redenen.

Hoewel de bestaande operationele capaciteit klein is, staan er in Europa een grote hoeveelheid nieuwe capaciteiten gepland voor de productie van met name methanol uit afvalstromen (ongeveer 50% van de totale geplande capaciteit). Hieronder valt onder andere het Waste2Chemical (W2C) project in Nederland. Dit is een joint venture van Air Liquide, Nouryon, Enerkem, Port of Rotterdam en Shell om een methanolfabriek te bouwen met een productiecapaciteit van 220 kton (270 miljoen liter). Hiervoor wordt niet-recyclebaar afval als grondstof gebruikt.

Pyrolyse

Door middel van pyrolyse wordt biomassa in vloeibare tussenproducten omgezet, zogeheten pyrolyse-olie of bio-olie. Deze olie kan enerzijds worden gebruikt voor energie- en warmteopwekking (bijvoorbeeld als toepassing in de gebouwde omgeving). Anderzijds kan pyrolyse-olie ook worden gebruikt om biobrandstof te produceren. De technologie is ver ontwikkeld (TRL 9). Momenteel zijn er drie operationele pyrolyse-installaties in de wereld. Eén installatie met een productiecapaciteit van 24 kton (per jaar) staat in Nederland.

Hydroprocessing

Hydrotreated vegetable oil (HVO) en *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids* (HEFA), worden geproduceerd door middel van hydroprocessing van oliën en vetten. Als grondstof worden dierlijke vetten en (gebruikt) frituurvet toegepast en kan de brandstof volgens de RED richtlijn "dubbel" geteld worden voor de doelstelling voor hernieuwbare energie. Een van de grootste commerciële partijen in Europa voor het maken van HVO is Neste-olie, met installaties in Finland en Nederland. Daarnaast produceert UPM Biofuels in Finland ook HVO met tallolie.

Hydrothermische liquefactie (HTL)

HTL is een kansrijke technologie om biomassa om te zetten in vloeibare koolwaterstoffen. Deze technologie is nog in ontwikkeling op laboratorium-schaalniveau (TRL 3-4), maar heeft potentieel om de productie van benzine en dieselvangers te revolutioneren.

3.6.3 *Technische ontwikkelingen rondom de distributie van biobrandstoffen*

Behalve de reeds in RR-SBM 2019 geschetste ontwikkelingen, zijn er geen verdere ontwikkelingen rondom de distributie van biobrandstoffen.

3.7 Conclusie: techniekontwikkeling energiedragers

Conventionele energiedragers (benzine, diesel en LPG)

De productie van conventionele energiedragers is grotendeels uitontwikkeld en er vinden geen grote ontwikkelingen plaats op het gebied van productie en distributie.

Elektrisch

De productie van elektriciteit is in transitie. Het aandeel elektriciteit opgewekt uit fossiele grondstoffen zal in Nederland tussen 2017 en 2030 naar verwachting aanzienlijk gaan afnemen. Daarentegen zal de hoeveelheid en het aandeel duurzaam opgewekte elektriciteit toenemen in deze periode. Als gevolg van deze transitie zal de CO₂-emissie per opgewekte hoeveelheid elektriciteit tussen 2017 en 2030 met ongeveer 80% afnemen.

De distributie van elektriciteit gaat via een fijnmazig netwerk waardoor bijna overal in Nederland elektriciteit beschikbaar is op locaties waar mensen wonen en werken. In de toekomst zal het elektriciteitsnetwerk anders, maar ook zwaarder belast worden. De vraag naar elektriciteit zal toenemen in verschillende sectoren, waaronder mobiliteit. Door vraag, aanbod en eventuele buffercapaciteit slim te sturen kan de noodzaak voor verzwaring van het elektriciteitsnetwerk beperkt blijven.

Waterstof

De energie-efficiency en de CO₂-uitstoot van waterstof hangt sterk af van de gehanteerde productiemethode en de distributiewijze. Naast de productieroute is ook de distributieroute van belang voor de energie-efficiency en de CO₂-uitstoot. De productie en distributie van waterstof zullen nog een sterke transitie doormaken, waarbij nog enigszins onzeker is welke route uiteindelijk zal domineren. Wel zullen de productie en distributie van waterstof duidelijk efficiënter worden.

Gasvormig

Het gebruik van CNG en LNG zit in de lift. CNG is al vaak groen (bio-CNG). De sector zet nu in op een groei van het aandeel bio-LNG. Zo biedt bijvoorbeeld Rolande sinds kort ook bio-LNG aan.

Vloeibare biobrandstoffen (hoge mixen)

Bij de productie en distributie van biobrandstoffen vinden op meerdere vlakken nog veranderingen plaats, te weten:

- Herkomst van de grondstoffen (feedstock), die gebruikt worden om biobrandstoffen te maken, zowel geografisch als soort grondstof;
- Technische ontwikkelingen rondom de verwerking en het productieproces van biobrandstoffen. Veel productieprocessen zitten nog in een pilotachtige fase, waarbij nog onduidelijk is welke technologie uiteindelijk zal doorzetten;
- Technische ontwikkelingen rondom de distributie van biobrandstoffen.

4 Techniekontwikkeling: Infrastructuur

4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk behandelt de techniekontwikkeling op het niveau van de infrastructuur voor verschillende duurzame energiedragers in mobiliteit. Hierin worden veelbelovende onderzoeks- en ontwikkelpaden ("R&D pathways") uitgelicht, waar op nationaal en internationaal niveau aan wordt gewerkt.

4.2 Conventioneel (benzine, diesel, LPG)

De benzine- en dieselinfrastructuur is al decennia lang aanwezig in Nederland. Het netwerk is dan ook sterk ontwikkeld en op (bijna) alle reguliere tankstations kan diesel en benzine worden getankt. In juni 2019 waren er in Nederland 4.145 openbare tankstations, waar benzine en diesel getankt kan worden. Dit aantal is al jaren constant. Daarnaast zijn er ongeveer 1.200 locaties waar LPG kan worden getankt [BOVAG-RAI Mobiliteit, 2020]. Daarnaast zijn er ook nog tankfaciliteiten op eigen terreinen van grote vlooteigenaren, zoals gemeenten en logistieke dienstverleners.

Door de toenemende vraag naar duurzame energiedragers, zal de vraag naar benzine, diesel en LPG in de komende decennia waarschijnlijk gaan afnemen. Dit zal ook betekenen dat het aantal vulpunten waarschijnlijk zal gaan afnemen.

De vulsnelheid van conventionele brandstoffen is al jaren hetzelfde. Voor benzine en diesel verschilt de vulsnelheid tussen tankstations maar heel beperkt. Wel is er een aanzienlijk verschil in vulsnelheid voor lichte voertuigen (personen- en bestelauto's) en zware voertuigen (vrachtwagens en bussen). Voor lichte voertuigen is de afvulsnelheid normaal gesproken 35 liter per minuut, voor zware voertuigen ongeveer 70 liter per minuut. In tegenstelling tot diesel wordt benzine (bijna) niet gebruikt in zware voertuigen. Voor de uitlevering van conventionele brandstoffen worden geen noemenswaardige ontwikkelingen verwacht.

Vanaf 1 oktober 2019 wordt E10 op de meeste tankstations verplicht aangeboden.

4.3 Elektrisch

Elektriciteit is een relatief nieuwe energiedrager in mobiliteit. In mei 2020 bedroeg het aantal laadpunten 56.858 (32.331 "reguliere" publieke laadpunten en 24.527 "reguliere" semi-publieke laadpunten) [NEa, 2020]. Dit zijn er ruim twee keer zoveel als in 2016. Daarnaast waren er in mei 2020 1.308 snellaadpunten, verdeeld over 341 locaties in Nederland.

In de Nationale Agenda Laadinfrastructuur (NAL) zijn prognoses opgenomen voor de benodigde hoeveelheid laadinfrastructuur tussen 2020 en 2030. Deze hoeveelheid zal volgens de NAL in deze periode nog moeten stijgen met bijna een factor acht. De aantallen zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 2: Prognose van het aantal benodigde laadpunten [ELAAD, 2019]

	privaat	publiek	semi-publiek	snelladen	totaal
2020	140.545	34.992	45.981	1.322	222.840
2025	346.472	113.386	215.000	3.699	678.557
2030	773.981	394.332	563.000	9.740	1.741.053

De techniekontwikkelingen in laadinfrastructuur richten zich in eerste instantie op het verhogen van de competitiviteit van elektrisch rijden ten opzichte van voertuigen op conventionele energiedragers. De volgende ontwikkellijnen moeten hieraan bijdragen:

- **Hogere vermogens** moeten de laadsnelheid verhogen en daarmee de laadtijd verlagen en zo ook het aantal benodigde laadpalen verminderen;
- **Gelijkstroom laden** draagt bij aan de flexibiliteit van het elektriciteitsnetwerk en (toekomstige) lagere voertuigkosten;
- **Inductief laden** moet het gebruik van de openbare ruimte verminderen en zo ook beeldvervuiling beperken;
- **In-motion-charging** moet de inzet van het voertuig verder verhogen door tijdens de rit de accu op te laden en de kosten van voertuigen verlagen vanwege een kleinere benodigde accucapaciteit;
- **Smart-charging** door op een 'slimme' manier te bepalen welk voertuig wanneer opgeladen wordt, kan de druk op het elektriciteitsnet worden verminderd en kunnen zo kosten bespaard.

4.3.1 *Hogere vermogens*

Snellaadpunten leveren hogere vermogens (>50kW) dan "reguliere" laadpunten (3,7 tot 22 kW). Een publieke laadpaal levert meestal 11 kW. De vermogens van snelladers nemen steeds verder toe. Zo zijn er al snelladers beschikbaar die laden met 350 kW. Verder wordt er al getest met nog hogere vermogens tot wel 1 MW. Bij dergelijke vermogens zou een elektrische vrachtwagen met een half uur laden een actieradius van ongeveer 300 kilometer kunnen bereiken. Of en wanneer laders met dergelijke hoge vermogens beschikbaar zullen komen is niet bekend.

4.3.2 *Gelijksstroom laden*

Elektrische energie bestaat in twee verschillende verschijningsvormen: wisselstroom (AC) en gelijkstroom (DC). Standaard laadpalen, met relatief lage vermogens, leveren momenteel wisselstroom. Deze stroom wordt in een converter in het voertuig omgezet in gelijkstroom. Snellaadpalen maken gebruik van gelijkstroom, die niet in het voertuig hoeft te worden geconverteerd.

Er zijn ontwikkelingen gaande om ook lage vermogens te leveren via gelijkstroom. Een belangrijk voordeel hiervan is, dat dit de mogelijkheid biedt om ook elektrische energie vanuit het voertuig aan het elektriciteitsnetwerk (terug) te leveren, het zogenaamde "vehicle-to-grid" (V2G). Dit levert extra flexibiliteit op in het elektriciteitsnetwerk. In potentie hoeft het elektriciteitsnetwerk door grootschalig gebruik van deze technologie minder te worden verzwaaard. Dit betekent lagere kosten voor netwerkontwikkeling. Een tweede voordeel is dat er geen converter nodig is in de voertuigen zelf, wat voertuigproductiekosten en ruimte in het voertuig bespaart. Dit betekent echter wel dat er dan een converter nodig is in de laadfaciliteit buiten het voertuig. Hierdoor verschuiven de kosten (voor een groot deel) van het voertuig naar de laadfaciliteit. Zolang elektrische voertuigen nog zijn voorzien van converters en V2G nog niet wordt toegepast, zijn laadfaciliteiten in de huidige vorm goedkoper.

4.3.3 *Inductief laden*

Er zijn twee fysieke typen laadinfrastructuur voor elektrische voertuigen te onderscheiden. Zo kan elektrische energie worden geladen met een fysieke verbinding, bijvoorbeeld via laadpalen (met kabel en connector) of via een pantograaf. Een tweede methode is het zogenaamde inductief laden. Bij deze methode wordt de elektrische energie via inductie naar het voertuig getransporteerd. Het laadsysteem kan dan bijvoorbeeld ondergronds aangebracht worden. Bij inductief laden is er geen fysieke verbinding, zoals een kabel, nodig. Inductief laden heeft daarom enkele voordelen:

- Minder beeldvervuiling;
- In potentie minder handelingen voor eindgebruikers, omdat het voertuig niet fysiek hoeft te worden gekoppeld en ontkoppeld.

Hoewel er momenteel al wel wordt getest met inductief laden, is de technologie nog niet zo ver dat de bekende laadpalen al kunnen worden vervangen. Redenen hiervoor zijn:

- Hogere kosten (investering en onderhoud);
- Hogere energieverliezen dan bij bedraad laden;
- Gebrek aan standaardisatie/interoperabiliteit tussen auto's en laadsystemen;
- Het oplossen van storingen aan (ondergrondse) infrastructuur is complexer.

4.3.4 *In-motion charging*

Beide bovengenoemde laadtechnieken, bedraad en inductief, zijn toepasbaar op stilstaande voertuigen of bij voertuigen die in beweging zijn (lees: "in motion charging"). De belangrijkste voordelen van in-motion charging is dat voertuigen toekunnen met een (veel) kleinere accu, wat leidt tot minder kosten, een lager energieverbruik, minder gewicht en minder ruimteverlies. Daarnaast hoeven voertuigen minder lang stil te staan om te laden.

In Nederland is er recentelijk geen in motion charging infrastructuur geïnstalleerd. Wel rijden er al sinds 1949 trolleybussen in Arnhem. Deze bussen worden via bovenleidingen van elektrische energie voorzien terwijl ze rijden. Met andere systemen wordt momenteel getest in het buitenland. Zo is in mei 2019 in Duitsland, op de A5 ten zuiden van Frankfurt, een stuk weg geopend waarvan de rechterbaan over een lengte van tien kilometer is voorzien van een bovenleiding: de eHighway. Vrachtwagens kunnen tot 90 km/h onder de lijnen doorrijden om de accu op te laden. Het vermogen waarmee de voertuigen worden opgeladen is 200 kW.

Daarnaast wordt er momenteel in Zweden een proef gedaan waarbij de weg tussen Arlanda bij Stockholm en een vrachtcentrum over een lengte van twee kilometer is voorzien van een elektrische rail. Deze is verwerkt in de weg. Op deze weg gaat een omgebouwde DAF truck rijden met een sleepcontact eronder. Ook in dit systeem worden de voertuigen voorzien van 200 kW vermogen tijdens het rijden.

4.3.5 *Smart charging*

Momenteel worden elektrische voertuigen opgeladen vanaf het moment dat ze met de laadpaal worden verbonden. Dit betekent dat er een grote vraagpiek ontstaat wanneer veel voertuigen ongeveer tegelijk verbinding maken met het elektriciteitsnetwerk. Een dergelijke piek zou betekenen dat het elektriciteitsnetwerk op termijn op veel locaties moet worden verzaamd. Dit zou leiden tot hogere kosten, meer ongemak en in potentie een minder duurzame energievoorziening.

In veel gevallen is het niet noodzakelijk dat het voertuig zo snel mogelijk is opgeladen, maar is het goed genoeg als het voertuig bijvoorbeeld de volgende ochtend volgeladen is. Dit geeft flexibiliteit om de piek uit te smeren over een langere periode, waardoor er een minder zwaar elektriciteitsnet nodig is en mogelijk meer gebruik kan worden gemaakt van duurzaam opgewekte energie.

Smart Charging of "slim laden" is een term die wordt gebruikt voor technieken die het energieaanbod zo sturen dat de pieken in de netwerkbelasting worden gedrukt en eventueel het beste gebruik wordt gemaakt van de beschikbare duurzaam opgewekte elektriciteit. Dit kan op verschillende manieren en met verschillende mate van complexiteit. In een simpele vorm wordt de laadsessie van bepaalde gekoppelde voertuigen uitgesteld of wordt het laadvermogen (tijdelijk) gereduceerd. Bij een meer complexe vorm kan de voertuigaccu worden gebruikt als buffer in het energiesysteem, die kan worden opgeladen op het moment dat er (duurzame) elektriciteit over is en kan worden ontladen op het moment dat er in andere delen van het elektriciteitsnetwerk meer elektriciteit nodig is dan er wordt opgewekt.

4.4 Waterstof

Momenteel zijn er in Nederland drie openbare waterstoftankstations en vijf niet-openbare. Daarnaast zijn er 14 stations gepland of in aanbouw. In een convenant van het H₂-platform en een aantal private partijen wordt een ambitie vermeld van 50 waterstoftankstations in 2025. Er zijn meerderen ontwikkelingen gaande die moeten bijdragen aan een verhoogde competitiviteit van rijden op waterstof. Op het gebied van tankinfrastructuur gaat het met name om de ontwikkeling van nieuwe standaards voor een hogere afvulsnelheid.

Waterstof wordt, net als vloeibare brandstoffen als benzine en diesel, getankt via een slang. Bij de tankstations wordt waterstof aangeboden in hoge druk (700 bar) voor lichte voertuigen (personen- en bestelauto's), en lage druk (350 bar) voor zware voertuigen (bussen en vrachtwagen). De afvulsnelheid van waterstof bedraagt momenteel typisch 1,6 kilogram per minuut. Om eenzelfde hoeveelheid kilometers te kunnen rijden als met een benzine- of dieselveertuig, moet een waterstofvoertuig momenteel nog 2,5 tot 3 keer langer tanken (hierbij is rekening gehouden met de hogere energie-efficiëntie van waterstofvoertuigen).

De verwachting is dat de afvulsnelheid de komende jaren verder zal worden opgehoogd, waardoor het verschil voor zowel lichte als zware voertuigen ongeveer twee keer zo klein zal worden. Uitgaande van dezelfde bezettingsgraad betekent dit dat er twee keer zoveel vulpunten nodig zijn per voertuig als nu voor benzine en diesel het geval is.

4.5 Gasvormig

Gasvormige brandstoffen (CNG/LNG) kunnen net als vloeibare brandstoffen worden getankt met behulp van een slang. Het tanken duurt net zo lang als het tanken van benzine en diesel. Aardgas dat bij tankstations wordt aangeboden als CNG wordt momenteel gedistribueerd via het bestaande aardgasnetwerk. Het wordt ter plaatse gecompriëerd en uitgeleverd als CNG.

LNG wordt per vrachtwagen afgeleverd bij tankstations. Of het (gehele) bestaande aardgasnetwerk in de toekomst beschikbaar blijft voor de distributie van aardgas is onbekend. Hierdoor zou de wijze van toelevering in de toekomst kunnen veranderen.

4.6 Vloeibare biobrandstoffen (hoge mixen)

Biobrandstoffen die momenteel het meest worden getankt zijn vervangers van benzine en diesel. Verreweg het grootste deel van de biobrandstoffen die momenteel worden gebruikt in mobiliteit is bijgemengd bij fossiele equivalenten en zijn op deze manier beschikbaar bij tankstations. Wanneer biobrandstoffen op deze manier worden aangeboden zijn er geen aanpassingen aan de tankinfrastructuur nodig.

Daarnaast is het mogelijk om pure biobrandstoffen te tanken. Dit kan bij een klein aantal tankstations en gebeurt ook op privéterreinen van (grote) vlooteigenaren. In dat geval moeten er aparte tanks worden geïnstalleerd.

4.7 Conclusie: techniekontwikkeling infrastructuur

Voor de tankinfrastructuur van fossiele brandstoffen worden geen (aanzienlijke) technische ontwikkelingen verwacht. Voor waterstof geldt dat de afvuilsnelheid in de nabije toekomst nog verder zal toenemen. Vooral voor elektriciteit geldt dat er nog veel technische ontwikkelingen zijn ten aanzien van de infrastructuur, zoals hogere vermogens, inductief laden, "in-motion charging", "smart charging" en "vehicle-to-grid".

5 Techniekontwikkeling: Vervoermiddelen

5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk behandelt de techniekontwikkeling op het niveau van vervoermiddelen voor verschillende duurzame energiedragers in mobiliteit. Hierin worden veelbelovende onderzoeks- en ontwikkelpaden ("R&D pathways") uitgelicht, waaraan op nationaal en internationaal niveau wordt gewerkt.

Op vervoermiddelniveau vinden op het gebied van CO₂-reductie en verbetering van de efficiëntie veel ontwikkelingen plaats. Deze ontwikkelingen zijn deels energiedrager-specifiek en deels algemeen. De voornaamste algemene ontwikkelingen voor voertuigen (wegverkeer) zijn:

- Reductie van de rolweerstand (door onder andere lagere rolweerstandbanden en -lagers);
- Reductie van de luchtweerstand (door betere aerodynamica van voertuigen);
- Gewichtsreductie (onder andere door gebruik van nieuwe, minder zware composietmaterialen);
- Efficiënter maken van auxiliaries zoals aircosystemen, pompen en generatoren.

Voor schepen beperkt bovenstaande lijst zich vooral tot:

- Reductie van waterweerstand (door bijvoorbeeld een efficiënt rompdesign);
- Verbeteren van de efficiëntie van auxiliaries.

Deze algemene ontwikkelingen zijn niet specifiek aan een energiedrager gekoppeld en worden daarom breed toegepast. Dit hoofdstuk zal uitsluitend de ontwikkelingen op energiedrager niveau belichten.

5.2 Conventioneel (benzine, diesel, LPG)

5.2.1 Benzine

Voertuigfabrikanten werken onder andere aan de volgende CO₂-reducerende technologieën voor benzinemotoren:

- **"Homogeneous Charge Compression Ignition";**
- **"Jet Ignition System";**
- **"Variabel compressie motoren".**

5.2.1.1. Homogeneous Charge Compression Ignition

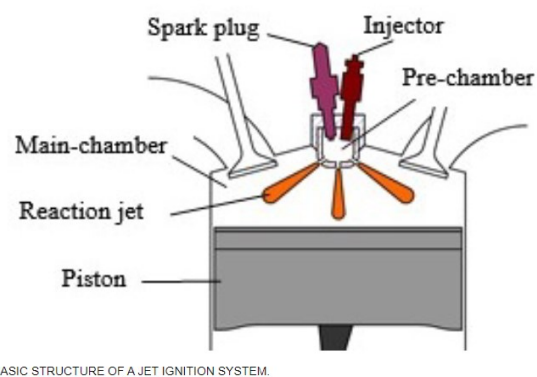
Bij *Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI)* motoren wordt een mengsel van lucht en brandstof gecomprimeerd voordat het in de brandstokamer wordt geïnjecteerd. De verbranding is hierdoor homogener en effectiever. Nadeel is dat het werkgebied (range van toerental en motorlast) kleiner is. Recentelijk heeft Mazda een variant van de HCCI-motor op de markt gebracht genaamd SkyActiv-X.

De motor heeft een bougie om het verbrandingsproces te sturen, wanneer deze niet in het werkgebied zit, zoals bijvoorbeeld tijdens een koude start.

5.2.1.2. Jet Ignition system / Prechamber combustion

Een benzinemotor valt onder de categorie *spark ignition (SI)* motoren. Wanneer de bougie een vonk afgeeft ontsteekt als eerste de brandstof rond de bougie, waarna de ontsteking als een "golf" door de verbrandingskamer loopt. Dit vereist een rijk mengsel om ervoor te zorgen dat het ontstekingsproces niet vroegtijdig stopt. Jet ignition heeft naast de verbrandingskamer een voorkamer (pre-chamber) met eigen brandstoftoevoer (zie onderstaande figuur).

Figuur 6: Jet Ignition System [Michigan State University, 2015]



In deze kamer wordt een rijk mengsel ontstoken. Het ontstoken mengsel stroomt door "nozzles" in de verbrandingskamer, waar het zorgt voor een snelle ontbranding van een "arm" mengsel (lees hoge verhouding zuurstof ten opzichte van brandstof). Een motor met "jet ignition" heeft een 10 tot 20% lager verbruik ten opzichte van een conventionele motor. De technologie wordt al sinds 2014 toegepast in Formule 1-wagens. De technologie wordt zover bekend nog niet in productievoertuigen toegepast. Bedrijven, waaronder het Duitse Mahle, zijn wel actief bezig om de technologie te promoten voor bredere toepassing.

5.2.1.3. Variabele compressiemotoren

Variabele compressiemotoren (VCMs) kunnen afhankelijk van een hoge of lage belasting de compressieverhouding in de cilinders veranderen. Bij lage of deelbelasting van de motor is een hoge compressie gewenst om een hoge efficiency en laag verbruik te realiseren. Bij een hoge belasting van de motor is een lage(re) compressieverhouding nodig (in combinatie met een turbo) om een hoog vermogen te realiseren. Door deze techniek is de motor efficiënter en zuiniger zonder in te boeten op vermogen. Nissan heeft in 2019 een productiemotor met dit concept geïntroduceerd in een aantal modellen van Nissan en Infinity. Nissan claimt dat het brandstofverbruik van deze benzinemotor vergelijkbaar is met dat van een dieselmotor.

5.2.2 Diesel

Dieselmotoren hebben een lange historie die teruggaat tot de uitvinding van Rudolf Diesel in 1893. In de afgelopen eeuw zijn dieselmotoren in zeer veel verschillende sectoren toegepast; de meest bekende is de dieselmotor als aandrijfmiddel in

transport en mobiliteit. Hoewel diverse innovatieve energiedragers steeds meer aan belang winnen, is de verwachting dat dieselmotoren de komende tientallen jaren nog een belangrijke rol zullen blijven houden, vooral voor het zware (weg)vervoer over lange afstanden.

De afgelopen twee decennia zijn er grote stappen gezet op het gebied van NO_x- en PM-emissies (met onder andere doorontwikkeling van "after-treatment systemen" en geavanceerde verbrandingstechnologieën). Onder druk van steeds striktere Europese emissie- en CO₂-wetgeving vinden nog steeds ontwikkelingen plaats om dieselmotoren schoner en zuiniger te maken, onder andere op het gebied van geavanceerde verbrandingstechnologieën en restwarmte-terugwinning. Tot op heden blijken deze concepten echter vooral bij deellasten voordelen te behalen en bij lage of hoge last minder goed te presteren. Een snelle introductie van deze technologieën in voertuigen wordt dan ook niet verwacht.

5.2.2.1. Geavanceerde verbrandingstechnologieën

Afgelopen decennia heeft veel onderzoek plaatsgevonden naar geavanceerde verbrandingstechnologieën, al dan niet met diesel als brandstof. Onder andere HCCI, PPC (Partly Premixed Combustion) en RCCI (Reactivity Controlled Compression Ignition) vallen binnen deze groep. Deze technieken hebben een homogener verbranding, zodat in potentie een lager verbruik en minder uitstoot gerealiseerd kan worden. Deze technieken worden nog nauwelijks in productiemotoren toegepast.

5.2.2.2. Waste heat recovery

Er wordt door verschillende fabrikanten gewerkt aan warmteterugwinning (ofwel WHR: Waste Heat Recovery). WHR draagt bij aan een lager brandstofverbruik door het rendement van de motor (efficiency) te verhogen. Hierbij wordt de warmte van de uitlaat of de nabehandelingsunit (met name de EGR: exhaust gas recirculation) gebruikt om weer elektrische of mechanisch energie op te weken. Deze energie kan weer worden gebruikt om subsystemen aan te drijven, zoals elektrische turbo stuurpompen etc. Een specifieke ontwikkelweg van WHR is de Organic Rankine Cycle (ORC). Deze technologie werkt goed bij lage/middelhoge temperaturen van de verbrandingsmotor en maakt efficiëntieverbeteringen tot 10% procent in proefopstellingen mogelijk. Onder andere in de maritieme sector wordt ORC al toegepast. Voor wegtransport (met name voor vrachtwagens) is er interesse om de systemen door te ontwikkelen voor marktintroductie.

5.2.3 LPG

De toepassing van LPG kan grofweg in de volgende categorieën worden ingedeeld:

- **Mono-fuel LPG** (LPG in SI motor);
- **Bi-fuel LPG** (benzine, LPG in SI motor) – vooral in het lichte segment (personen- en bestelauto's);
- **Bi-fuel LPG** (diesel, LPG in DI motor) – vooral in het zware segment (bussen en trucks).

De meeste auto's die op LPG rijden zijn ombouwauto's. Dit zijn benzineauto's, die middels een ombouwkit worden omgebouwd tot LPG-auto. Sommige OEMs (Original Equipment Manufacturer) bieden bi-fuel voertuigen aan. Dit zijn voertuigen, die met beide brandstoffen kunnen rijden: LPG en benzine (lichte segment) of LPG met diesel (zware segment).

5.2.3.1. Mono-fuel LPG

LPG kan toegepast worden in benzinemotoren door aanpassingen aan componenten en de ontstekingsconfiguratie, onder andere met behulp van ombouwkits. Het beperken van vermogensverlies blijft een uitdaging met het toepassen van LPG. Het grote volumeverschil tussen de vloeibare fase en de gasfase van LPG vermindert de toevoer van verse lucht in het inlaatspruitstuk. Hierdoor vermindert het volumetrische rendement. Dit resulteert in een lager vermogen.

De meest recente kits voor voertuigen op LPG maken gebruik van "Liquid Phase Direct Injection" (LPDI). Hierbij wordt de LPG direct vanuit de tank als vloeistof naar de injector gepompt. Een van de uitdagingen van LPDI is het creëren van een injector met voldoende vermogen om de hoge dynamische temperaturen te weerstaan. Een andere uitdaging van hoge druk injectie is de korte injectieduur. Dit vergt een betrouwbaar en geavanceerd elektronisch systeem om de motor bij hoge toerentallen te besturen.

5.2.3.2. Bi-fuel LPG (benzine of diesel, LPG)

Een bi-fuel LPG-voertuig heeft een hoger gewicht als gevolg van de aanwezigheid van een LPG-tank (naast de bestaande benzine- of diesel-tank). In dit kader wordt er gewerkt aan lichtere maar sterkere composiet tanks om het totaalgewicht te reduceren. Daarnaast zijn enkele motorontwikkelingen gaande wat betreft motorpingelen en de verminderde prestatie onder deelbelasting. Om deze uitdagingen op te lossen worden geavanceerde regelstrategieën ontwikkeld, met variaties in de hoeveelheid brandstof per injectie, de brandstofverhoudingen en het ontstekings- en het injectietijdstip.

5.3 Elektrisch

Voor batterij-elektrische vervoermiddelen spelen de volgende ontwikkelingen een centrale rol:

- **Batterijtechnologie;**
- **Batterij management systemen (BMS);**
- **Energiemanagementstrategieën (EMS);**
- **In-wheel motorconcepten;**
- **Oplaadtechnieken.**

5.3.1 *Batterijtechnologie*

Een van de meest evoluerende technologieën in elektrische vervoermiddelen is onmiskenbaar de batterij. Wereldwijd werken wetenschappers en de industrie eraan om de prestaties van lithium-ion cellen te verbeteren. Dit heeft het afgelopen decennium tot snel dalende batterijkosten (circa factor tien) en een stijgende energiedichtheid (circa factor 3) geleid [BloombergNEF, 2020]. De nieuwe generatie batterijen richt zich op een aantal onderwerpen:

- Minder gebruik en afhankelijkheid van kobalt;
- Verhogen levensduur van de batterij (lees: meer oplaadcycli);
- Solid-state batterijen.

5.3.1.1. Minder gebruik en afhankelijkheid van kobalt

Tegenwoordig wordt meer dan 50% van de wereldwijde kobaltproductie gebruikt in lithium-ion (Li-Ion) batterijen. Kobalt is een van de duurste metalen die gebruikt worden in batterijen. Bovendien is kobalt een zeldzame metaal dat vaak wordt gedolven onder slechte werkomstandigheden (deels met de hand in niet-beveiligde mijnen). Mede hierdoor wordt er veel onderzoek gedaan naar mogelijkheden om het

gebruik van kobalt in Li-Ion batterijen te verminderen. Een van de nieuwste cel chemie proporties is NCM811, een nikkel-kobalt-mangaan batterij, die 80% nikkel, 10% kobalt en 10% mangaan bevat.

Er zijn concrete marktintroductieplannen van diverse partijen voor deze nieuwe batterij:

- In april 2019 heeft de Chinese batterijfabrikant CATL aangekondigd dat het gestart is met de massaproductie van de NCM811;
- Kort daarop heeft de batterijfabrikant Automotive Energy Supply Corporation (AESC), ondertussen overgenomen door het Chinese Envision, plannen uitgebracht om NCM811 te produceren. Het bedrijf belooft een productiestart van NCM-batterijen in 2020 met een energiedichtheid van circa 300 Wh/kg per cel;
- LG Chem is in het eerste kwartaal van 2020 begonnen met de massaproductie van NCM712 batterijen (nikkel-kobalt-mangaan in een verhouding van 70%-10%-20%), zonder informatie over energiedichtheid bekend te maken;
- Tesla's nieuwste 21700 NCA-cellen (21 mm in diameter en 70 mm in lengte) bestaan voor 80% uit nikkel, 15% kobalt en 5% aluminium. In model 3 vertonen deze cellen een geschatte energiedichtheid van 246 Wh/kg.

5.3.1.2. Verhogen levensduur van de batterij

Om de levensduur van de batterij te verhogen, is het essentieel om cellen te ontwikkelen die een hoog aantal laadcycli doorstaan. Verwacht wordt dat batterijfabrikanten later dit jaar de productie opstarten van batterijcellen met een capaciteit van 4.000 tot 5.000 oplaadcycli, goed voor circa 1,6 miljoen voertuigkilometers. Toyota biedt ondertussen een voertuig aan (PoroAce) met een batterijgarantie tot 10 jaar en/of 1,5 miljoen kilometer.

5.3.1.3. Solid-state batterijen

Batterijfabrikanten hebben ook een roadmap voor solid-state batterijtechnologie geïntroduceerd als potentieel volgende generatie batterij, als vervanging van Li-Ion. In theorie is bij solid-state batterijen het risico dat elektrolyt (als gevolg van fysieke schokken) wordt blootgesteld aan de lucht of explodeert, laag. Dit komt omdat solid-state batterijen een vaste elektrolyt gebruiken die is gemaakt van polymeer of keramische materialen in plaats van de vloeibare elektrolyt, zoals wordt gebruikt in de huidige lithium-ion batterijen. Dankzij hun hoge prestaties bij hoge temperaturen en hoge capaciteit van vaste elektrolyten, heeft dit materiaal de potentie om de energiedichtheid verder te verhogen. Vóór 2025 worden echter geen solid-state batterijen op de markt verwacht.

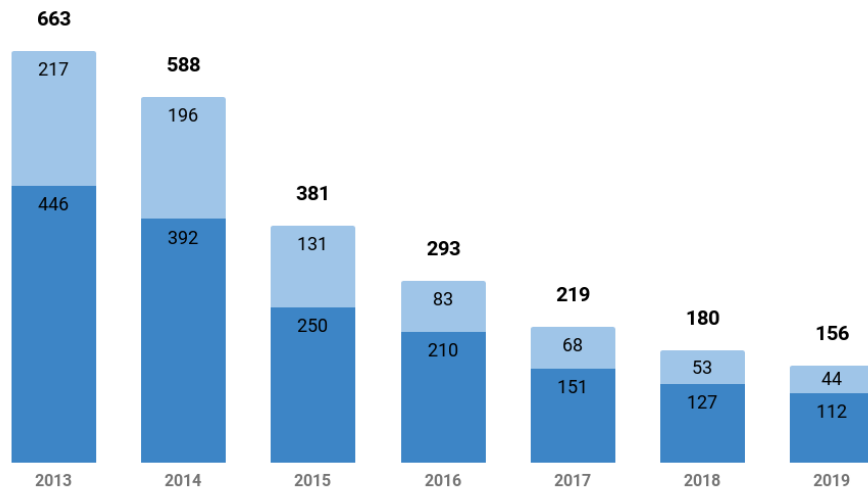
5.3.1.4. Impact op kosten

Verbeteringen die hierboven zijn beschreven resulteren naar verwachting in een verdere daling van de totale kosten van een batterij. In 2019 werden de gemiddelde kosten van een batterijpakket geschat op ongeveer \$ 156/kWh. Het huidige doel van de industrie is om tegen 2023 \$ 100/kWh te bereiken [BloombergNEF, 2020].

Figuur 7: Historische ontwikkeling van batterijkosten [BloombergNEF, 2020]

2019 BNEF Battery Price Survey (with Cell and Pack split)

Data derived from BNEF; prices in 2019 USD, 2019 cell/pack split estimated. Prices are industry weighted averages, not cost leaders



Graphic © Maximilian Holland / CleanTechnica

5.3.2 Batterij management systemen (BMS)

Recente onderzoeken in batterij management systemen (BMS) richten zich vooral op het verkrijgen van een beter inzicht in de kenmerken van een cel, zoals de laadstatus, de conditie van de batterij, enz. Dit wordt bereikt door machine learning-methoden toe te passen en ook door nieuwe vormen van modellering (fysieke modellering). Deze verbeteringen verhogen de efficiëntie van het pakket en maken een nauwkeurigere cel-balancering mogelijk. Verder wordt er ook onderzoek gedaan naar management op celniveau en een BMS op basis van cloudapplicaties.

5.3.3 Energiemanagementstrategieën (EMS)

Het thermische beheer van componenten in de aandrijflijn vormt een cruciaal deel van een elektrische voertuig, zeker naar mate de weersomstandigheden extremer worden. Energiemanagementstrategieën (EMS), die fungeren als toezichthouder van alle energiebuffers op het voertuig, distribueren de energie op een optimale manier over de subsystemen. Als gevolg hiervan blijft de temperatuur van de batterijen binnen een acceptabele bandbreedte. Dit is een belangrijke factor voor de levensduur.

5.3.4 In-wheel motorconcepten

Elektrische aandrijvingen worden ontwikkeld voor verschillende voertuigen en toepassingen: personenauto's, bussen, vrachtauto's, etc. De meest voorkomende elektrische voertuigen hebben achterwielaandrijving (RWD) of vierwielaandrijving (AWD). De elektromotoren zijn meestal verbonden met een aandrijftras die het koppel op de wielen overbrengt. In-wheel motorconcepten winnen de laatste tijd aan populariteit omdat hierbij geen sprake is van energieverliezen in de versnellingsbak, differentieel of aandrijfassen. Ook wordt het gewicht omlaag

gebracht, waardoor de actieradius van het voertuig verbetert. In 2021 worden de eerste voertuigen met in-wheel motoren op de markt verwacht.

5.3.5 *Oplaadtechnieken*

Er zijn twee belangrijke onderzoekstromen als het gaat om het opladen van voertuigen: snel opladen en draadloos opladen. Momenteel kunnen de snelste openbare laders een elektrisch voertuig in ongeveer 25 minuten opladen tot ongeveer 80% (bijvoorbeeld de Porsche Taycan). Met behulp van een Tesla V3 Supercharger kan een Tesla model 3 Long Range na 5 minuten laden een actieradius van 120 kilometer bereiken. De industrie heeft plannen voor laadstations die voertuigen kunnen opladen met laadvermogens tot 350 kW. Het thermische gedrag vormt hierbij de grootste uitdaging, voor zowel de infrastructuur (met name de stekker) als het voertuig (batterij en elektronica) zelf.

Onderzoekers aan de Universiteit van Pennsylvania werken aan een oplossing, waarbij de batterijtemperatuur tijdens het opladen wordt beperkt tot 60°C door middel van een dunne nikkelfolie. Hierdoor kan de batterij in tien minuten tot 80% worden opgeladen zonder deze te beschadigen of de levensduur te verkorten. Het zal naar verwachting twee tot drie jaar duren voordat de testfase van deze technologie is voltooid en het gebruikt kan worden in commerciële voertuigen.

Draadloos opladen zal naar verwachting de komende jaren toenemen, aangezien de prestaties vergelijkbaar zijn met traditioneel opladen, maar tegelijkertijd is het gemakkelijker en minder gevoelig voor schade. Een opstelling voor draadloos opladen bestaat doorgaans uit drie delen:

- Een muurinstallatie die het vermogen van het net overdraagt aan de primaire spoel;
- Een primaire spoel die zich onder de grond bevindt;
- Een secundaire spoel die zich in de bodem van het voertuig bevindt.

SAE-standaard J2954 definieert drie klassen laadsnelheden: WPT 1, 2 en 3, met een maximaal vermogen van respectievelijk 3,3 kW, 7,7 kW en 11 kW.

5.4 **Waterstof**

Waterstof kan in de mobiliteit op drie manieren worden toegepast:

- Waterstof als brandstof voor een brandstofcel in een elektrische aandrijving;
- Waterstof als brandstof voor een verbrandingsmotor;
- Waterstof als bouwsteen voor synthetische brandstoffen.

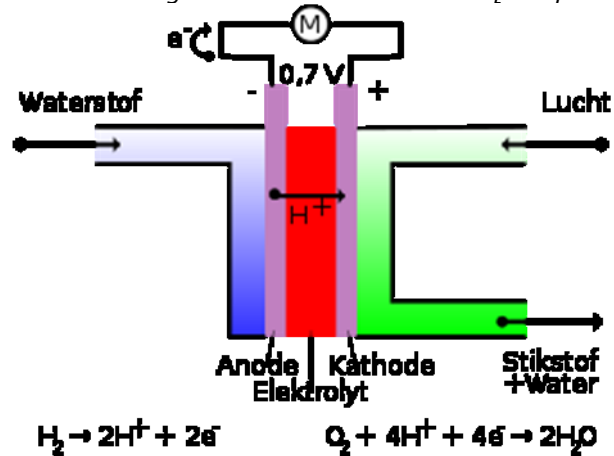
De laatste mogelijkheid is reeds in een eerder hoofdstuk besproken. Dit hoofdstuk richt zich op de technologieontwikkeling op het gebied van brandstofcel-voertuigen en H₂-verbranding.

5.4.1 *Brandstofcel*

Brandstofcellen zijn in principe opgebouwd uit twee polen (een anode en een kathode) die van elkaar gescheiden worden door elektrolyt (zie het onderstaande figuur). Waterstof en zuurstof worden afzonderlijk van elkaar aan de brandstofcel toegevoerd. Met behulp van een katalysator wordt de waterstof aan de anode gesplitst in twee waterstofionen en twee elektronen. De elektronen stromen vervolgens via een elektrisch circuit naar de kathode. De protonen en elektronen

komen bij de kathode weer samen en reageren daar met de zuurstof tot water (H₂O).

Figuur 8: Schematische weergave van een brandstofcel [Wikipedia, 2020]



De belangrijkste uitdagingen voor het commercialiseren van brandstofcellen in mobiliteit en het concurreren met bestaande en alternatieve technologieën zijn de huidige hogere meerkosten van het voertuig, de levensduur en het rendement van de brandstofcel. Het Amerikaanse Department of Energy (DOE) heeft daarom voor 2025 ambitieuze doelen gesteld voor de levensvatbaarheid van waterstofvoertuigen. De kosten moet dalen, de levensduur en de efficiëntie van de brandstofcel moeten stijgen. Deze doelen zijn ook relevant voor de Europese en Nederlandse markt, omdat Amerika voorloper is op het gebied van waterstof en de toepassing van waterstof in vervoer. Nieuwe generatie katalysatoren, die inzetten op vermindering of vervanging van platina (het duurste component van de brandstofcel), moeten hieraan bijdragen.

5.4.2 Waterstof in de verbrandingsmotor

Behalve waterstof-brandstofcellen, zijn er ontwikkelingen voor de toepassing van waterstof in verbrandingsmotoren. Het gaat voor een groot deel om kleine aanpassingen in de bestaande motortechniek en infrastructuur. Een groot voordeel hiervan is de hoge tolerantie voor de kwaliteit van de gebruikte waterstof (voor de brandstofcel is dit nog vaak de oorzaak van de korte levensduur). Over het algemeen is de toepassing zeer betrouwbaar en vergt weinig onderhoud. Voor de eindgebruiker is waterstofverbranding bovendien een betaalbare verduurzamingsoptie, omdat het geen grote nieuwe investeringen vergt in voertuig en infrastructuur. De opschaling naar groene waterstof is hierdoor waarschijnlijk makkelijker en goedkoper dan met brandstofcellen.

Er zijn meerdere partijen die aan een concrete uitrol van deze technologie werken. De in Duitsland gevestigde start-up Keyou heeft een samenwerking met de grote motorfabrikant Deutz gestart om de technologie breed, in verschillende modaliteiten, toe te gaan passen (zie onderstaande figuur). De technologie is reeds beproefd op een 12 meter bus en laat zien dat de emissies zeer laag zijn (volgens de fabrikant kleiner dan 0,1 gCO₂/kWh). Ook de HC, CO, NO_x en PM emissies zijn laag (in de orde van 0,01 g/kWh). Het is een definitiekwestie of deze motoren door de wetgevers en de vervoerders daadwerkelijk als nul-emissie aandrijvingen zullen worden gezien. Vooralsnog lijkt dat wel zo te zijn en lijkt er een plaats voor de waterstof verbrandingsmotor te zijn weggelegd [Europese Commissie, 2019]. In

Nederland werkt TNO aan deze technologie voor stationaire en mobiele toepassingen, onder andere met motorontwikkelaars en eindgebruikers, onshore en offshore.

Figuur 9: Mogelijke toepassing van Keyou-technologie bij modaliteiten [Keyou, 2020]



5.4.3 *Waterstof als bouwsteen voor synthetische brandstoffen*

Dit onderwerp is reeds behandeld in hoofdstuk 3.4.2.2.

5.5 **Gasvormig**

Gasvoertuigen kunnen worden onderscheiden in CNG en LNG. Een belangrijk voordeel van LNG ten opzichte van CNG (gecomprimeerd aardgas) als brandstof voor voertuigen is de energiedichtheid. LNG is hierdoor de geprefereerde oplossing voor vrachtwagens die gebruikt worden voor zowel regionale distributie als langeafstandstransport. CNG is de geprefereerde oplossing voor vrachtwagens (en soms bussen) in de stadsdistributie.

Daarnaast zijn er ook verschillende verbrandingsconcepten: mono-fuel en dual-fuel. Mono-fuel motor verbranden 100% CNG of LNG met vonkontsteking (SI). Dual-fuel motoren verbranden een mix uit CNG of LNG met een andere brandstof (over het algemeen met diesel) onder hoge druk met directe injectie (HPDI). De onderstaande paragrafen gaan in op de huidige techniekontwikkeling van deze motoren.

5.5.1 *Mono-Fuel motoren*

De mono-fuel gasmotor is al redelijk ver ontwikkeld. Verdere techniekontwikkeling richt zich op het verhogen van de efficiency en de reductie van methaanslip (methaan, dat onverbrand wordt uitgestoten). Methaanslip is een 25 keer krachtiger broeikasgas dan CO₂. De uitstoot van kleine hoeveelheden methaan kan dus tot hogere broeikasgasemissies leiden. Het Duitse MTU onderzoekt technieken om dit tegen te gaan, door onder andere de turbolader efficiënter te laten draaien. Dit onderzoek bevindt zich nog in een vroeg stadium.

5.5.2 *Dual-Fuel motoren*

De belangrijkste ontwikkeling voor gasmotoren in het recente verleden was de ontwikkeling en toepassing van de Westport-injector in Volvo's Euro VI (dual-fuel) vrachtwagen. De ontwikkeling was het afgelopen decennium meermaals aangekondigd, maar kreeg pas in 2018 een marktintroductie. In deze nieuwe generatie HPDI-motoren wordt gas ontstoken met een kleine hoeveelheid diesel. In de praktijk kan hierdoor een CO₂-reductie van rond 20% gerealiseerd worden ten opzichte van diesel [TNO-2, 2019]⁸, zonder noemenswaardige aantasting van de rijeigenschappen van een dieselmotor (vermogen, koppel, remvermogen).

Vergelijkbaar met HPDI wordt bij RCCI (Reactivity Controlled Compression Ignition) diesel als hulpbrandstof gebruikt om de hoofdbrandstof te ontsteken. In tegenstelling tot HPDI wordt bij RCCI eerst LNG ingespoten en daarna pas de diesel. Dezelfde componenten als bij HPDI kunnen hiervoor gebruikt worden, onder andere die van Westport. Potentiële voordelen tegenover HPDI zijn een (nog) lager verbruik, minder CO₂ en een minder gecompliceerd nabehandelingssysteem. De ontwikkeling bevindt zich echter nog in een vroege fase en zal de komende jaren nog niet beschikbaar zijn voor gebruik in serieproducten.

5.6 Vloeibare biobrandstoffen (hoge mixen)

5.6.1 Wegvervoer

Low-blends (E10 en B7)

Sinds enkele jaren kunnen voertuiggebruikers bij veel tankstations terecht voor benzine en diesel waar respectievelijk 10% (E10) en 7% (B7) biobrandstof aan toegevoegd zijn:

- **E10 compatibiliteit:** nieuw geproduceerde benzine-voertuigen zijn compatibel, maar vooral oudere benzine voertuigen kunnen problemen ondervinden met afdichtingen en brandstofinspuitsystemen. In Nederland gaat het hier ongeveer om 10% van alle benzine-voertuigen en zal dalen naarmate oudere voertuigen worden vervangen;
- **B7 compatibiliteit:** diesel voertuigen zijn allemaal geschikt voor B7.

High-blends (E20 en B10)

Geschiktheid van motoren voor hogere blends (B10 zoals in Frankrijk beschikbaar en E20) is momenteel niet evident.

- **E20 en B10 compatibiliteit:** ACEA publiceerde in 2018 een overzicht van compatibele voertuigen voor B10, waarbij slechts een klein deel B10 toestaat. Verhoging van de bijmengverhouding naar B10 en E20 is technisch haalbaar, maar is zeker niet vanzelfsprekend inzetbaar voor Europese voertuigen in verband met de verfijnde emissietechnieken, tenzij dit Europese regelgeving gaat betreffen en OEM's hun voertuigen hiervoor gaan ontwikkelen en vrijgeven.

⁸Voor een gemiddelde langafstandsrit liggen de broeikasgasemissies CO₂ en CH₄, wanneer deze samen worden uitgedrukt in een CO₂-equivalente uitstoot, gemiddeld lager dan een groep voertuigen met dieselmotoren (n=5) van een wat ouder modeljaar (rond 2013), met een gemiddeld verschil van rond de 19%. Het verschil is een paar procent hoger op de snelweg en mogelijk wat lager in de stad. In de uitstoot van CO₂ en CH₄ uit de uitlaat is het aandeel van de CH₄ emissie (ook wel methaanslip genoemd) wanneer deze wordt uitgedrukt in CO₂-equivalenten ongeveer 2-3%. Ook wanneer voertuigen van een nieuwer modeljaar (2018-2019) een paar procent minder CO₂ zouden uitstoten door technologische verbeteringen, zou het verschil in de CO₂-uitstoot significant zijn. Voor een gemiddelde langafstandsrit liggen de gemeten emissies van NO_x en deeltjesaantallen op een vergelijkbaar niveau als van een groep van reeds geteste Euro VI trucks met een dieselmotor.

High-blends (HVO)

Een interessante biobrandstof als aanvulling, of op den duur zelfs als mogelijke vervanging van diesel brandstof, is HVO (Hydrotreated Vegetable Oil). HVO is een schonere tweede generatie biobrandstof.

- **HVO (100%) compatibiliteit:** sinds 2016 zijn de brandstofspecificaties van paraffinische dieselolie waaronder HVO vastgelegd in norm EN15940. Het heeft daarmee een grotere compatibiliteit met bijna alle nieuwe vrachtwagen, bussen en off-road diesel voertuigen. Voor personenvoertuigen en lichte bestelwagens zijn het Franse OEM's die Euro 5 en 6 voertuigen hebben vrijgegeven voor HVO. Andere OEM's zijn aan het testen. Hierbij gaat het om de prestaties en levensduur van afdichtingen, brandstofinspuitsysteem en uitgasnabehandelingssystemen;
- **HVO (30%) compatibiliteit:** daarnaast kan HVO tot ongeveer 30% bijgemengd worden aan B7 diesel zonder de EN590 normspecificaties te overschrijden. Daarmee is het in alle dieselmotoren en toepassingen inzetbaar.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van merken, motoren en marktsegmenten (toepassingen) die zijn vrijgegeven voor HVO, in zowel EU als VS [Kuster, 2019]. Ook alle DAF-motoren zijn inmiddels compatibel voor HVO.

Tabel 3: Overzicht van vrijgegeven merken, motoren en marktsegmenten (toepassingen) voor HVO [Kuster, 2019]

Merk	Toepassing	Motor	Emissie niveau
Agco	Alle toepassingen	Alle motoren	Alle niveaus
Audi	Personenwagens	Alle VS diesels	Alle niveaus
BMW	Personenwagens	Alle VS diesels	Alle niveaus
Caterpillar	Alle toepassingen	Alle motoren	Alle niveaus
Citroën	Personenwagens	Alle motoren	Euro 5, Euro 6
Citroën	Lichte bedrijfswagens	Alle motoren	Euro 5, Euro 6
Cummins	Alle toepassingen	Cummins F3.8, B4.5, B6.7 en L9 motoren	Euro 6
Daf	Alle toepassingen	Daf, alle motoren	Euro 3, Euro 4, Euro 5
Daimler	Vrachtwagens	OM934, OM 936 feb 2016 en later	Euro 6
Daimler	Vrachtwagens	OM470, OM471 (1e gen) feb 2016 en later	Euro 6
Daimler	Bussen	OM934, OM470 Q2 2015 en later	Euro 6
Daimler	Personenwagens	Alle Noord-Amerikaanse motoren	Alle niveaus
Daimler	Lichte bedrijfswagens	Alle Noord-Amerikaanse motoren	Alle niveaus
Deere	Alle toepassingen	Alle motoren	Alle niveaus
Deutz	Off-road toepassingen	Alle motoren	Alle niveaus
Ford	Lichte bedrijfswagens	Ford 6.7 I Power Stroke 2011-	ULEV 2
Ford	Lichte bedrijfswagens	Ford 6.4 I 2008-2010	ULEV 1
Ford	Lichte bedrijfswagens	Ford 6.0 I 2005-2010	ULEV
Ford	Lichte bedrijfswagens	Ford 3.2 I Power Stroke 2015-	ULEV 2
General Motors	Lichte bedrijfswagens	6.6 I Duramax	ULEV 2
General Motors	Lichte bedrijfswagens	2.8 I Duramax	ULEV 2
Hatz	Off-road toepassingen	Alle motoren	Alle niveaus
Hitachi	Off-road toepassingen	Alle motoren	Alle niveaus
Hyundai	Off-road toepassingen	Alle motoren	Alle niveaus
Isuzu	Off-road toepassingen	Alle motoren	Alle niveaus
Isuzu	Vrachtwagens	Alle motoren	Alle niveaus
Iveco	Bussen	Tektor motoren familie	Euro 6
Iveco	Generator sets	Alle motoren tot 2010	Alle niveaus
Kohler	Off-road toepassingen	Alle motoren	Alle niveaus
Komatsu	Off-road toepassingen	Alle motoren	Alle niveaus

Merk	Toepassing	Motor	Emissie niveau
Kubota	Off-road toepassingen	Alle motoren	Alle niveaus
MAN	Alle toepassingen	D0834, D0836, D0266, D2676	Euro 5
MAN	Alle toepassingen	D2676 nieuw (met D0834, D0836)	Euro 6a
MAN	Alle toepassingen	D0834, D0836, D2066, D2676, D3876 (01-2017)	Euro 6c
Mercruiser	Marine toepassingen	Alle VW motoren 1.9 – 4.2 liter	Alle niveaus
MTU	Alle toepassingen	Alle motoren behalve 1000-1500	Alle niveaus
Navistar	Alle toepassingen	Alle motoren	Alle niveaus
New Holland	Alle toepassingen	FPT industrial NEF en Cursor	Euro 6 Step C
Nissan	Lichte bedrijfswagens	Nissan Titan XD (Cummins V8)	ULEV 2
Paccar	Alle toepassingen	Paccar MX	Alle niveaus
Peugeot	Personenwagens	Alle motoren	Euro 5, Euro 6
Peugeot	Lichte bedrijfswagens	Alle motoren	Euro 5, Euro 6
RAVO	Veegmachines	Alle motoren	Euro 6
Renault trucks	Vrachtwagens	Met Volvo motor (vrachtwagens > 10 ton)	Euro 5, Euro 6
Scania	Vrachtwagens	Alle motoren	Euro 5, Euro 6
Scania	Bussen	Alle motoren	Euro 5, Euro 6
Steyr	Marine toepassingen	Alle motoren	Alle niveaus
Volkswagen	Personenwagens	Alle VS diesels	Alle niveaus
Volvo	Vrachtwagens	Alle motoren	Alle niveaus
Volvo	Bussen	Alle motoren	Alle niveaus
Volvo	Off-road toepassingen	Alle motoren	Alle niveaus
Volvo	Marine toepassingen	Alle motoren	Alle niveaus
Volvo	Generator sets	Alle motoren	Alle niveaus

5.6.2 *Binnenvaart*

Biobrandstoffen zijn in technisch opzicht relatief gemakkelijk toepasbaar in verschillende kwaliteiten en blends (zowel low-blend als high-blend) met dieselbrandstof. Motorleveranciers laten afwijkende specificaties in blends met FAME, GTL en HVO vaak wel toe, waardoor er gewoon met conventionele technologie kan worden gevaren. De beschikbaarheid van biobrandstoffen voor schepen is dus vooral afhankelijk van de beschikbaarheid van bunkerlocaties voor biobrandstoffen. Voor zover bekend is er alleen een bunkerlocatie in Nederland waar in 2019 voor het eerst een binnenvaartschip op volledig duurzame biobrandstof werd gebunkerd. Voor meer informatie zie [RR-SBM, 2020].

5.6.3 *Mobiele werktuigen*

Voor mobiele werktuigen geldt min of meer hetzelfde als bij het wegvervoer: hogere mixen zijn niet zomaar toepasbaar als ze niet voldoen aan EN590 (diesel) en EN228 (benzine). Er zijn fabrikanten zoals Caterpillar die biodiesel-mixen tot B20 toestaan. Voor HVO compatibele mobiele werkvoertuigen is er steeds meer keuze, vooral als het gaat om brandstoffen die voldoen aan de EN15940-norm, zoals HVO. De meeste fabrikanten leveren nieuwe werktuigen die hiermee overweg kunnen. Doordat HVO schoner is dan FAME biodiesels is het gemakkelijker om motoren op deze brandstof vrij te geven. Onderzoek gaat over levensduur en prestaties van afdichtingen, brandstofinspuitsystemen en uitlaatgas-nabehandelingssystemen.

5.7 **Conclusie: techniekontwikkeling vervoermiddelen**

Verbrandingsmotoren voor conventionele energiedragers zoals benzine en diesel zijn al zeer lang op de markt. Deze motoren hebben al een lange ontwikkeling achter de rug. Toch vinden nog steeds verbeteringen en vernieuwingen plaats om motoren efficiënter en zuiniger te maken. Door nieuwe verbrandingsconcepten, warmteterugwinning en meer flexibiliteit in technologie te introduceren zal ook de komende jaren nog winst kunnen worden geboekt bij conventionele motoren op benzine en diesel. Biobrandstoffen kunnen relatief eenvoudig en op korte termijn de CO₂-uitstoot verminderen. Lage blends zijn tegenwoordig vaak geen probleem meer. Bovendien worden hoge blends biobrandstoffen steeds vaker door fabrikanten toegelaten.

Grote ontwikkelingen vinden plaats bij relatief nieuwe energiedragers zoals beschreven in de volgende secties.

Elektrisch

Bij batterij-elektrische voertuigen vinden grote ontwikkelingen plaats om kosten te verlagen en functionele aspecten als laadtijd en actieradius te verbeteren. Dit gebeurt onder andere door:

- Verbetering van de batterij technologie (kosten en capaciteit);
- Laadmethode en -technologie, sneller laden met hogere vermogens, maar ook bijvoorbeeld draadloos laden;
- Batterijmanagement en energiemangement in het voertuig.

De ontwikkelingen zullen ertoe bijdragen dat batterij-elektrische voertuigen de komende jaren een steeds grotere actieradius krijgen, sneller en eenvoudiger kunnen laden en goedkoper worden.

Waterstof

Waterstof kan op meerdere manieren in de mobiliteit ingezet worden, bijvoorbeeld als brandstof in een brandstofcel, direct als brandstof in een verbrandingsmotor, en als bouwsteen voor synthetische brandstoffen (E-fuels). Deze laatste toepassing lijkt veelbelovend, maar is nog ver verwijderd van grootschalige toepassing. Momenteel zijn brandstofcellen nog kostbaar. Verwacht wordt dat de komende tien jaar de capaciteit van brandstofcellen groter zal worden en de kosten lager, waardoor waterstof voertuigen steeds interessanter zullen worden.

Gasvormig

Gasvormige energiedragers als CNG en LNG worden ook meer en meer toegepast in bussen en vrachtwagens. LNG is, door de hoge energiedichtheid, met name ook interessant voor (middel) lange afstand transport.

Vloeibare biobrandstoffen (hoge mixen)

Biobrandstoffen zijn in technisch opzicht relatief gemakkelijk toepasbaar in de binnenvaart en voor mobiele werktuigen. Voor het wegverkeer kunnen de meeste nieuwe voertuigen blends tot 10% (E10) en 7% (B7) aan. Voor hogere blends geldt dat deze door de fabrikant moeten worden toegelaten. Voor personenvoertuigen en lichte bestelwagens zijn het de Franse OEM's die Euro 5 en 6 voertuigen hebben vrijgegeven voor HVO. Andere OEM's zijn ook aan het testen.

6 Beleidsadvisering techniekontwikkeling⁹

Op basis van de kennis uit dit rapport is een beleidsadvisering geschreven. De belangrijkste adviezen staan hieronder weergegeven:

- Richt beleidsinstrumenten op een gelijktijdige groei van de energiedrager zelf, de noodzakelijke infrastructuur en de vloot en presenteer deze in onderlinge samenhang;
- Richt beleid op het mobiliteitssysteem én het energiesysteem. Juist in de koppeling liggen de mogelijkheden om maatschappelijke vragen te beantwoorden. Dit levert vaak ook nieuwe business cases op. Zo is Tesla het enige automerk dat in deze coronatijd winst maakt, (mede) omdat ze CO₂-credits verkopen aan fabrikanten die minder duurzame voertuigen verkopen [NOS, 2020];
- Onderzoek de mogelijke gevolgen voor de veiligheid wanneer er verschillende duurzame energiedragers worden aangeboden bij hetzelfde tankstation ("multifuel" tankstations);
- Onderzoek wat de ideale looptijd en voorwaarden zijn voor vergunningen bij tank- en laadinfrastructuur en hoe deze meer flexibel kan meebewegen met de ontwikkelingen in de markt. Daarbij bestaat er een spanningsveld tussen kort lopende vergunningen, die flexibel kunnen inspringen op innovaties en lange termijn concessies (15 jaar), die door de langere afschrijvingstijd de business case voor investeringen in duurzame infrastructuur verbeteren;
- Voorkomen moet worden dat er op korte termijn veel infrastructuur wordt gerealiseerd die op middellange termijn technisch achterhaald is (lock-in effect). Mogelijk zal bij de start de infrastructuur overgedimensioneerd (moeten) worden. Het advies is om samen met de sector te bekijken welke mix van technologie (modulair bouwen), financieringsinstrumenten (voor risico investeringen) en normering hier het beste resultaat gaat geven;
- Onderzoek de gevolgen van mobiliteit op het lokale energiesysteem, bijvoorbeeld door mobiliteit verplicht op te nemen in de Regionale Energiestrategieën (RES'en);
- Ga vroeg in gesprek met netbeheerders om mogelijke barrières ten aanzien van de benodigde netwerkenaanpassingen in kaart te brengen en waar mogelijk tijdig te slechten;
- Onderzoek hoe waterstof-infrastructuur kan worden gerealiseerd op een manier dat de levering van waterstof niet leidt tot veel extra voertuigkilometers, bijvoorbeeld door lokale waterstofproductie of toevoer via pijpleidingen;
- Schrijf de verbrandingsmotor niet af. Volg de onderzoeken op het gebied van ultra-schone verbrandingsmotoren in combinatie met klimaatneutrale brandstoffen (zoals groene waterstof) voor het zware wegtransport. Deze bieden wellicht ook mogelijkheden voor de binnenvaart en mobiele werktuigen.

⁹ Deze beleidsadvisering is onder verantwoordelijkheid van Rijkswaterstaat opgesteld.

Als dit leidt tot een kwalitatief hoogwaardige toepassing die voldoet aan de milieu-eisen, betaalbaar is en overeenkomstig qua functionaliteiten, dan vraagt dit om aanpassing van de wetgeving om deze toepassing ook als (nagenoeg) zero-emissie oplossing te beschouwen. Dit kan ook een extra boost geven aan de ontwikkeling van groene waterstof.

7 Referenties

- [BloombergNEF, 2020] Electric Vehicle Outlook, Bloomberg NEF, 2020
- [BOVAG-RAI Mobiliteit, 2020]. Mobiliteit in Cijfers Auto's 2019 – 2020, Stichting BOVAG-RAI Mobiliteit, 2020
- [ELAAD, 2020] PROGNOSE LAADINFRASTRUCTUUR, ELAAD, 2020
- [ETIP, 2020] CURRENT STATUS OF ADVANCED BIOFUELS DEMONSTRATIONS IN EUROPE, ETIP, 2020
- [Europese Commissie, 2019] Clean Vehicle Directive, European Commission, 2019
- [JRC, 2014] WELL-TO-WHEELS Appendix 2 - Version 4.a, JRC, 2014
- [Keyou, 2020] Webinar on hydrogen combustion, Keyou, 2020
- [Kuster, 2019] Goedkeuringen fabrikanten HVO EN15940, Kuster, 2019
[<https://blauwedieseltanken.nl/wp-content/uploads/2019/05/Goedkeuringen-fabrikanten-HVO-EN15940.pdf>]
- [Michigan State University, 2015] A Control-Oriented Jet Ignition Combustion Model for an SI Engine, 2015
[https://www.researchgate.net/publication/303381097_A_Control-Oriented_Jet_Ignition_Combustion_Model_for_an_SI_Engine]
- [NEa, 2019] Rapportage Energie voor Vervoer in Nederland 2018
- [NEa, 2020] Rapportage Energie voor Vervoer in Nederland 2019, NEa, 2019
- [NOS, 2020] Automaker met hoogste beurswaarde maakt ook tijdens coronacrisis winst, 2020 [<https://nos.nl/artikel/2341584-automaker-met-hoogste-beurswaarde-maakt-ook-tijdens-coronacrisis-winst.html>]
- [RR-SBM, 2020] Routeradar Straatbeeldmonitor, Rijkswaterstaat, 2020
- [TKI NieuwGas, 2018] Contouren van een Routekaart Waterstof, TKI Nieuw Gas, 2018
- [TNO, 2019] E-FUELS for truck transport, shipping and aviation, TNO, 2019
- [TNO-2, 2019] Emissions testing of a Euro VI LNG-diesel dual fuel truck in the Netherlands, TNO, 2019
- [Wikipedia, 2020] Brandstofcel [<https://nl.wikipedia.org/wiki/Brandstofcel>]

8 Bijlagen

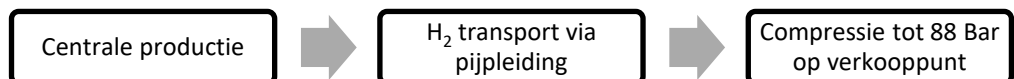
8.1 Waterstofproductie- en distributieroutes

Op het gebied van waterstofproductie zijn er twee verschillende productiemethoden: (1) elektrolyse en (2) steam methane reforming (SMR). Hierbinnen zijn vervolgens drie verschillende routes te onderscheiden:

- **Grijze waterstof** wordt opgewekt door fossiele brandstoffen in het geval van elektrolyse, en aardgasomzetting in het geval van SMR;
- **Blauwe waterstof** kent soortgelijke productiemethoden, alleen wordt hier de CO₂ die vrijkomt bij het SMR proces of de opwekking van grijze elektriciteit afgevangen en opgeslagen (zogenoeten carbon capture & storage, CCS);
- **Groene waterstof** wordt opgewekt middels elektrolyse op basis van groene stroom, of SMR op basis van biomassa.

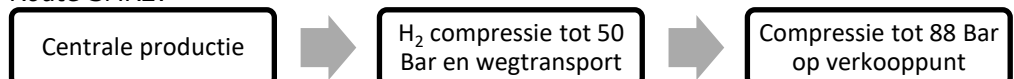
De volgende overzichten geven de well-to-tank emissies voor de SMR productieroutes [JRC, 2014]. Hier wordt per definitie uitgegaan van aardgastoevoer naar de EU via een pijpleiding van circa 4.000 km met distributie door hogedruk hoofdleidingen. De eerste distributieroute toont sterke overeenkomsten met het huidige tankstation in Rhooen, waarbij de waterstof wordt opgewekt middels een gecentraliseerde reformer, waterstoftransport via pijpleiding en compressie bij het verkooppunt.

Route SMR1:



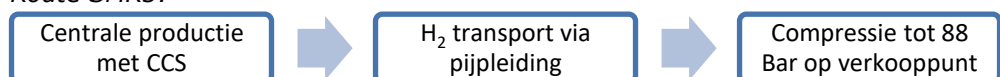
Bij opschaling van het aantal waterstof-tankstations en de beschikbare infrastructuur wordt echter niet uitgegaan van aansluiting op ondergrondse waterstof-pijpleidingen. Aannemelijker is levering van de waterstof middels tube trailers, tankwagens waarin waterstof gecomprimeerd is tot circa 50 Bar. Compressie voor gebruik gebeurt vervolgens bij het verkooppunt.

Route SMR2:



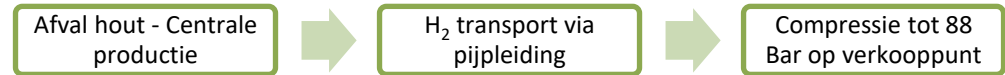
De twee voorgenoemde routes zijn beide gebaseerd op productie en distributie van grijze waterstof. Bij centrale productie is het mogelijk carbon capture and storage (CCS) toe te passen, waardoor bijvoorbeeld de route van Rhooen een blauwe waterstof-productieketen vormt.

Route SMR3:



Groene waterstof middels SMR is mogelijk door gebruik te maken van biomassa als grondstof voor de reforming. Hier vallen flinke reducties te halen met betrekking tot de uitstoot van CO₂. Daarentegen is het in het kader van energie-efficiëntie geen aantrekkelijke productie/distributie route.

Route SMR4:



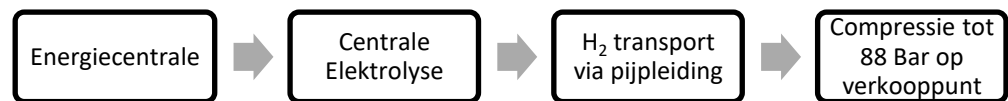
In onderstaande tabel wordt de WTT-uitstoot in gram CO₂-equivalenten per Mega Joule brandstof energie weergegeven. Hieruit is op te maken dat route SMR4 (groen) de minste uitstoot geniet. Route SMR2 (grijs), waar gebruik wordt gemaakt van wegtransport en vooralsnog het meest aannemelijke scenario, heeft de meeste uitstoot. Met betrekking tot energie-efficiëntie, leveren alle routes een betrekkelijk laag rendement. De groene route heeft zelfs meer energie nodig dan het levert.

Tabel 4: Uitstoot in gram CO₂-equivalenten per MJ brandstof energie en de energie efficiëntie in MJ per MJ brandstofenergie voor SMR waterstof-routes.

Route	gram CO _{2eq} / MJ _{H2}	MJ / MJ _{H2}
SMR1	104,4	0,81
SMR2	108,1	0,88
SMR3	43,2	0,87
SMR4	15,7	1,05

De volgende overzichten geven de well-to-tank emissies voor de elektrolyse productieroutes [JRC, 2014]. Route ELE1 geeft een waterstof-productieproces weer met centrale elektrolyse. Transport verloopt, net als in de voorgenoemde SMR route voor Rhooon, via een pijpleiding en uiteindelijke compressie bij het verkooppunt.

Route ELE1:

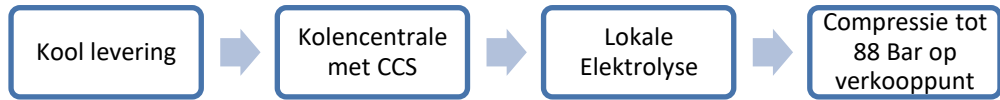


Het voordeel aan elektrolyse ligt vooral in de mogelijkheid tot lokale opwekking, ofwel waterstofproductie aan de pomp. De onderstaande Route ELE2 gaat uit van grijze energie opwekking en vervolgens waterstofproductie (elektrolyse) en compressie bij het verkooppunt.

Route ELE2:



Door carbon capture & storage toe te passen op de centrale energie opwekking, is de voorgaande route om te zetten in een blauwe waterstof-productieroute. Dit beperkt de uitstoot tot een aantal onderdelen van de WTT, zoals bijvoorbeeld de levering van kool in onderdeel 1.

Route ELE3:

Door waterstof op te wekken met windenergie worden er grote reducties bewerkstelligd in de well-to-tank uitstoot. De discussie hier blijft dat de nog onvoldoende hoeveelheid groene energie wellicht niet in inefficiënte waterstofproductie moet worden geïnvesteerd.

Route ELE4:

De onderstaande tabel staat een overzicht van de hoeveelheid CO₂-uitstoot in gram per opgewekte Mega Joule waterstof voor eenieder van de voorgaande elektrolyse routes. De tweede kolom toont de efficiëntie als hoeveelheid energie gebruikt in de productie per hoeveelheid brandstof energie van waterstof. Uit deze ratio blijkt dat elektrolyse tot dusver zeer inefficiënt is.

Tabel 5: Uitstoot in gram CO₂-equivalenten per MJ brandstof energie en de energie efficiëntie in MJ per MJ brandstofenergie voor elektrolyse waterstof routes.

Route	gram CO _{2eq} / MJ _{H2}	MJ / MJ _{H2}
ELE1	226,3	3,92
ELE2	408,7	2,96
ELE3	126,5	3,60
ELE4	13,0	0,87