

Waterstof tot nadenken

Marieke Nauta – Planbureau voor de Leefomgeving – marieke.nauta@pbl.nl
Gerben Geilenkirchen – Planbureau voor de Leefomgeving – gerben.geilenkirchen@pbl.nl

Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 25 en 26 november 2021, Utrecht

Samenvatting

Nederland heeft in de Klimaatwet vastgelegd in 2050 (vrijwel) klimaatneutraal te willen zijn. Dit doel brengt een radicale energietransitie met zich mee; een opgave waarvoor binnen de sector mobiliteit noch voor het te doorlopen pad, noch voor het einddoel alle vakjes al zijn ingekleurd. Waterstof is één van de energiedragers die, hoewel dit momenteel nog in minimale mate gebeurt, binnen verschillende toepassingen een plek zou kunnen hebben in een klimaatneutraal mobiliteitssysteem. De discussie hierover is volop gaande, maar binnen de sector mobiliteit is beleid tot nog toe nauwelijks gericht op het gebruik van waterstof, waardoor de toepassing maar beperkt van de grond komt.

De discussie over het gebruik van waterstof beperkt zich niet tot de sector mobiliteit maar overstijgt sectorgrenzen. Ook in andere sectoren zoals de industrie en de gebouwde omgeving is waarschijnlijk een rol weggelegd voor waterstof bij het behalen van klimaatdoelen. De (zeker op korte termijn) beperkt beschikbare productiecapaciteit maakt dat waterstofladders worden opgesteld om tot prioritering van de inzet te komen. In deze ladders staat toepassing in de industrie meestal bovenaan, gevolgd door specifieke toepassingen binnen de gebouwde omgeving en mobiliteit.

Binnen mobiliteit wordt voornamelijk het gebruik in de scheep- en luchtvaart, en iets verder naar beneden op de ladders het zwaardere wegverkeer genoemd. Als we inzoomen op de verschillende modaliteiten, dan blijken inderdaad binnen deze modaliteiten kansen te liggen voor het gebruik van waterstof. Zonder gebruik van waterstof wordt de kans aanzienlijk kleiner dat we in 2050 een klimaatneutraal mobiliteitssysteem hebben in Nederland. In het Nederlandse Klimaatakkoord zijn daarom ambities vastgelegd over de groei van waterstofmobiliteit, maar de bijbehorende afspraken beperken zich tot het verder uitwerken van plannen om die ambities waar te maken. Tot op heden zijn die plannen niet uitgewerkt. Ook bij de zeescheepvaart en de luchtvaart, die buiten het Klimaatakkoord vallen, is beleid vooralsnog niet specifiek op (toepassingen met) waterstof gericht waardoor gebruik niet van de grond komt.

In het licht van de beperkte vooruitgang die tot op heden is geboekt en de enorme opgave die nog resteert om tot een klimaatneutraal mobiliteitssysteem te komen is het zaak snel tot concreter beleid te komen voor toepassing van waterstof in mobiliteit. Voor zware wegvoertuigen is financiële ondersteuning van de innovatiefase kansrijk, evenals inzet op tankinfrastructuur. Voor vaartuigen is het faciliteren van experimenten ook veelbelovend, waarbij bovendien synthetische brandstoffen potentie hebben. Ten slotte is voor de luchtvaart aandacht nodig voor de realisatie van productiefaciliteiten voor synthetische kerosine.

1. Inleiding

Waterstof. Één van de simpelste, zo niet hét simpelste molecuul dat er bestaat op aarde. Het bestaat uit twee atomen die op slechts één plek een verbinding met elkaar aangaan. De twee atomen zijn de lichtste atomen die je kunt vinden op aarde; het zijn waterstofatomen die bestaan uit een enkele proton en een enkele elektron. Het molecuul is 'overzichtelijk'; we kennen de eigenschappen goed en dit maakt gebruik voor ons als mens erg prettig.

Nu is het zo dat we, in het licht van verre gaande klimaatambities (respectievelijk 49% en 95% emissiereductie in 2030 en 2050, commitment aan het akkoord van Parijs), voor een grote opgave staan wat betreft de transitie van het energiesysteem. Waterstof kan hier een belangrijke rol in vervullen. De RLi concludeert zelfs dat 'waterstof een cruciale schakel vormt in de toekomstige klimaatneutrale energie- en grondstoffenvoorziening' (RLi, 2021). Ook binnen de mobiliteitssector ontstaat recentelijk meer discussie over het gebruik van waterstof. Zo heeft TNO een roadmap uitgebracht voor gebruik van waterstof in zwaar materieel en wordt vanuit het Klimaatakkoord momenteel gewerkt aan een convenant voor gebruik van waterstof in mobiliteit (TNO, 2020) (IenW, 2021). Er worden op dit moment nog maar weinig vehikels op waterstof aangeboden, maar er zijn verschillende technologische opties. Zo kan waterstof in een zogenaamde brandstofcel omgezet worden in elektriciteit die vervolgens voor aandrijving kan zorgen. Ook kan het in een verbrandingsmotor gebruikt worden door het simpelweg te verbranden. Het is bovendien relatief makkelijk om waterstof in de vorm van een andere stof op te slaan, waardoor met name de energiedichtheid gunstiger wordt. Op die manier ontstaan meer mogelijkheden voor toepassing in bijvoorbeeld het zwaardere vervoer. Voor schepen gaat het dan voornamelijk over ammoniak en methanol, en voor vliegtuigen over synthetische kerosine (e-fuels). Een vliegtuig zou dus in feite op dezelfde manier kunnen blijven vliegen als nu, alleen is de brandstof niet meer fossiel.

Nu zult u misschien denken 'Allemaal leuk en aardig, maar er kleven toch ook nadelen aan waterstof?' Dat klopt, en daarom pogen wij in dit paper een beeld te schetsen van waar de kansen en risico's van het gebruik van waterstof in mobiliteit in zitten. We beginnen met een beschrijving van de huidige status en waarom het gebruik van waterstof in mobiliteit vooralsnog niet van de grond komt. Vervolgens zoomen we uit en bekijken we de discussie op sector-overschrijdend niveau. Want al is waterstof een veelvoorkomend atoom, er zitten beperkingen aan de mate waarin we het kunnen gebruiken. Keuzes voor inzet moeten gemaakt worden. Daarna zoomen we weer in op de mobiliteitssector en zullen we per toepassing de kansen en risico's beschrijven. We concluderen en geven vervolgens aanbevelingen over welke modaliteiten het beleid zou kunnen focussen, en welke vorm dit beleid zou kunnen krijgen.

2. (Gebrek aan) focus op waterstof in mobiliteit

2.1 Nederlands beleid niet expliciet op waterstof gericht

Om aan klimaatdoelen zoals die in het Klimaatakkoord en de Klimaatwet gesteld zijn te voldoen, is in Nederland een palet aan beleid opgesteld om de energietransitie onder andere in de sector mobiliteit van de grond te laten komen. Beleid wordt voor een groot deel bewust zo ingestoken, dat verschillende technologieën een kans maken ('technologieneutraal'). Het beleid schrijft de gewenste uitkomst voor, namelijk nul-emissie mobiliteit, en de markt kan vervolgens zelf bepalen welke technologieën daar het beste bij passen. Zo is er momenteel een subsidie voor nul-emissie personenauto's (SEPP), waarbij het te ontvangen subsidiebedrag gelijk is voor elke technologie. De zero-emissie zones voor stadslogistiek die op de planning staan voor 2025 en daarna, mogen betreden worden met alle mogelijke voertuigen, zolang deze maar geen uitstoot hebben. De DKTI is een innovatiesubsidie zowel gericht op batterij-elektrisch, als waterstof en biobrandstoffen. De Green Deal Zeevaart, Binnenvaart en Havens richt zich op 150 zero-

emissie binnenvaart schepen, zonder in te gaan op welke aandrijflijnen daarbij horen. Voor de sloop- en luchtvaart is de transitie overigens nog in zo'n vroege fase, dat er überhaupt nog weinig tot geen concrete doelen zijn wat betreft technologische ontwikkeling van de vloot.

Voor een dergelijke technologie-neutrale benadering valt wat te zeggen. In onderzoek wordt doorgaans gesteld dat overheden technologieneutraal beleid moeten voeren (Kemp 1994, Bakker 2010, Azar & Sandén 2011). De overheid heeft een informatieachterstand ten opzichte van het bedrijfsleven. Het bedrijfsleven zou beter in staat moeten zijn om te bepalen welke oplossingen optimaal zijn voor het aan te pakken probleem. Daarom zal de overheid de randvoorwaarden moeten stellen, bijvoorbeeld in de vorm van CO₂-eisen aan nieuwe voertuigen, maar niet de techniek voor moeten schrijven waarmee aan deze randvoorwaarden wordt voldaan. Dit voorkomt dat in een te vroeg stadium wordt gekozen voor een technologie die op termijn toch niet de beste oplossing blijkt voor het op te lossen probleem. Vroege keuzes kunnen leiden tot de zogenaamde *technology lock-in*, waarbij gevestigde belangen in de niet-optimale technologie verhinderen of bemoeilijken dat de optimale technologie de markt kan betreden.

Eerste wegvoertuig op brandstofcel

In 1966 was er al een wegvoertuig dat zich op een brandstofcel met waterstof voortbewoog. General Motors was de maker van dit bestelbusje, dat blijkbaar sneller dan 100 km/u kon en een actieradius van zo'n 200 kilometer had. Helaas bleek het voertuig niet veilig genoeg om echt de weg op te gaan. Het heeft lang geduurd tot de eerste brandstofcel auto commercieel beschikbaar was. In 2013 kwam de Hyundai ix35 op de markt.



Aan een technologie-neutrale aanpak kleven echter ook nadelen. Het tempo waarin nieuwe aandrijftechnologie op de markt komt, kan namelijk worden vertraagd. Voor innovaties bestaat in de early-adopterfase typisch nog geen verdienmodel. Specifieke stimulering door middel van bijvoorbeeld overheidssubsidies kan innovaties sneller marktrijp maken. Daar waar het beeld bestaat dat bepaalde technologieën op termijn noodzakelijk zijn om aan doelen te voldoen, kan het dus zinvol zijn om technologie-specifiek beleid te voeren.

In het Nederlandse Klimaatakkoord wordt overigens het belang van waterstof voor het halen van de klimaatdoelen voor mobiliteit wel onderkend. Waterstof wordt benoemd als

belangrijke energiedrager in mobiliteit, zeker voor het zware transport zoals vrachtauto's, OV-bussen en dieseltreinen. Ondanks deze belangrijke rol is in het Klimaatakkoord alleen afgesproken dat er in 2020 een convenant wordt gesloten over het gebruik van waterstof in mobiliteit, terwijl er voor batterij-elektrische mobiliteit veel uitgebreider beleid is vastgelegd. Als ambitie voor dit convenant geldt de realisatie van 50 waterstoftankstations, 15 duizend personenauto's op waterstof en 3 duizend zware voertuigen met een brandstofcel in het jaar 2025. Dit als '*strategische basis voor versnelde groei richting 2030 en met name 2050*'. Bij het schrijven van dit paper, in september 2021, is nog geen convenant getekend. En is dus nog niet duidelijk hoe de ambities uit het Klimaatakkoord gerealiseerd moeten gaan worden.

2.2 Kentering in Europees beleid?

Net als dat het nationale mobiliteitsbeleid niet expliciet op waterstof gericht is, was dit ook internationaal het geval. De Europese Unie heeft in 2020 haar Hydrogen Strategy gelanceerd, waarin ambitieuze doelstellingen staan voor de productie van groene waterstof (40 GW binnen Europa en 40 GW daarbuiten), zodat waterstof breed in de maatschappij gebruikt kan worden. De Europese Unie onderschrijft ook de mogelijk belangrijke rol van waterstof in de mobiliteitssector. Binnen de Green Deal en de verschillende beleidspakketten die hier onder vallen, is er echter geen beleid te vinden dat zich specifiek richt op waterstof in deze sector. Voor wegvervoer is waterstof één van de opties om te voldoen aan de doelstelling van verplichtingen voor inzet van hernieuwbare energie (binnen de REDII, Renewable Energy Directive II) in vervoer en aan de Europese CO₂-normen voor nieuwe voertuigen, maar net als bij nationaal beleid geldt dat op dit moment alternatieven goedkoper zijn om verplichtingen in te vullen. Voor scheep- en luchtvaart is de REDII eveneens relevant, en voor luchtvaart bovendien het ETS (Emission Trading System), waarmee een beperking in de hoeveelheid uitstoot beoogd wordt. Maar ook bij de scheep- en luchtvaart geldt dat goedkopere alternatieven dan (direct of indirect gebruik van) waterstof beschikbaar zijn, zoals het gebruik van biobrandstoffen en efficiëntieverbetering.

In het recent gelanceerde Fit For 55 pakket worden voor het eerst doelen gesteld voor het gebruik van waterstof in de sector mobiliteit, zij het indirect. Het voorstel voor aanpassing van de regelgeving voor hernieuwbare energie bevat een subdoel voor het gebruik van zogenoemde 'hernieuwbare energiedragers van niet-biologische afkomst' (RFNBO's – Renewable Fuels of Non-Biological Origin). RFNBO's betekenen niet per definitie ook het gebruik van waterstof, maar vooralsnog wordt waterstof wel in (vrijwel) alle gevallen gebruikt. In het wetsvoorstel voor aanpassing van de richtlijn voor hernieuwbare energie (de RED), dat het gehele energiesysteem omvat, wordt een subdoel van 2.6% geopperd voor gebruik van RFNBO's in mobiliteit (op energetische basis). Voor de luchtvaart wordt in het 'ReFuelEU Aviation Initiative' naast een algemene verplichting voor inzet van hernieuwbare energie ook een specifiek subdoel voorgesteld voor het gebruik van synthetische kerosine. Dit doel moet oplopen van een bescheiden 0,7% in 2030 tot 28% in 2050. Deze wetsvoorstellen duiden erop dat binnen de EU het gevoel van urgentie voor het gebruik van waterstof binnen mobiliteit toeneemt. De wetsvoorstellen zijn nog niet in beton gegoten, maar vormen wel een interessante wending in de beleidsvorming rond waterstofmobiliteit. Zoals hiervoor beschreven is deze wending in het Nederlandse beleid nog niet zichtbaar. Verderop in het paper zullen we beredeneren of en hoe een dergelijke wending voor verschillende modaliteiten al dan niet nodig is, en op welke manier die ingevuld zou kunnen worden.

2.3 Gebruik waterstof komt nog niet van de grond

De combinatie van hoge kosten voor toepassing van waterstof en beleid dat niet expliciet er op gericht is, maakt dat dit molecuul vooralsnog maar weinig gebruikt wordt binnen mobiliteit. In het Klimaatakkoord wordt wel een doelstelling gegeven van 300.000 voertuigen op waterstof in 2030, maar naar verwachting zal dit doel niet gehaald worden

als er geen beleidsintensivering plaatsvindt. Men kan zich afvragen of dit erg is; zolang alternatieven goedkoper zijn is het misschien wel logischer om hier voor te gaan en dat is nou juist ook het doel van technologie-neutraal beleid. De markt kiest voor de beste optie. Echter, hierbij is het wel belangrijk om in oogschouw te houden dat de markt niet altijd alle mogelijke risico's en belemmeringen overziet. Want welke technologie gaat Amerika op inzetten? Hoeveel biobrandstoffen zijn eigenlijk wereldwijd beschikbaar over 20 jaar? En van welke biobrandstoffen kunnen we garanderen dat ze duurzaam tot stand zijn gekomen? In welke mate willen we biograndstoffen importeren om onze mobiliteit van energie te voorzien? Een bedrijf kijkt altijd vanuit haar eigen oogpunt, binnen de kaders die het beleid stelt, en heeft niet altijd het zicht op ontwikkelingen daarbuiten die bovendien soms lastig zo niet onmogelijk te voorspellen zijn.

Een voorbeeld van waar inzet van de overheid cruciaal is, is de uitrol van infrastructuur. Het kabinet heeft als doel gesteld om 50 waterstof tankstations in operatie te hebben in 2025. Op dit moment zijn er een handvol tankstations beschikbaar voor het grote publiek, maar voor de komende jaren staan er redelijk veel op de planning, optellend tot een stuk of dertig (H2 rijders, 2021). Het kan echter niet ontkend worden dat er kip-ei situaties omtrent tankinfrastructuur en voertuigen optreden; de markt investeert soms niet omdat er geen tankstations zijn, maar ook potentiële investeerders (waaronder de overheid) zijn soms terughoudend in het plaatsen van tankstations omdat onzeker is welke kant de markt zich op gaat bewegen (Epema, 2018). De overheid dient er voor te waken dat de mate van uitrol van infrastructuur geen significante vertraging voor de ingroei van voertuigen oplevert.

Vuilniswagens op waterstof

Hoewel waterstof toepassingen nog niet echt in de mobiliteitsmarkt terug te vinden zijn, zijn er wel degelijk experimenten gaande waarin het gebruik ervan op verschillende manieren wordt getest. Zo is er binnen de DKTi innovatieregeling een subsidie verleend aan een project in Amsterdam, waar de gemeente in samenwerking met de Hogeschool van Amsterdam vuilniswagens op waterstof op de weg brengt. De voertuigen passen goed binnen de plannen om in 2025 zero-emissie zones te hebben, en schijnen door gunstige actieradius en oplaadtijd de voorkeur te hebben boven elektrische vuilniswagens. Op de planning stond om de voertuigen te voorzien van waterstof geproduceerd uit het afval dat ze ophalen. Of dit plan daadwerkelijk doorgezet wordt is onduidelijk, maar het idee is creatief.

Synthetische kerosine

'Duurzaam vliegen' is misschien nog ver weg, en een grootschalige oplossing die daadwerkelijk niet tot opwarming leidt is (nog) niet gevonden, maar eerste stapjes worden toch wel degelijk gezet. Zo is op Rotterdam The Hague Airport een pilot aan de gang met als doel de productie van duizend liter synthetische kerosine per dag. Daarnaast investeert Schiphol in een heuse fabriek die over een aantal jaar 50 duizend liter per dag zou moeten produceren. Het eerste passagiersvliegtuig met, zij het voor een klein deel, synthetische kerosine als brandstof is inmiddels (letterlijk, niet figuurlijk) gevlogen. Een groot voordeel van het gebruik van synthetische kerosine is dat huidige type vliegtuigen gebruikt kunnen worden in plaats van dat er nieuwe gebouwd moeten worden.

3. Waterstof in het grotere plaatje

Laten we even uitzoomen van de mobiliteitssector. De discussie over waterstof speelt namelijk ook in andere sectoren, en het gebruik in mobiliteit kan daar niet los van worden gezien. Vandaag de dag wordt waterstof in de industrie al veelvuldig gebruikt als grondstof voor de productie van materialen en voor productie van hitte. Daarnaast zijn er mogelijkheden om in de toekomst bestaande productiemethoden te verduurzamen door gebruik van waterstof, zoals bijvoorbeeld de productie van staal. Het gebruik als

warmtebron zorgt er bovendien voor dat het een optie is om huizen mee te verwarmen. Sterker nog, vóór de ontdekking van het gas in Groningen gebeurde dit ook veelvuldig, zij het niet in pure vorm maar als onderdeel van gasmengsels (Waszink, 1996).

De energietransitie is een complex onderwerp en niemand weet precies hoe het uiteindelijke energiesysteem er uit zal komen te zien. Waterstof is één van de energiedragers die bijdraagt aan de complexiteit van het vraagstuk. Want; wat zijn de voor- en nadelen van het gebruik van waterstof ten opzichte van alternatieven? Is toepassing beperkt en zo ja, in welke sectoren heeft gebruik ervan prioriteit? Kan waterstof wel op grote schaal verantwoord en schoon geproduceerd worden? Het zijn vragen die over de grenzen van de verschillende sectoren heengaan. En dat is lastig omdat specialisten vaak gefocust zijn op een bepaalde sector; het is niet voor niks dat de opgaven beschreven in het Klimaatakkoord onderverdeeld zijn in de sectoren Industrie, Mobiliteit, Gebouwde Omgeving, Landbouw en Elektriciteit. In de volgende paragrafen beschrijven we de discussie die op sector-overschrijdende schaal speelt en laten we zien waar de sector mobiliteit zich bevindt in deze discussie.

3.1 Aanbod van (groene) waterstof

Waterstof als atoom komt veelvuldig voor op de aarde; het is in zeer veel moleculen aanwezig. Dat zegt alleen nog niks over de beschikbaarheid van het molecuul waterstof. Dit komt wel voor als zodanig, in de lucht bijvoorbeeld, maar slechts in kleine hoeveelheden en het is zeker niet makkelijk te gebruiken op die manier. Het moet dus geproduceerd worden uit andere moleculen, en (gelukkig) kan dit ook. Een relatief goedkope manier om waterstof te produceren, en tevens de meest gebruikte manier tot nu toe is met methaan via een proces genaamd Steam Methane Reforming (SMR). Vandaag de dag wordt dit veelvuldig gebruikt in de industrie. Een nadeel van dit proces is dat er CO₂ bij vrijkomt. Waterstof die op deze manier geproduceerd wordt, wordt ook wel 'grijze waterstof' genoemd. In een klimaatneutrale samenleving is voor grijze waterstof dus geen plaats.

Doordat waterstof een kansrijk molecuul is, maar de productie op dit moment nog niet duurzaam plaatsvindt, wordt veel onderzoek gedaan naar duurzame productiemethoden. Eén optie is het afvangen van de CO₂ die ontstaat bij SMR. Theoretisch gezien is dit een goede optie om te verduurzamen, omdat het grootste deel van de CO₂ weggenomen kan worden en opgeslagen kan worden. In Nederland lijken bovendien redelijk veel mogelijkheden te bestaan voor CO₂-opslag, bijvoorbeeld in leegstaande gasvelden. Maar er is ook discussie over het gebruik van deze techniek. Het zorgt mogelijk voor afhankelijkheid van het buitenland, omdat gaswinning in Nederland naar verwachting steeds minder wordt (PBL, 2020). Bovendien is niet iedereen er van overtuigd dat er geen risico op weglekken en aardbevingen zijn bij CO₂-opslag. Ook zijn er geluiden dat de ontwikkeling van blauwe waterstof de ontwikkeling van groene waterstof zou kunnen tegenhouden. Desondanks is blauwe waterstof op dit moment meer schaalbaar dan groene waterstof, en kan het op die manier op de kortere termijn vermoedelijk meer CO₂-reductie bewerkstelligen. Het kabinet lijkt de strategie te volgen blauwe waterstof op de korte termijn in te zetten, ondertussen de kosten voor groene waterstof omlaag te brengen en laatstgenoemde op de langere termijn grootschalig in te zetten (Rijksoverheid, 2020).

Wat is dan groene waterstof? Dit is waterstof die op een geheel andere manier wordt geproduceerd, namelijk uit water. Dit kan door zogenoemde 'elektrolyse', waarbij stroom water splitst in waterstof en zuurstof. Deze twee gassen kunnen vervolgens gescheiden worden, waarna waterstof gebruikt kan worden voor verscheidene toepassingen. Dit wordt op dit moment als de meest schone techniek gezien, omdat er geen broeikasgassen of luchtverontreinigende stoffen vrijkomen. Het is echter nog een erg dure techniek, mede omdat deze nog in de kinderschoenen staat. Bovendien vraagt het veel energie. Om echt 'groen' te zijn moet de elektriciteit van duurzame energiebronnen

zoals wind en zon afkomstig zijn. Voorlopig is het aanbod van groene elektriciteit echter nog beperkt. Dat maakt de waterstofroute minder aantrekkelijk dan bijvoorbeeld batterij-elektrische aandrijving. Het energierendement van die laatste route ligt veel hoger, waardoor je een groter aantal kilometers emissieloos kan aandrijven dan via de waterstofroute. Al deze factoren maken dat de snelheid waarmee groene waterstof productie opgeschaald kan worden beperkt is. Ondanks dat er veel mogelijke toepassingen voor waterstof zijn, is het daarom niet zomaar gezegd dat deze waterstof wanneer nodig ook op een duurzame manier geleverd kan worden.

3.2 Prioritering toepassingen

Zolang er onzekerheid is over het toekomstige aanbod van (groene) waterstof, is het logisch te bestuderen in welke toepassingen waterstof het beste ingezet kan worden. Er bestaan verschillende opvattingen over de mate en het tijdsfad waarin waterstof in verschillende sectoren geïmplementeerd zou kunnen worden. Dat er een rol voor waterstof in de industrie is weggelegd wordt vrij breed onderschreven. Op dit moment wordt het, zoals hierboven ook al genoemd, al gebruikt voor hogetemperatuur proceswarmte en voor de productie van bepaalde moleculen. In de toekomst lijkt een toename van dit gebruik kansrijk. Naast de industrie zien veel partijen ook een rol weggelegd binnen mobiliteit en de gebouwde omgeving, maar de mate waarin en het tijdsfad waarin dit zou moeten verschillen.

Zo geeft het *TKI Topsectoren Nieuw Gas* aan dat gebruik van waterstof in de industrie en het transport urgent is, terwijl gebruik in de gebouwde omgeving ook reëel is maar nog nader onderzocht moet worden. Binnen transport zou voor het gros van de modaliteiten vroeg of laat een rol voor waterstof weggelegd zijn. Het kabinet Rutte-III geeft in haar 'Kabinetsvisie Waterstof' aan dat op de langere termijn waterstof binnen de gebouwde omgeving potentieel een belangrijke bijdrage kan leveren. Wat betreft transport ziet het kabinet voornamelijk een rol binnen het zwaardere wegvervoer, de binnenvaart, in treinen en op de langere termijn wellicht bepaalde segmenten van de luchtvaart. Er zijn ook partijen die waterstofladders hebben gemaakt, waarin zij prioritering voor verschillende (sub)sectoren aangeven. Zo heeft Natuur&Milieu een waterstofladder gemaakt, waarin zij een afweging hebben gemaakt op basis van beschikbare alternatieven, energie-efficiëntie en kosten. Ook Michael Liebreich, een gerenommeerd expert duurzame energie die veel over dit onderwerp publiceert, heeft een waterstofladder gemaakt. Hoewel binnen beide waterstofladders wat verschillende definities worden aangehouden, komen zij in grote lijn wel met elkaar overeen wat betreft toepassing binnen transport. In onderstaande tabel is te zien wat deze grote lijn is voor de verschillende modaliteiten.

Modaliteit	Rol van waterstof	Onderbouwing
Internationale lucht- en scheepvaart	Belangrijk; direct gebruik en (voornamelijk) in de vorm van synthetische brandstoffen	Naast biobrandstoffen, lijkt voor grootschalige verduurzaming waterstof het enige alternatief
Binnenvaart	Mogelijk; direct gebruik en/of in de vorm van synthetische brandstoffen	Batterij-elektrisch is mogelijk in lichte toepassingen voor korte afstand (bijvoorbeeld ferries), maar elders is waterstof kansrijker
Zwaar wegvervoer	Beperkt; direct gebruik	Voornamelijk voor lange-afstandsvervoer heeft waterstof voordelen ten opzichte van batterij-elektrisch
Licht wegvervoer	(Vrijwel) niet	Batterij-elektrisch is goedkoper en waterstof kent geen duidelijke voordelen

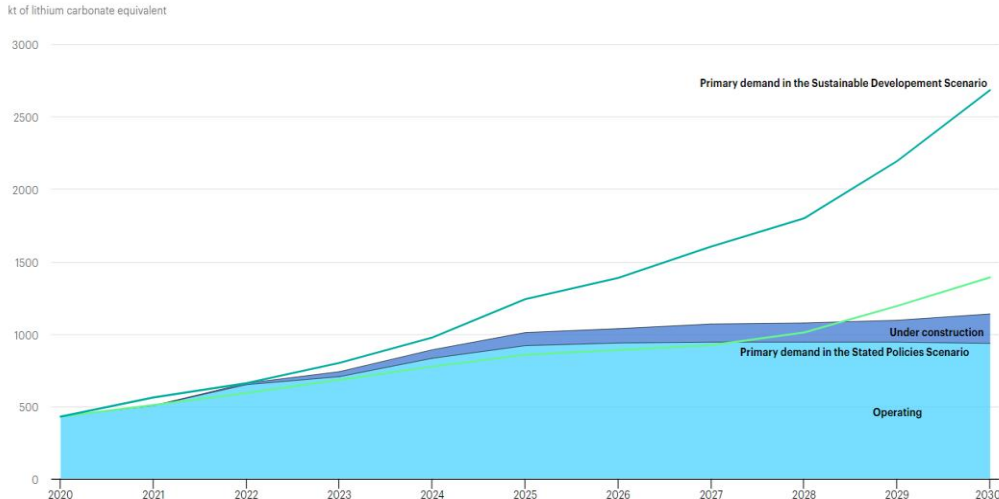
4. Kansen voor waterstof binnen mobiliteit

Theoretisch gezien kan waterstof in bijna alle modaliteiten binnen de sector mobiliteit in een bepaalde vorm worden toegepast. Het is echter niet voor niets dat er verschillende geluiden rondgaan over de modaliteiten waar je waterstof zou moeten willen gebruiken. Zoals de tabel hierboven al laat doorschemeren, zijn er namelijk voor alle modaliteiten ook alternatieven aanwezig. Het gebruik van waterstof kent voor- en nadelen, en het gebruik van deze alternatieven evengoed. De voor- en nadelen zijn afhankelijk van de toepassing; zo ontstaat het idee dat je in sommige toepassingen wellicht wel, maar in andere geen of minder waterstof moet willen gebruiken. Hieronder gaan we eerst in op gebruik in verschillende toepassingen, namelijk wegvervoer, scheepvaart en luchtvaart, en vervolgens schetsen we een beeld van de implicaties dit kan hebben in termen van energiegebruik.

4.1 Wegvervoer

In het wegvervoer wordt het steeds duidelijker dat in een duurzame toekomst een belangrijke rol weggelegd is voor batterij-elektrisch rijden. Hoewel waterstof ook via een batterij gebruikt wordt en hierin omgezet wordt in elektriciteit, wordt met batterij-elektrisch hier de batterij bedoeld die je direct oplaadt aan het net. Momenteel gaat dit vrijwel altijd om de Lithium-ion batterij. De markt voor batterij-elektrische personenauto's groeit momenteel exponentieel. In het zwaardere vervoer komt de markt minder snel op gang; dit heeft voor een groot deel te maken met het feit dat de capaciteit van batterijen beperkt is en daarmee de actieradius van het voertuig ook. Bij zwaardere voertuigen speelt dit 'probleem' meer. Waterstof lijkt vooralsnog juist daarom voor deze categorie wegvoertuigen kansrijk, doordat de energiedichtheid relatief gunstig is. Maar het beeld hierover lijkt de afgelopen te kenteren. Waar de toepassingsmogelijkheden van batterij-elektrische aandrijving in vrachtauto's zo'n vijf jaar geleden nog als beperkt werden ingeschat, is de afgelopen jaren gebleken dat door de snelle ontwikkeling van deze technologie ook in het zware wegvervoer het gebruik steeds kansrijker lijkt. De eerste elektrische vrachtauto's zijn inmiddels al op de markt. Waar dit nu vooral kleinere modellen zijn, worden de komende jaren ook grote en zware voertuigen verwacht met batterij-elektrische aandrijving. Er zijn bovendien ook technologische ontwikkelingen gaande waardoor de Lithium-ion batterij of nog een ander alternatief (bijvoorbeeld de solid-state batterij) mogelijk ook aantrekkelijk worden.

Er zijn echter ook zorgen omtrent de uitrol van elektrische wegvoertuigen; één daarvan is de ontwikkeling van het aanbod van bepaalde mineralen. Een elektrische auto gebruikt ongeveer 6 keer zo veel mineralen als een conventionele auto, waardoor bij een sterk groeiende markt een flinke toename in de vraag zal ontstaan naar deze mineralen. Illustratief hiervoor is lithium; een stof die op dit moment veel wordt gebruikt in batterijen van elektrische auto's. In 2040 omvat deze toepassing mogelijk 90% van de totale lithiumvraag (IEA, 2021). In onderstaande figuur zijn wereldwijde productieplannen voor lithium uitgezet tegenover beleidsplannen rondom de inzet van lithium (IEA, 2021).



Duidelijk is dat de productieplannen achterblijven bij de beleidsplannen en nog veel meer achter blijven bij de plannen die nodig zijn voor het Sustainable Development Scenario van de IEA (66% kans op minder dan 1,8 graad verwarming). Binnen dit scenario overschrijdt wellicht alleen al de vraag naar lithium voor personen- en bestelauto's de hoeveelheid die nu op de planning staat voor productie in 2030. De gunstig wordende kosten in samenwerking met Nederlands beleid gericht op 100% zero-emissie verkoop van personenauto's in 2030, maakt dat deze markt naar verwachting flink gaat groeien. Ontwikkeling van nieuwe productiefaciliteiten voor lithium duurt echter lang (10-15 jaar), waardoor het verstandig kan zijn ook naar andere opties te kijken (Metabolic, 2019). Het recyclen van lithium uit oude accu's kan een manier zijn om op termijn (een deel van) de extra vraag op te vangen.

Naast batterij-elektrisch vormen ook biobrandstoffen een mogelijke route om het wegvervoer te verduurzamen. Biobrandstoffen kunnen makkelijk toegepast worden binnen conventionele voertuigen en zijn bovendien een relatief goedkope optie. Het aanbod van biobrandstoffen is echter beperkt en er moeten ook daar keuzes gemaakt worden voor het gebruik ervan. De SER heeft daarom vorig jaar een breed gedragen duurzaamheidskader opgesteld voor de inzet van biograndstoffen in verschillende toepassingen. Het kabinet heeft dit kader omarmd. Het kader is helder over de inzet van biobrandstoffen in het lichte wegverkeer: die moet de komende tijd worden afgebouwd omdat alternatieven nu al voor handen zijn. In het zware wegverkeer kunnen biobrandstoffen als overbruggingsoplossing dienen tot de alternatieven voldoende beschikbaar zijn. De SER verwacht grofweg dat dit vanaf 2030 zou kunnen. Wel wijst de SER erop dat in de tussentijd moet worden voorkomen dat de vraag naar biograndstoffen te groot wordt in deze overbruggingstoepassingen. Ook moet een lock-in worden vermeden: de tijdelijke inzet op biobrandstoffen mag niet ten koste gaan van het tempo waarmee duurzamere alternatieven worden ontwikkeld. In het Klimaatakkoord is afgesproken dat het gebruik van biobrandstoffen voor wegverkeer mag groeien tot maximaal 60 PJ in 2030. In 2019 was dit nog 25 PJ en in 2020 daalde dat, mede door de coronacrisis, tot 20 PJ. Het Klimaatakkoord zet dus in op een flinke toename van het gebruik van biobrandstoffen in wegverkeer. Tegelijkertijd lijkt de ontwikkeling van waterstofmobiliteit nog niet echt van de grond te komen. Dit in contrast tot het SER-advies dat juist het omgekeerde propageert.

Zowel binnen de batterij-elektrische als binnen de biobrandstoffenroute bestaan dus voordelen, maar ook beperkingen en onzekerheden. Maar laten we eens naar waterstof kijken, hier bestaan namelijk ook voor- en nadelen. Ten opzichte van batterij-elektrisch bestaan wellicht ook in de toekomst voordelen in termen van energiedichtheid en oplaadsnelheid. Een groot nadeel is echter dat de kosten flink hoger zijn, en dat de WTW (Well-To-Wheel) energie-efficiënte laag is. Hierdoor heb je voor één klimaatneutrale

waterstofauto twee tot drie keer zoveel (schone) energie nodig dan voor één batterij-elektrische auto. Ontwikkelingen op het gebied van de uitrol van laad- en tankinfrastructuur, de degradatie van systemen en veiligheidsaspecten maken bovendien onzeker hoe waterstof zich zal gaan verhouden tot batterij-elektrisch.

Alle drie de duurzame alternatieven voor wegverkeer kennen risico's, en zolang het gebruik van voertuigen niet drastisch minder wordt, zullen afwegingen gemaakt moeten worden voor het gebruik ervan. Voor met name het zwaardere wegvervoer is de te belopen route en het eindbeeld niet in beton gegoten. Voornamelijk de discussie rondom het gebruik van biobrandstoffen en waterstof speelt echter ook binnen de scheep- en luchtvaart; laten we daarom eerst eens naar die sectoren kijken.

4.2 Scheepvaart en luchtvaart

Binnen zowel de (zee)scheepvaart als de luchtvaart bevindt de transitie naar een klimaatneutrale toekomst zich nog in de beginfase. Het ontbreekt momenteel aan beleid om het gebruik van hernieuwbare energie in deze toepassingen af te dwingen. In beide sectoren geldt dan ook dat alternatieven voor fossiele brandstoffen nog maar in geringe mate beschikbaar zijn en bovendien zijn fossiele brandstoffen (nog) veel goedkoper. Zo vaart een schip momenteel meestal op diesel en vliegt een vliegtuig vrijwel uitsluitend op kerosine. Het gebruik van biobrandstoffen is voor beide modaliteiten één van de makkelijkst implementeerbare routes om de CO₂-uitstoot te reduceren. Biobrandstoffen kunnen bijgemengd worden met fossiele brandstoffen, waardoor geen verandering van de aandrijflijn nodig is. Gezien de lange levensduur van vliegtuigen en schepen is dat een groot voordeel. Biobrandstoffen zijn echter schaars, en de SER beschouwt het gebruik van biobrandstoffen ook in de lucht- en scheepvaart als een overbruggingsoplossing tot duurzamere alternatieven beschikbaar zijn. Wel zal het waarschijnlijk langer duren voordat die alternatieven in ruime mate beschikbaar zijn dan bij het wegvervoer.

Interessant is bovendien dat in beide modaliteiten, naast biobrandstoffen, de opties voor klimaatvriendelijke energie bijna allemaal naar waterstof leiden. De mogelijkheid van het gebruik van batterij-elektrisch is in beide gevallen naar verwachting beperkt, zeker in de komende decennia. Voor de scheepvaart speelt nog veel discussie omtrent het gebruik van direct waterstof, ammoniak of methanol. Voor de productie van die laatste twee wordt op dit moment (naast het gebruik van fossiele brandstoffen) al waterstof gebruikt, en dat is bovendien het geval voor potentieel toekomstige duurzame routes. Wat betreft de luchtvaart, is momenteel naast biokerosine het enige toepasbare verduurzamings-alternatief (zij het nog steeds met een niet-CO₂ broeikaseffect) synthetische kerosine. Mogelijk kunnen batterij-elektrisch en waterstof ook direct gebruikt worden, maar dit zal waarschijnlijk in beperkte mate zijn (IATA, 2017). Voor de productie van synthetische kerosine is echter ook waterstof nodig.

Mogelijk zal binnen de scheep- en luchtvaart de komende decennia het gebruik van biobrandstoffen een (grote) rol krijgen, maar beschikbaarheid van biobrandstoffen is beperkt en bovendien adviseert de SER om het alleen als overbruggingsmiddel te gebruiken binnen mobiliteit. Vrijwel alle alternatieven betekenen het gebruik van waterstof. Een nadeel hiervan is echter (net als bij het wegvervoer) dat het gebruik van waterstof energetisch gezien niet erg efficiënt is en veel duurzame energie zal vragen.

4.3 Afweging gebruik waterstof

Zowel bij het wegvervoer als bij de scheep- en luchtvaart lijkt de inzet van waterstof voor 2030 voornamelijk samen te hangen met een te maken afweging voor het gebruik van biobrandstoffen. Bij wegvervoer heb je om aan de voorgenomen jaarverplichting te voldoen van minimaal 27,1% hernieuwbare energie in 2030 meer nodig dan elektrische aandrijving. Met de huidige ontwikkelingen gaat die verplichting waarschijnlijk voor het

merendeel worden ingevuld met biobrandstoffen, zo blijkt uit de nieuwe KEV, de Klimaat- en Energieverkenning 2021 (PBL 2021). Ook de binnenvaart moet hernieuwbare energie gaan inzetten. In het Klimaatakkoord is afgesproken dat dit in 2030 minimaal 5 PJ moet zijn. Ook voor zeescheepvaart en luchtvaart valt een schatting te maken van de hoeveel biobrandstoffen binnen beleidskaders in 2030 ingezet zou kunnen gaan worden, al is hier (nog) geen concreet beleid voor.

Om een beetje te spelen met de cijfers, maken we een globale inschatting van de vraag naar biobrandstoffen vanuit de mobiliteitssector in 2030 die zou kunnen resulteren uit de huidige doelen en ambities. Daarvoor baseren we ons op de energieramingen uit de KEV2021 en de huidige (Nederlandse) plannen en ambities voor inzet van hernieuwbare energie in mobiliteit. De beoogde nieuwe jaarverplichting voor hernieuwbare energie in 2030 leidt er naar verwachting toe dat er 38 PJ aan biobrandstoffen wordt ingezet in wegverkeer, zo blijkt uit de KEV2021. Dit is 10 procent van het totale geraamde energiegebruik in het wegverkeer. Buiten het wegverkeer wordt nog eens zo'n 10 PJ aan biobrandstof geraamd, die hoofdzakelijk bij de binnenvaart zit (naast toepassing in mobiele werktuigen en het railvervoer). Voor de luchtvaart wil Nederland toe naar een bijmengverplichting van 14 procent in 2030. Dit zou met de huidige verwachtingen een inzet van 28 PJ aan hernieuwbare energie betekenen, waarvan bij huidig beleid naar verwachting het overgrote deel uit biobrandstoffen bestaat. Voor de zeescheepvaart zijn er nog geen concrete Nederlandse plannen. Het Fit-for-55 pakket van de EU kan hier echter als basis dienen. Voor 2030 wordt daarin voorgesteld de CO₂-intensiteit van de scheepvaartbrandstoffen in 2030 met 6% te reduceren. Hiervoor zou volgens de EU naar schatting zo'n 8 a 9 procent hernieuwbare energie moeten worden ingezet. Met de huidige verwachtingen over de afzet van scheepvaartbrandstoffen in 2030 vanuit Nederland zou dit een extra vraag naar hernieuwbare energie van 37 PJ behelzen, waarvan naar verwachting weer het merendeel uit biobrandstoffen zou bestaan. De totale vraag naar biobrandstoffen voor mobiliteit zou daarmee kunnen oplopen tot ruim over de 100 PJ in 2030. Ofwel bijna een verviervoudiging ten opzichte van het niveau in 2020.

Modaliteit	(beoogde) verplichting voor aandeel hernieuwbare energie	Energievraag 2030 (PJ)	Mogelijke bijdrage biobrandstoffen (PJ)
Wegverkeer	27.1%	380	38
Overige binnenlandse mobiliteit	27.1%	100	10
Luchtvaart	14%	200	27
Zeescheepvaart	8 a 9%	435	37
Totaal		1115	112

Het beleid voor hernieuwbare energie in mobiliteit lijkt dus een sterke impuls te krijgen, en zonder verdere kaders wordt deze impuls mogelijk grotendeels ingevuld met de inzet van biobrandstoffen. Gezien het kader dat de SER heeft gemaakt voor die inzet is de vraag of dit wenselijk is. Sowieso zou voor zulke hoeveelheden een wezenlijke import van biograndstoffen nodig zijn (CE Delft, 2020). In een andere uithoek, waarin deze energievraag volledig door waterstof ingevuld wordt, komt overigens dan weer een flinke vraag naar elektriciteit kijken. Deze kan zo oplopen naar 150 PJ of meer, wat meer dan een kwart van de huidige raming voor hernieuwbare elektriciteit in 2030 in Nederland zou betekenen (PBL, 2020). Desondanks, lijkt het logisch om ook te kijken naar de rol van energiedragers buiten biobrandstoffen verhoogd kan worden, zeker in het licht van de langetermijn klimaatdoelen die ertoe leiden dat op lange termijn vrijwel alle energie voor mobiliteit hernieuwbaar moet worden. Naast batterij-elektrisch komt dan ook waterstof om de hoek kijken. We lopen daarom nog een keer de belangrijke toepassingen voor waterstof langs en bekijken waar we nu staan en wat er de komende jaren zou kunnen gebeuren om een stap voorwaarts te zetten met het gebruik van waterstof in die toepassingen.

Wegvervoer

Vanuit het perspectief van mobiliteit is het gebruik van waterstof in het zwaardere wegvervoer een kanshebber. De IEA (International Energy Agency) geeft aan dat waterstof in langeafstandsvervoer en zwaardere toepassingen over de weg een effectief alternatief kan zijn voor batterij-elektrisch (IEA, 2019). De Rli acht het gebruik van waterstof voor bepaalde vormen van zwaar vervoer (vrachtwagens) zelfs onmisbaar (Rli, 2021). Op de waterstofladders scoort het zwaardere wegvervoer echter niet zo hoog. Dit hangt mede samen met de snelle ontwikkeling van batterijtechnologie, die langeafstandsvervoer over de weg met batterij-elektrische vrachtauto's steeds dichterbij lijkt te brengen. Of dit voor alle toepassingen uiteindelijk een oplossing gaat zijn is nog hoogst onzeker. Zeker voor het lange-afstandsvervoer over de weg biedt waterstof kansen, de markt sorteert hier voor een deel ook al op voor. De eerste prototypen van verschillende marktpartijen zijn op dit moment in de maak (Holthausen, Hyundai); prestaties op de weg moeten voor een groot deel echter nog onderzocht worden middels pilots. Beleid inzetten op juist deze fase is dan ook kansrijk; een pilotfase kan zo maar jaren duren en de uitkomst is inherent onzeker. Financiële ondersteuning kan mogelijk een versnelling in het doorlopen van deze fase brengen. Vroegtijdige investeringen in oplossingen die het uiteindelijk niet redden is niet zinvol, maar tegelijkertijd kan te lang wachten met investeren de stap van technologieontwikkeling naar marktpenetratie afremmen. Ten slotte is een zeker netwerk van tankinfrastructuur nodig om de markt van de grond te krijgen; ook hier ligt een duidelijke rol voor het beleid. De eerste stappen in die richting zijn de afgelopen jaren gezet.

Scheepvaart en luchtvaart

Binnen de scheep- en luchtvaart lijkt een belangrijke rol weggelegd te zijn voor waterstof, zeker voor de langere termijn. Inzet op waterstof is daarom een no-regret optie. Voor de scheepvaart kan hierbij gedacht worden aan het financieel faciliteren van de innovatiefase; experimenten met prototypes die varen op waterstof en synthetische brandstoffen (ammoniak, methanol) zijn kansrijk. Binnen de luchtvaart is aandacht nodig voor de realisatie van productiefaciliteiten voor synthetische kerosine (de mogelijke verplichting vanuit Europa maakt dit des te meer relevant). Experimenten met prototypes zijn ook hier relevant, maar hebben qua beleidsinzet wellicht minder prioriteit omdat de brandstof zelf relatief veel lijkt op de conventionele brandstof.

Investeren in een transitie draait om omgaan met onzekerheid

De toekomst is onzeker, en dat geldt zeker ook voor transities. Bij de toepassing van waterstof in transport stapelen de onzekerheden zich op. Niet alleen is onzeker wanneer hoeveel waterstof voor transport beschikbaar is (gezien ook de behoefte vanuit bijvoorbeeld de industrie), ook is onzeker of en in welke mate de andere alternatieven (inzet van batterij-elektrisch en biobrandstoffen) aan zijn grenzen komen. Wachten met iets doen tot de onzekerheid weg is, is geen oplossing. Dan is het te laat om nog andere alternatieven in voldoende mate aan te kunnen boren. Dus wordt de vraag: wat zijn de verschillende goed voestelbare paden waar langs de toekomst zich kan ontwikkelen, wat is binnen die paden op verschillende momenten een logische rol van waterstof in respectievelijk wegvervoer, scheepvaart en luchtvaart en welke stappen zijn dan binnen die paden nodig om de ontwikkeling van waterstof als toepassing in transport tijdig te ontwikkelen? Vervolgens is de vraag, welke stappen zijn no-regret (in alle scenario's verstandig), welke stappen zijn 'beter save dan sorry', en welke stappen zijn zo onzeker dat het beter is de beslissing uit te stellen. Dit kan als basis dienen voor verdere besluitvorming omtrent de rol van waterstof en andere hernieuwbare energiedragers in de energietransitie rond mobiliteit.

Literatuur

CE Delft (2020), *Bio-Scope*,

<https://ce.nl/publicaties/bio-scope-toepassingen-en-beschikbaarheid-van-duurzame-biomassa/>

H2 rijders (2021), *Tankstations in Nederland*,

https://h2rijders.nl/tanken?language_content_entity=nl

IATA (2017), *Technology Roadmap for Environmental Improvement. Fact Sheet.*

<https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet---technology-roadmap-environment/>

IEA (2019), *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities*,

https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf

IenW (2021), *Stand van zaken uitvoering Klimaatakkoord mobiliteit*,

<https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2021/06/01/bijlage-1-stand-van-zaken-uitvoering-klimaatakkoord-mobiliteit-2021>

M. Epema (2018) *RIJDEN OP WATERSTOF*

Het realiseren van een waterstofinfrastructuur voor de mobiliteitssector in Nederland

https://frw.studenttheses.ub.rug.nl/3003/1/Finalmasterthesis_MarinEpema_2171937.pdf

Metabolic (2019), *Metal demand for electric vehicles*,

<https://www.metabolic.nl/publications/metal-demand-for-electric-vehicles-pdf/>

PBL (2020), *Klimaat- en Energieverkenning*,

<https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2020-klimaat-en-energieverkenning2020-3995.pdf>

Rijksoverheid (2020), *Kabinetsvisie Waterstof*,

<https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2020/03/30/kamerbrief-over-kabinetsvisie-waterstof>

SER (2020), *Biomassa in Balans*

<https://www.ser.nl/nl/Publicaties/advies-biomassa-in-balans>

TNO (2020), *Waterstof voor verbrandingsmotoren in zwaar materieel*,

<https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2020/03/30/kamerbrief-over-kabinetsvisie-waterstof>

Waszink (1996), *Gasproductie en gasdistributie*, in 'Pie rapportenreeks',

https://www.industrieel-erfgoed.nl/sites/default/files/bijlagen/bestanden/pie_rapport_26_gasproductie_en_gasdistributie.pdf