
Waterstof in het wegverkeer

Voor- en nadelen voor de gezondheid van een nieuwe vorm van brandstof

Signalement





Aan de minister van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening
en Milieubeheer

Onderwerp : Aanbieding signalement *Waterstof in het wegverkeer*
Uw kenmerk : -
Ons kenmerk : U-5648/SD/pg/569
Bijlagen : 1
Datum : 29 september 2008

Geachte minister,

Met veel genoegen bied ik u hierbij het signalement 'Waterstof in het wegverkeer' aan. Het is het eerste advies van de Commissie Signalering Gezondheid en Milieu, die als taak heeft om regering en parlement te attenderen op belangrijke *issues* op het gebied van gezondheid en milieu, en kansen en bedreigingen in kaart te brengen. Het kan daarbij om nieuwe ontwikkelingen gaan, maar ook om oude thema's die opnieuw aandacht verdienen.

In het geval van 'Waterstof in het wegverkeer' gaat het om een nieuwe technologie die grote gezondheidswinst kan opleveren, zoals verbetering van de luchtkwaliteit in stedelijke gebieden. Het is denkbaar dat waterstof op termijn gebruikt kan worden als brandstof voor het wegverkeer. De insteek is daarbij tot nu toe vooral geweest om een alternatief te bieden voor de voorziene schaarste van fossiele brandstoffen. In dit advies worden de voor- en nadelen voor de gezondheid onder de loep genomen.

De verkenning van de commissie leert dat lang niet alle effecten al goed te voorspellen zijn. Veel van de benodigde technologie moet namelijk nog (verder) ontwikkeld worden. Ook is er nog geen zicht op de benodigde infrastructuur. Inmiddels staat de overstap op waterstof in het wegverkeer op de agenda van het voorgenomen transitiebeleid voor een duurzame energiehuishouding. Met transitiebeleid kan tijdig worden bijgestuurd, mocht dat nodig blijken. Binnen dit transitiebeleid kunnen ook andere toepassingsmogelijkheden van de waterstoftechnologie in ogenschouw worden genomen, en kan een brede discussie in de samenleving plaatsvinden over de wijze waarop die overstap gerealiseerd zou kunnen worden.

Bezoekadres
Parnassusplein 5
2511 VX Den Haag
Telefoon (070) 340 64 87
E-mail: sies.dogger@gr.nl

Postadres
Postbus 16052
2500 BB Den Haag
Telefax (070) 340 75 23
www.gr.nl



Onderwerp : Aanbieding signalement *Waterstof in het wegverkeer*
Ons kenmerk : U-5648/SD/pg/569
Pagina : 2
Datum : 29 september 2008

Met dit eerste signalement van de Commissie Signalering Gezondheid en Milieu beschikt u over een indicatie van de betekenis die een overgang op waterstof in het wegverkeer kan hebben voor de gezondheid, en wat van belang is om die overgang vanuit gezondheidskundig oogpunt zorgvuldig te laten verlopen.

Een afschrift van het advies van de commissie heb ik ter kennisname gezonden aan uw collega's van Economische Zaken en van Verkeer en Waterstaat.

Met vriendelijke groet,

Prof. dr. J.A. Knottnerus

Bezoekadres
Parnassusplein 5
2511 VX Den Haag
Telefoon (070) 340 64 87
E-mail: sies.dogger@gr.nl

Postadres
Postbus 16052
2500 BB Den Haag
Telefax (070) 340 75 23
www.gr.nl

Waterstof in het wegverkeer

Voor- en nadelen voor de gezondheid van een nieuwe vorm van brandstof

Signalement

aan:

de minister van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer

Nr. 2008/16, Den Haag, 29 september 2008

De Gezondheidsraad, ingesteld in 1902, is een adviesorgaan met als taak de regering en het parlement ‘voor te lichten over de stand der wetenschap ten aanzien van vraagstukken op het gebied van de volksgezondheid’ (art. 22 Gezondheidswet).

De Gezondheidsraad ontvangt de meeste adviesvragen van de bewindslieden van Volksgezondheid, Welzijn & Sport; Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening & Milieubeheer; Sociale Zaken & Werkgelegenheid en Landbouw, Natuur & Voedselkwaliteit. De raad kan ook op eigen initiatief adviezen uitbrengen, en ontwikkelingen of trends signaleren die van belang zijn voor het overheidsbeleid.

De adviezen van de Gezondheidsraad zijn openbaar en worden als regel opgesteld door multidisciplinaire commissies van – op persoonlijke titel benoemde – Nederlandse en soms buitenlandse deskundigen.



De Gezondheidsraad is lid van het European Science Advisory Network for Health (EuSANH), een Europees netwerk van wetenschappelijke adviesorganen.



INAHTA

De Gezondheidsraad is lid van het International Network of Agencies for Health Technology Assessment (INAHTA), een internationaal samenwerkingsverband van organisaties die zich bezig houden met *health technology assessment*.

U kunt het signalement downloaden van www.gr.nl.

Deze publicatie kan als volgt worden aangehaald:
Gezondheidsraad. Waterstof in het wegverkeer. Voor- en nadelen voor de gezondheid van een nieuwe vorm van brandstof (signalement). Den Haag: Gezondheidsraad, 2008; publicatienr. 2008/16.

Health Council of the Netherlands. Hydrogen-powered road vehicles. Positive and negative health effects of new fuel. The Hague: Health Council of the Netherlands, 2008; publication no. 2008/16.

auteursrecht voorbehouden

all rights reserved

ISBN: 978-90-5549-726-3

Inhoud

Samenvatting *11*

Executive summary *15*

- 1 Inleiding *19*
 - 1.1 Naar transport op waterstof? *19*
 - 1.2 Vraagstelling *20*
 - 1.3 Taak van de Commissie Signalering Gezondheid en Milieu *21*
 - 1.4 Werkwijze *21*
 - 1.5 Leeswijzer *22*
-
- 2 Waterstof voor het wegverkeer *23*
 - 2.1 Mogelijkheden en barrières *23*
 - 2.2 Van productie tot gebruik in voertuigen *24*
 - 2.3 Kijken in de toekomst *29*
-
- 3 Gunstige effecten op de volksgezondheid *31*
 - 3.1 Minder luchtvervuiling *31*
 - 3.2 Minder broeikasgassen *32*
 - 3.3 Minder geluidhinder *32*
-

4	Risico's voor de volksgezondheid	35
4.1	Zorgvuldige introductie van nieuwe technologie	35
4.2	Acuut gevaar door brand en explosie	37
4.3	Vervuiling door brandstofcellen en brandstoftanks	38
4.4	Veranderingen in de atmosfeer	39
4.5	Vervuiling door ongereguleerde productie	40
4.6	Afnemende verkeersveiligheid door stillere voertuigen	40

5	Vinger aan de pols	41
5.1	Voor- en nadelen voor de volksgezondheid	41
5.2	Noodzaak van draagvlak in de bevolking	42
5.3	Noodzaak van transitie management	43

Literatuur 45

	Bijlagen	51
A	De commissie	53
B	Enkele gegevens over waterstof	55

Samenvatting

Wegverkeer op waterstof: een toekomstbeeld

De afhankelijkheid van fossiele brandstoffen – met zijn politieke, maatschappelijke en milieunadelen – zorgt ervoor dat alternatieve energiebronnen volop in de belangstelling staan. Het gebruik van waterstof wordt als een veelbelovende optie gezien, in het bijzonder voor het wegverkeer. Volgens een toekomstvisie van het Nederlandse ECN zou in 2050 ruim de helft van de auto's in Nederland op waterstof kunnen rijden.

Vooropgesteld dat de waterstof wordt geproduceerd uit duurzame energiebronnen, zou daarmee ook de emissie van kooldioxide aan banden worden gelegd. Zowel in de Verenigde Staten, Japan en Europa worden door overheden en het bedrijfsleven dan ook grote bedragen geïnvesteerd in de ontwikkeling van de benodigde technologie, die over enkele decennia een op waterstof gebaseerde economie mogelijk moet maken.

Overschakeling naar waterstof als energievoorziening voor het wegverkeer zou ingrijpende gevolgen hebben voor de samenleving. Zoals bij elke nieuwe technologie het geval is, biedt dat kansen, maar zijn er onvermijdelijk ook nadelen. In het geval van waterstof zijn sommige van die nadelen bekend, en tot op zekere hoogte beheersbaar. Andere zullen echter pas na introductie en toepassing aan het licht komen.

Dit inzicht, gevoegd bij het maatschappelijke belang van een eventuele omschakeling op waterstof, was voor de Gezondheidsraad aanleiding om nu

alvast in te gaan op de voor- en nadelen die waterstof als nieuwe energievorm kan hebben voor de volksgezondheid. Juist in deze fase is het van belang om een beeld te krijgen van de mogelijke gezondheidseffecten, te weten waar de lacunes in de kennis zitten, en aan te geven wat de beste manier is om daar mee om te gaan. Het advies is opgesteld door de semipermanente Commissie Signalering Gezondheid en Milieu, die speciaal belast is met het signaleren van belangrijke verbanden tussen milieu-invloeden en de volksgezondheid.

Van productie tot gebruik in voertuigen

Net als elektriciteit is waterstof een energiedrager; voor de productie van waterstof is een energiebron nodig. Net als voor elektriciteit kunnen daarvoor verschillende soorten energiebronnen worden gebruikt. De productie kan centraal of lokaal (in kleine eenheden) plaatsvinden. De geproduceerde waterstof kan via pijpleidingen of opslagtanks naar de eindgebruiker worden getransporteerd. In de voertuigen kan waterstof in tanks worden opgeslagen. De voertuigen kunnen vervolgens worden aangedreven ofwel met een verbrandingsmotor ofwel met brandstofcellen die elektriciteit opwekken voor het aandrijven van een elektromotor.

Voordelen voor de gezondheid

Toepassing van waterstof voor het gemotoriseerde wegvervoer zal in de eerste plaats leiden tot een vermindering van de luchtverontreiniging, en daarmee tot een verbetering van de gezondheid, met name in stedelijke gebieden. De emissie van gezondheidsschadelijke stoffen, zoals stikstofdioxide en fijn stof, neemt namelijk af, omdat waterstof bij gebruik in water wordt omgezet. Overigens is daarmee niet alle deeltjesvormige luchtverontreiniging door het verkeer van de baan – banden- en asfaltlijpsel blijft een rol spelen.

Een tweede effect is dat voertuigen bij het gebruik van brandstofcellen die gevoed worden met waterstof in combinatie met elektromotoren stiller zullen worden, wat kan leiden tot het afnemen van de geluidhinder en slaapverstoring door het wegverkeer en de invloed die dat op de gezondheid heeft.

Een ander effect is indirect en heeft te maken met de vermindering van broeikasemissies en daarmee met het tegengaan van de klimaatverandering en het indammen van de ongunstige gezondheidseffecten die daarvan het gevolg zijn. Van dergelijke indirecte gezondheidseffecten kan echter alleen sprake zijn als waterstof op een duurzame manier wordt geproduceerd en er geen ongunstige

klimaat effecten zullen optreden. Waterstof is op zich namelijk niet meer dan een drager van energie (net als elektriciteit), en de manier waarop die energie wordt gewonnen is cruciaal voor de mate van duurzaamheid.

Twee manieren lijken vooralsnog zowel haalbaar als relatief schoon. De eerste manier is met aardgas. Dat levert beperkte emissies op. De tweede is door kolen te vergassen, en dat te combineren met de ondergrondse opslag van de kooldioxide die daarbij – behalve waterstof – ook vrijkomt. Een probleem is wel dat de opslagtechnologie nog in de kinderschoenen staat. Toch lijken deze mogelijkheden op de korte termijn het meest voor de hand te liggen, totdat duurzame productie plaats kan vinden, bijvoorbeeld door zonne-, water- en windenergie. De vergassing van biomassa en kernenergie zijn aanvullende opties.

Nadelen voor de gezondheid

Welke nadelige effecten voor de gezondheid kan rijden op waterstof hebben? Ten eerste zijn er de risico's die samenhangen met brand en explosie. Juist omdat waterstof zich anders gedraagt dan de brandstoffen die wij nu kennen vraagt dat om aandacht. Vooral lekkages van waterstof in afgesloten ruimtes zijn risicovol.

Ten tweede zijn er de gezondheidseffecten die gepaard kunnen gaan met het vrijkomen van schadelijke stoffen uit de brandstofcellen in voertuigen. Die brandstofcellen wekken elektriciteit op voor de aandrijving van elektromotoren van de voertuigen. Zij kunnen deeltjes bevatten die schadelijk zijn, en die terecht komen in het milieu. Het gaat dan niet alleen om productie en gebruik, maar ook om het afvalstadium. Op voorhand is echter niet te zeggen wat voor de gezondheid de meest relevante componenten zijn. Speciale aandacht voor nano-deeltjes is aan te bevelen, zowel in opslagtanks voor waterstof als in brandstofcellen.

Een geheel ander mogelijk nadeel hangt samen met de invloed op de samenstelling van de atmosfeer en de hogere luchtlagen. Weglekkend waterstof, de mate waarin het gebruik van waterstof toch broeikasgassen emitteert en de mate van vermindering van de uitstoot van stoffen als stikstofoxiden en koolmonoxide leiden tot moeilijk te voorspellen veranderingen in troposfeer en stratosfeer. Die veranderingen bepalen de invloed op de klimaatverandering en op de ozonlaag. Volgens sommige modelberekeningen kan het netto-resultaat zowel positief als negatief uitvallen. Overigens lopen in wetenschappelijke kring de meningen over deze invloed van waterstof uiteen.

De bekende risico's laten zich tot op zekere hoogte beheersen, mede met behulp van de ervaringen met het industrieel gebruik van waterstof en met de ontwikkelingen op het terrein van afvalbeheer en recycling. Maar er zullen zich

bij de invoering van de waterstoftechnologie ook niet te voorziene risico's manifesteren. Zaak is daarom die invoering stapsgewijs te doen en alert te zijn op vroege signalen van die keerzijde ('vinger aan de pols').

Noodzaak van sturing

Het ingrijpende karakter van de introductie van de waterstoftechnologie vereist monitoring en sturing. Op dit moment is er vooral aandacht voor de eventuele milieuvoordelen, en spelen zorgen over risico's een minder belangrijke rol. In zo'n transitie moet echter het hele spectrum bekeken worden, voor zover alle factoren zich tenminste van tevoren laten overzien.

Daarbij is voor de overheid een regierol is weggelegd. De duurzaamheid van de gebruikte energiebronnen en de wijze waarop een infrastructuur wordt verwezenlijkt zullen belangrijke thema's zijn. Naast invloed op de economie en het lokale en wereldwijde milieu vormen ook de invloeden op de volksgezondheid – mede veroorzaakt via de gevolgen voor economie en milieu – een integraal onderdeel van deze aanpak. Draagvlak onder de bevolking is cruciaal voor een succesvolle transitie.

Met zorgvuldig transitie management kunnen gezondheidskwesties een natuurlijke plaats krijgen bij het ontwikkelen en eventueel invoeren van de waterstoftechnologie. Ook de nadelige na-ijleffecten op de gezondheid komen dan tijdig in beeld, wat tot bijsturing kan leiden. Daarnaast wordt zo steeds bekeken of de verwachte voordelen voor de gezondheid inderdaad worden behaald.

De nieuwe technologie zou dan ook stapsgewijs geïntroduceerd moeten worden, als onderdeel van een democratisch proces. Waar dat proces uitkomt, laat zich niet van tevoren voorspellen. Wat we wel weten is dat deze aanpak de voorwaarden biedt om voorzorg te betrachten als het gaat om onvoorziene dreigingen, en onvoorziene kansen van de waterstoftechnologie – duurzamere vormen van mobiliteit – optimaal te benutten.

Executive summary

Health Council of the Netherlands. Hydrogen-powered road vehicles. Positive and negative health effects of new fuel. The Hague: Health Council of the Netherlands, 2008; publication no. 2008/16.

Hydrogen-powered road vehicles: a vision of the future

Because of the political, social and environmental problems associated with dependency on fossil fuels, there is considerable interest in alternative energy sources. Hydrogen is regarded as a promising option, particularly as a fuel for road vehicles. The Dutch Energy Research Centre (ECN) recently published a vision of the future, in which it suggested that by 2050 more than half of all cars in the Netherlands could be running on hydrogen.

Assuming that the hydrogen is produced from renewable energy sources, migration to hydrogen-powered vehicles would also curb carbon dioxide emissions. In the United States, Japan and Europe, considerable public and private investment is therefore being made with a view to developing the technologies needed to make the creation of a hydrogen-based economy possible within a few decades.

A switch to using hydrogen as the primary energy source for road vehicles would have far-reaching social consequences. As with all technological developments, opportunities would be created, but drawbacks would inevitably be encountered as well. Some of the disadvantages associated with hydrogen are already known, and are to some degree manageable. It is likely, however, that other drawbacks would come to light only once hydrogen-powered cars were actually in use.

With that thought in mind, and in view of the social significance of a possible transition to hydrogen, it was decided that the Health Council should assess the positive and negative effects that hydrogen use could have on public health. It is particularly important to make such an assessment at the present early stage in the development of hydrogen technologies, so that gaps in existing scientific knowledge may be identified and appropriate strategies may be developed for addressing such gaps. This report has been produced by the Health and Environment Surveillance Committee, which has special responsibility for the identification of important correlations between environmental factors and public health.

From production to practical use

Like electricity, hydrogen is an energy carrier; its production therefore requires an energy source. As with electricity again, various sources can be used and production may take place at large centralised plants or small distributed units. The finished product may then be brought to the end user in tanks or by pipeline. A road vehicle would carry a supply of hydrogen in a tank, supplying either a combustion engine or a fuel cell to generate electricity for an electric motor.

Health benefits

First, the use of hydrogen as fuel for motorised road vehicles would lead to less air pollution, and thus to improved public health, particularly in urban areas. The only by-product of hydrogen combustion is water, so emissions of the harmful substances associated with conventional combustion engines, such as carbon dioxide and particulates, would be reduced. Traffic-related air pollution would not be eradicated altogether, however: a significant amount of the particulate material released into the atmosphere consists of tiny fragments of tyre rubber and asphalt, for example.

A further health benefit would derive from the fact that vehicles powered by a combination of hydrogen fuel cell and electric motor would be quieter. A general transition to such vehicles would therefore mean less noise pollution and fewer noise-related sleeping problems. Reduced greenhouse gas emissions would also have an indirect health benefit, since climate change would be attenuated and the related adverse health effects mitigated. However, any such benefit would be dependent on the hydrogen being produced by a 'climate friendly' process: hydrogen is itself merely an energy carrier (like electricity), so the sustainability of its use is determined by the manner of its production.

At the present time, there are two production methods that appear to be both feasible and relatively clean. The first involves the use of natural gas, which would result in modest emissions. The second entails the gasification of coal, coupled with underground storage of the unwanted carbon dioxide produced along with the hydrogen. Unfortunately, carbon dioxide storage techniques are as yet in their infancy. Nevertheless, these two methods are the most viable options pending the longer-term development of more sustainable forms of production based on the use of solar, water or wind energy. Other possibilities include biomass gasification and nuclear energy.

Adverse health effects

How might the use of hydrogen as a vehicle fuel adversely affect public health? First, hydrogen use entails fire and explosion risks. Particular attention should be given to these risks, because hydrogen does not behave in the same way as the fuels we are currently used to; any leakage of hydrogen within an enclosed space is especially dangerous. Second, the release of harmful substances from vehicle fuel cells could have an adverse effect on health. The vehicles of the future may have hydrogen fuel cells to generate power for electric motors. Such fuel cells could be associated with the release of harmful particles into the environment, not only during production and use, but also when the cells are scrapped. Unfortunately, it is not yet possible to say which materials are liable to be the most significant in relation to public health. The Committee nevertheless believes that particular attention should be given to the possible implications of the presence of nanoparticles in hydrogen storage tanks and fuel cells.

Hydrogen use might also adversely affect public health by another – very different – mechanism, namely its effect on the composition of the atmosphere and upper air strata. A switch to hydrogen-fuelled vehicles would lead to hydrogen leaks, to the emission of an uncertain amount of greenhouse gas and to an uncertain reduction in the emission of substances such as nitrogen oxides and carbon monoxide. These developments are liable to have implications for the troposphere and stratosphere, and thus for our climate and the ozone layer, but their precise influence is hard to predict. Modelling suggests that the net impact could be positive or negative, and scientific opinion on the influence of hydrogen remains divided.

The known risks should be manageable to some degree, partly by drawing on experience with the industrial use of hydrogen and experience in the field of waste management and recycling. However, the introduction of hydrogen technology is also likely to be accompanied by currently unforeseen risks. It is there-

fore advisable that any such introduction should be incremental and carefully monitored with a view to picking up the signs of any problems as early as possible.

The need for control

The far-reaching consequences of adopting hydrogen technology necessitate monitoring and control. At present, the focus is mainly on the possible environmental benefits, and relatively little attention is being given to the potential hazards. However, if a transition is to take place, the entire spectrum of effects should be considered, insofar as they may be predicted.

In this context, the government has an important coordinating role to play. The sustainability of the production methods and the way in which an infrastructure is realised will be key issues. Systematic consideration needs to be given not only to the implications for the economy and the local and global environment, but also to the public health effects (which will be influenced by the economic and environmental effects). Public support is vital if a successful transition is to be achieved.

With careful transition management, the consideration of health implications can become an integral part of the processes of developing and introducing hydrogen technology. In this way, any adverse health effects can be identified in good time and appropriate corrections made. Furthermore, such a strategy will enable verification of the anticipated health benefits.

The Committee therefore favours an incremental approach to the adoption of hydrogen technology, in the context of a democratic process. While the outcome of that process cannot be predicted, the Committee is confident that the advocated approach would enable the sensible management of unforeseen hazards, and the optimal exploitation of unforeseen opportunities, involving, for example, more sustainable forms of mobility.

Inleiding

1.1 Naar transport op waterstof?

Alternatieven voor fossiele brandstoffen staan volop in de belangstelling. De reden daarvan is niet alleen de eindigheid van de voorraden aan kolen, gas en olie. Het terugdringen van de emissie van broeikasgassen is ook een belangrijk argument.¹ Een van de alternatieven is het gebruik van waterstof.

Waterstof is een gas dat niet vrij voorkomt in de natuur, maar dat wel gewonnen kan worden door het af te splitsen van bepaalde grondstoffen, zoals water of koolwaterstof. Met het gebruik van waterstof zou de emissie van kooldioxide (CO₂) aan banden kunnen worden gelegd, al is de mate waarin afhankelijk van de productiewijze. Maar dat is niet het enige voordeel. Een ander belangrijk effect van de omschakeling naar waterstof zou zijn dat de verkeersgerelateerde luchtverontreiniging af zou nemen. De Amerikaanse Academie voor Wetenschappen omschreef de verwachtingen aldus:²

The vision of the hydrogen economy is based on two expectations: (1) that hydrogen can be produced from domestic energy sources in a manner that is affordable and environmentally benign, and (2) that applications using hydrogen — fuel cell vehicles, for example — can gain market share in competition with the alternatives. To the extent that these expectations can be met, the United States, and

indeed the world, would benefit from reduced vulnerability to energy disruptions and improved environmental quality, especially through lower carbon emissions.*

Er bestaan dus allerlei verwachtingen over de effecten van het gebruik van waterstof. In hoeverre die ook waargemaakt zullen worden weten we echter nog niet. Hoewel het principe van het gebruik van waterstof bij de energievoorziening al oud is, is het nog nooit op grote schaal toegepast voor vervoersdoeleinden. De technologie die daarvoor nodig is, is in ontwikkeling, maar het zal nog wel enkele decennia duren voordat dat duidelijk wordt of die tot volle wasdom komt, en toepassing voor vervoersdoeleinden mogelijk zal zijn.¹⁻³

Als er een omschakeling komt naar waterstof als energieleverancier voor het wegverkeer, dan zal dat voor de samenleving zeer ingrijpend zijn. Zo moeten er onder meer productie-eenheden worden bijgebouwd en een distributiestructuur worden opgezet of bestaande distributienetwerken aangepast.^{1,2} Dat zal leiden tot grote economische verschuivingen in de energiesector. Daarnaast moet overgeschakeld worden op voertuigen die op waterstof rijden. Introductie van waterstof als brandstof voor het wegverkeer vereist ook nieuwe veiligheidsvoorschriften en -procedures.

Ondanks de vraagtekens bij de levensvatbaarheid van deze nieuwe technologie wordt er in Europa en daarbuiten behoorlijk geïnvesteerd, met als oogmerk om in het midden van deze eeuw waterstof als energiebron voor vervoer en mogelijk andere toepassingen beschikbaar te hebben.⁴ Volgens de Energievisie van het ECN** zou in 2050 ruim de helft van de auto's in Nederland op waterstof kunnen rijden.⁵

1.2 Vraagstelling

Bij nieuwe technologische ontwikkelingen overheerst aanvankelijk veelal optimisme over de voordelen van de technologie.^{6,7} Vaak is het pas na introductie en toepassing dat de voordelen op hun waarde geschat kunnen worden. Ook komen dan mogelijke keerzijden aan het licht: de voordelen kunnen bijvoorbeeld minder blijken dan was verondersteld, en ook kunnen zich onvoorziene risico's manifes-

* Vertaling: Het vooruitzicht van een waterstofeconomie is gebaseerd op twee verwachtingen: (1) dat waterstof kan worden geproduceerd met behulp van nationale energiebronnen op een betaalbare en milieuvriendelijke manier, en (2) dat toepassingen gebaseerd op waterstof – zoals brandstofcellen – op concurrerende alternatieven marktaandeel kunnen veroveren. Als die verwachtingen bewaarheid worden, zullen de Verenigde Staten, maar ook de wereld als geheel, profiteren van een energievoorziening die minder kwetsbaar is, en van een betere milieukwaliteit, in het bijzonder door lagere koolstofemissies.

** Energieonderzoek Centrum Nederland te Petten.

teren. Om die reden bestaat in de huidige samenleving steeds sterker de behoefte om zo vroeg mogelijk een beeld te krijgen van de gevolgen van een nieuwe technologie, mede gezien het tempo van ontwikkeling en de doorwerking van technologieën.^{8,9}

Tegen deze achtergrond heeft de Commissie Signalering Gezondheid en Milieu, een commissie van de Gezondheidsraad, zich op verzoek van de voorzitter van de Raad gebogen over de gevolgen voor de volksgezondheid van het gebruik van waterstof als brandstof voor het wegverkeer. Andere mogelijkheden om waterstof als energieleverancier toe te passen, bijvoorbeeld in huishoudens¹⁰ of bij het vliegverkeer^{11,10}, en hun implicaties voor de volksgezondheid, komen niet aan bod. De commissie beantwoordt in dit signalement de volgende vragen:

- a Welke voordelen voor de volksgezondheid zouden gepaard gaan met transport op waterstof?
- b Welke risico's voor de volksgezondheid zou transport op waterstof op kunnen leveren?

1.3 Taak van de Commissie Signalering Gezondheid en Milieu

De Commissie Signalering Gezondheid en Milieu heeft als taak om belangrijke onderwerpen op het terrein van gezondheid en milieu onder de aandacht te brengen van regering en parlement, en kansen en bedreigingen voor de volksgezondheid in kaart te brengen. Het kan om nieuwe *issues* gaan, maar even goed om oude thema's die opnieuw aandacht verdienen. De commissie doet verslag van haar bevindingen in signalementen, waarin zij de stand van wetenschap bespreekt en adviseert over de noodzaak om een onderwerp op de beleidsagenda te plaatsen. De commissie is ingesteld voor een periode van twee jaar. Haar mandaat eindigt op 22 oktober 2009.

1.4 Werkwijze

Het secretariaat van de Gezondheidsraad heeft in samenspraak met enkele commissieleden teksten voor dit advies voorbereid die in commissievergaderingen zijn besproken. Het advies is vervolgens ter toetsing voorgelegd aan de Beraadsgroep Gezondheid en Omgeving van de Gezondheidsraad. Ook is prof. dr. C.H.J. Midden, hoogleraar Cultuur en Techniek aan de TU Eindhoven, om commentaar gevraagd.

1.5 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt informatie gegeven over de technologie die nodig is om waterstof te kunnen benutten als alternatieve energiebron. Daar wordt duidelijk welke technische hindernissen er bij de ontwikkeling van de technologie nog moeten worden overwonnen. Hoofdstuk 3 is gewijd aan de voordelen die transport op waterstof kan hebben voor de volksgezondheid. In hoofdstuk 4 gaat het over de keerzijde: de risico's. Tot besluit staan in hoofdstuk 5 de belangrijkste conclusies bij elkaar en worden aanbevelingen geformuleerd voor het verder volgen van de ontwikkelingen.

Waterstof voor het wegverkeer

2.1 Mogelijkheden en barrières

Waterstoftechnologie wordt gezien als een manier om in de loop van deze eeuw het energiegebruik schoner en duurzamer te organiseren.^{1,2,10} Het voorzien in de energiebehoefte van onze voertuigen, industrie en huishoudens met behulp van waterstof lijkt letterlijk een schone zaak, omdat na de energielevering door binding aan zuurstof alleen water vrijkomt. Onze huidige olie-economie zou daarmee overgaan in een waterstofeconomie, waarin waterstof dé energiedrager zou worden.

Het beeld van een waterstofeconomie bestaat al langer. In de jaren '70 van de vorige eeuw werd voorspeld dat de overgang daarnaar nu al zijn beslag gekregen zou hebben. Dat is niet bewaarheid geworden. Ondanks de technische en economische obstakels is de overgang naar waterstof als energieleverancier echter nog steeds een serieuze optie.^{1,5,12} Sommigen verwachten dat waterstof een uiterst belangrijke bijdrage zal leveren aan de duurzame energievoorziening.^{1,13}

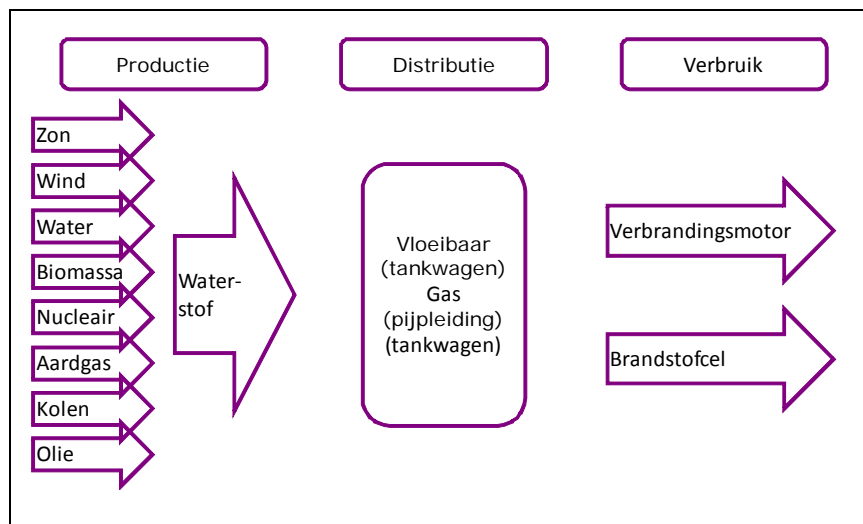
De belangstelling voor de waterstoftechnologie wordt vooral gedreven door de behoefte om niet afhankelijk te zijn van olieproducten en om de productie van broeikasgassen omlaag te brengen.^{1,2,14} Maar veel van de technologie die nodig is om een infrastructuur voor waterstof op te zetten, ontbreekt nog of is alleen in prototype beschikbaar. Ook is nog niet duidelijk wat de aangewezen manier is om de infrastructuur te organiseren die nodig is voor toepassing op grote schaal: moeten de productie, opslag en distributie bijvoorbeeld centraal geregeld worden

met grote systemen, of kunnen die beter verspreid geregeld worden, met kleine units? Daarnaast is wel duidelijk dat een invoering van een waterstofeconomie ook maatschappelijk en economisch complex en zeer ingrijpend zal zijn.^{1,2,14-16}

Aan de toepassing in het wegverkeer wordt op sommige plekken al concreet gewerkt. Verscheidene autofabrikanten hebben al prototypes beschikbaar van voertuigen die op waterstof rijden.¹⁷⁻¹⁹ Ook zijn er op verschillende plaatsen in de wereld proefprojecten uitgevoerd. Zo heeft het Amsterdamse openbaar-vervoerbedrijf geparticipeerd in een Europees project waarin ervaringen werden opgedaan met het gebruik van 'waterstofbussen'.²⁰ De resultaten worden thans geëvalueerd maar het vervoer op zich lijkt weinig problemen ondervonden te hebben.

2.2 Van productie tot gebruik in voertuigen

In deze paragraaf bespreekt de commissie de technologische kant van de productie, distributie en het gebruik van waterstof in voertuigen. De keten van 'well to wheel', met de drie belangrijkste schakels daarin, is weergegeven in figuur 1.



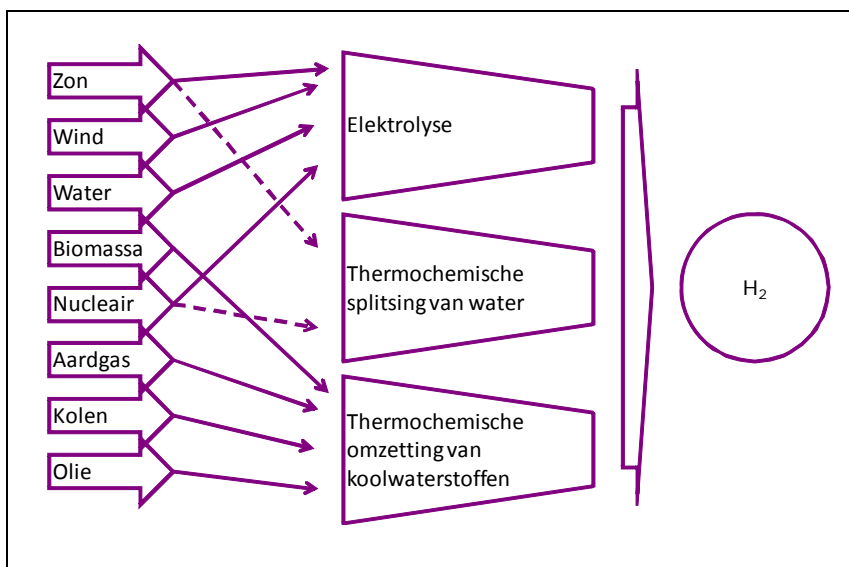
Figuur 1 De waterstofgebruiksketen: van 'well to wheel'. Ontleend aan ²¹.

2.2.1 Producteren van waterstof

Waterstof is onder normale condities een gas. Anders dan bijvoorbeeld aardgas komt het niet in grote hoeveelheden vrij voor in de natuur. Het moet daarom onttrokken worden aan andere verbindingen, zoals water of koolwaterstoffen. In die zin onderscheidt waterstof zich van de fossiele brandstoffen: het kan niet direct gewonnen worden. De afsplitsing die nodig is om waterstof te verkrijgen kost energie.

Doordat waterstof eerst moet worden geproduceerd, is het te beschouwen als een 'energiedrager'. Het lijkt daarin op elektriciteit. De 'drager' is nodig om de energie van de plaats van productie te transporteren naar de plaats van gebruik. Hoe waterstof geproduceerd kan worden, staat weergegeven in figuur 2.

Waterstof kan dus op verschillende manieren worden geproduceerd. Door elektrolyse kan waterstof worden afgesplitst van water. Met thermische processen (met afhankelijk van de toepassing toevoeging van stoom of zuurstof) kan waterstof geproduceerd worden uit water of uit aardgas en kolen (en eventueel uit biomassa of olie). Naast deze koolstofhoudende brandstoffen kunnen wind-, zonne-, kernenergie en waterkracht worden ingezet om waterstof te produceren. Diverse alternatieve energiebronnen die voor de productie van waterstof kunnen



Figuur 2 Opties voor waterstofproductie. Ontleend aan ²¹.

worden ingezet, zijn nog in ontwikkeling, zoals het opwekken van stroom uit het chemische-potentiaalverschil tussen zoet en zout water.²² Ook wordt er onderzoek verricht naar de mogelijkheid van biologische waterstofproductie met behulp van bacteriën en algen.²³

Met de huidige technologie is bij het gebruik van aardgas een energetisch rendement van ongeveer 85% realiseerbaar.^{1,24} Dat betekent dat vijftien procent van de energie-inhoud van het natuurlijke gas verloren gaat bij de productie van waterstof. Bij andere productiewijzen is het rendement lager.

De verschillende manieren van produceren onderscheiden zich ook in de mate van duurzaamheid als het gaat om invloed op het wereldwijde klimaat. Het gebruik van grondstoffen als kolen of aardgas voor de productie van waterstof vereist een aanpak om het vrijkomende koolzuurgas op te slaan, omdat anders het voordeel van een verminderde broeikasgasemissie verloren gaat.²⁵ De meest duurzame technieken om waterstof af te splitsen, waarbij slechts beperkt broeikasgassen vrijkomen, zijn gebruik van biomassa, water, zon of wind. Ook bij het toepassen van kernenergie komen broeikasgassen slechts in beperkte mate vrij.²⁶

Gegeven de beschikbaarheid van kolen en de technische mogelijkheden lijkt kolenvergassing in combinatie met grootschalige ondergrondse opslag van kool-dioxide voor de nabije toekomst een voor de hand liggende productiewijze. Andere opties voor de kortere termijn zijn het onttrekken van waterstof aan aardgas en het vergassen van biomassa.^{3,74} In hoeverre de toepassing van waterstof inderdaad leidt tot een schone en duurzame energievoorziening hangt in hoge mate af van het proces waarmee het wordt geproduceerd.

2.2.2 *Distribueren en opslaan*

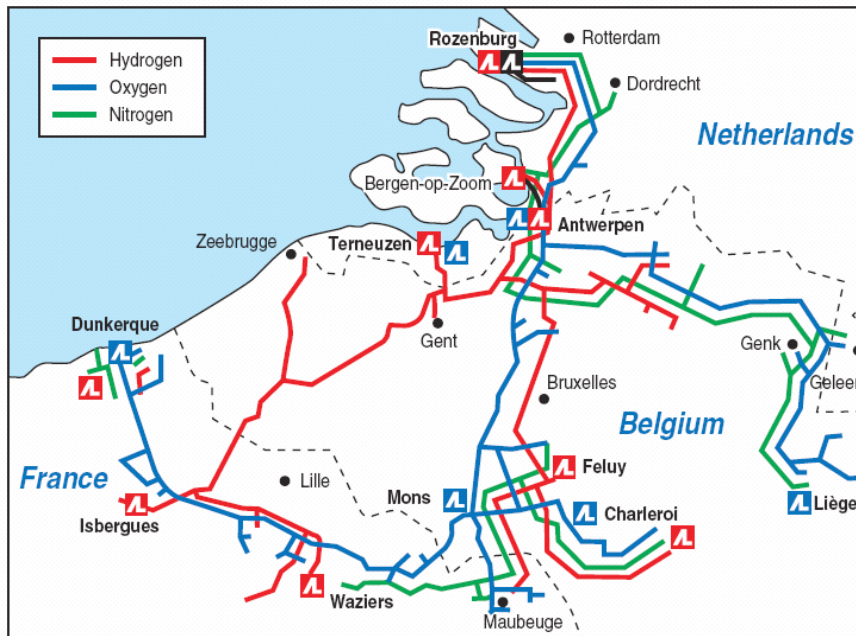
Is er eenmaal waterstof geproduceerd, dan moet het vervolgens getransporteerd worden naar de eindgebruikers. Waterstof heeft echter een aantal eigenschappen waardoor opslag en vervoer lastig zijn. Zo is waterstof het lichtste gas dat bestaat. Verder is de energie-inhoud van een bepaald volume waterstofgas (bij kamertemperatuur en normale buitendruk) ongeveer 3000 maal minder dan van eenzelfde volume benzine in vloeistofvorm.²⁷ Opslag en transport van waterstof vereisen daarom een sterke compressie. Maar dat kost energie, en gaat dus ten koste van het rendement. Een alternatief is om het gas vloeibaar te maken. Waterstof wordt vloeibaar bij 20 K (-253 °C, zie Bijlage B). Om dat mogelijk te maken is echter ongeveer 30% nodig van de energie die de waterstof zelf bevat. Daarbij moet de opslagtank zeer goed worden geïsoleerd om verder energieverlies te voorkomen. Deze optie kost dus veel energie. Ook transport per pijpleiding vereist compressie. Voor langere pijpleidingen is bovendien extra energie

nodig, om de compressiestations te laten draaien die langs de route nodig zijn om de druk te handhaven.²⁸

Is eenmaal aan de noodzakelijke voorwaarden voldaan, dan kan transport plaatsvinden per vrachtwagen (gas of vloeistof), treinwagon (gas of vloeistof) of per pijpleiding (gas). Overigens kent Europa op dit moment al een uitgebreid net van pijpleidingen voor het transport van waterstofgas (een voorbeeld staat in figuur 3).

Kiezen tussen lange of korte aanvoerlijnen

Gegeven de eigenschappen van waterstof is een belangrijke vraag bij het opzetten van een distributie-infrastructuur voor waterstof of het uit het oogpunt van efficiëntie en veiligheid de voorkeur verdient om grote productiecentrales en lange aanvoerlijnen te hebben, of dat het beter is om te kiezen voor kleine productie-eenheden die op veel punten staan, zodat de aanvoerlijnen kort kunnen blijven.³² Het laatste is wel relatief duurder.²⁸ De uiteindelijke keuze zal mede afhangen van anderen (bijvoorbeeld stationaire) toepassingen. Dat kan in Nederland tot gevolg hebben dat gebruik gemaakt wordt van het aardgasnet.



Figuur 3 Het leidingennetwerk van Air Liquide in Noordwest-Europa.²⁹

2.2.3 Gebruik in voertuigen

Opslaan van waterstof in het voertuig

De energie die waterstof bevat, kan op twee manieren worden benut, namelijk door directe verbranding of via brandstofcellen waarmee elektriciteit wordt opgewekt. Bij beide methodes is opslag van waterstof in het voertuig noodzakelijk. Dat levert in vergelijking tot conventionele brandstoffen nog wel wat technische problemen op.

De prototypes van waterstofvoertuigen gebruiken vooral gecomprimeerde waterstof. Waterstof wordt dan opgeslagen in tanks met een werkdruk van 700 bar; die hoge druk is nodig om een reële actieradius te bereiken.^{31,32} Naast de energie die het kost om waterstof zo sterk te comprimeren, vereist een dergelijke druk tanks die sterker en zwaarder zijn dan bijvoorbeeld die voor LPG. Waterstof kan niet in stalen tanks worden opgeslagen, aangezien het de sterkte en integriteit van staal aantast. Opslagtanks van koolstofvezels zijn mogelijk een alternatief, en naar andere opslagmethoden wordt naarstig gezocht.

Andere methoden om waterstof voor gebruik in voertuigen op te slaan zijn onder andere opslag (adsorptie) in metaalstructuren (metaalhydrides) en opslag in koolstof-*nanotubes*.³³ Op dit moment zijn die vormen van opslag nog erg inefficiënt. De huidige metaalhydridetanks zijn namelijk drie keer zo groot en vier keer zo zwaar als een benzinetank met dezelfde inhoud. Ook is de hoeveelheid waterstof die in *nanotubes* kan worden opgeslagen thans nog zeer beperkt. Bovendien zijn bij deze opslagtechnieken hoge drukken vereist. Daarnaast vormt het tempo waarmee waterstof gemobiliseerd kan worden uit de tank of de complexe recycling van sommige van deze materialen een probleem.

Omzetten van waterstof in beweging

De meest voor de hand liggende techniek om de energie uit waterstof om te zetten in bewegingsenergie wordt gevormd door brandstofcellen die elektriciteit opwekken voor het aandrijven van een elektromotor. Overigens zijn brandstofcellen niet specifiek voor waterstoftechnologie; er zijn ook vormen die elektriciteit opwekken uit koolwaterstoffen, zoals alcohol.

Er zijn vele typen brandstofcellen ontwikkeld, ook voor toepassing buiten het vervoer. Een groot voordeel van brandstofcellen is de hoge betrouwbaarheid. Die is te danken aan het ontbreken van bewegende delen. Om die reden zijn zij in gebruik op afgelegen plaatsen, zoals in weerstations en ruimtevaartuigen. Voor

grootschalig gebruik in voertuigen vormen de kosten van de dure anode- en kathodematerialen echter een belemmering.

In voertuigen moet verder de zuurstof die nodig is voor de werking van de brandstofcel, worden aangevoerd in de vorm van gecomprimeerde en gedroogde lucht. Dit verlaagt de efficiëntie van de brandstofcel. De huidige brandstofcellen hebben daardoor veelal een energie-efficiëntie van ten hoogste dan 50%. Maar de efficiëntie van de huidige verbrandingsmotoren die op olieproducten lopen ligt nog lager: waarden van rond de 30% zijn eerder regel dan uitzondering. En dit percentage zou ook gelden voor verbrandingsmotoren in voertuigen die waterstof als brandstof gebruiken.

2.3 Kijken in de toekomst

Of en in welke mate de nieuwe technologie marktaandeel veroverd: dat is niet het onderwerp van dit advies. Wel is het van belang te weten dat deze ontwikkeling van veel factoren afhangt: de behoeften van groepen in de bevolking, de beschikbaarheid van alternatieven, de samenloop met de ontwikkeling van andere technologieën, de samenwerking van marktpartijen, interventies door de overheid, acceptatie door het publiek, *et cetera*.³⁴

Brandstofcellen en alternatieven

Vanwege het relatief gunstige rendement in vergelijking tot dat van conventionele verbrandingsmotoren is de ontwikkeling van voertuigen met verbeterde brandstofcellen in elektromotoren volop gaande. In Japan, de Verenigde Staten en in Europa wordt inmiddels veel geld besteed aan de ontwikkeling van brandstofcellen (zie bijvoorbeeld ¹⁷). Goede alternatieven voor brandstofcellen zijn op dit moment namelijk niet voorhanden. Zo lijkt het gebruik van accu's als enige aandrijfbron voor voertuigen nu nog geen goed alternatief, gezien de lage energiedichtheid en de hoge prijs per kilowattuur. Maar ook in de ontwikkeling van accu's (met behulp van nanotechnologie) wordt veel geld gestoken. Veel autofabrikanten zijn daarvoor allianties aangegaan met batterijproducenten (zie bijvoorbeeld ³⁵). General Motors en Daimler Benz hebben inmiddels al modellen van elektrische auto's aangekondigd (zie bijvoorbeeld ³⁶). Bij verdere doorbraken in de opslag van elektriciteit in accu's (of andere opslagmedia zoals condensatoren; zie ³⁷) zouden elektrisch aangedreven voertuigen een geduchte concurrent gaan vormen voor voertuigen die op waterstof rijden. Een groot voordeel van elektrisch aangedreven voertuigen is het hoge energetisch rendement van 'well to wheel'. Het gebruik van elektrisch aangedreven voertuigen heeft verder als voordeel dat geen dure nieuwe infrastructuur nodig is. Deze concurrerende technieken zouden echter ook samen kunnen worden ingezet, in hybride voertuigen met zowel brandstofcellen als accu's voor de aandrijving.

Maar ook als waterstof een dominante rol gaat spelen zijn er uiteenlopende toekomstscenario's denkbaar. Dat hangt samen met de wijze van productie, distributie en gebruik, zoals hiervoor al is aangegeven. De commissie verwijst naar de uitkomst van een Engels project waarin diverse scenario's naast elkaar zijn gezet.⁴⁰ Uit de analyse van de Engelse onderzoekers wordt duidelijk dat de doorwerking van het gebruik van waterstof ook afhangt van de introductie van andere toepassingen dan die bij het wegverkeer.

Gunstige effecten op de volksgezondheid

Het gebruik van waterstof als energiebron voor wegverkeer leidt tot verscheidene gunstige effecten. De twee meest voor de hand liggende zijn: minder luchtvervuiling en minder emissie van broeikasgassen. Minder luchtvervuiling heeft een direct gunstig effect op de volksgezondheid doordat geen schadelijke uitlaatgasen worden uitgestoten, zoals roet, fijn stof, stikstofoxiden, koolmonoxide en benzeen. Het gezondheidseffect van minder emissie van broeikasgassen is indirect, maar ook gunstig. Een ander effect is dat het gebruik van door brandstofcellen aangedreven elektromotoren de geluidhinder door wegverkeer kan verminderen.

3.1 Minder luchtvervuiling

Bij de toepassing van waterstof in het gemotoriseerde wegverkeer is het gunstige effect op de luchtverontreiniging evident (zie bijvoorbeeld ³⁹). De emissie van schadelijke stoffen als stikstofoxiden en deeltjesvormige luchtverontreiniging ('fijn stof') neemt af, doordat waterstof tijdens het verbruik in het voertuig in water wordt omgezet.

Niet dat verkeersgerelateerde luchtverontreiniging daarmee volledig van de baan is. Zo blijft deeltjesvormige luchtverontreiniging ontstaan door banden- en asfaltlijpsel.⁴⁰ De voordelen op het gebied van fijn stof kunnen bovendien voor een klein deel weer teniet gedaan worden door het zogenaamde *rebound*-effect. Waar mensen nu nog voor korte ritten of bij een goed alternatief (zoals openbaar

vervoer) uit milieuoverwegingen de auto laten staan, zal die prikkel bij een schonere waterstofauto minder sterk zijn, zeker als de milieuoverwegingen niet sterk zijn verankerd. Dit kan leiden tot meer autokilometers en dus tot meer slijtage van wegdek, banden en motor. Toch zullen de bewoners van stedelijke gebieden profiteren van de waterstoftechnologie doordat de luchtkwaliteit verbetert, verwacht de commissie.

Een belangrijk voordeel voor de volksgezondheid zou zich ook kunnen voordoen in landen die zich nog volop industrieel aan het ontwikkelen zijn.⁴¹ Daar zou al in een vroeg stadium overgeschakeld kunnen worden op waterstof als energiebron. Op die manier kan dan voorkomen worden dat bij een sterk toenemend gebruik van auto's grote gezondheidsschade ontstaat. Of dit inderdaad gerealiseerd kan worden, hangt uiteraard af van levensvatbaarheid van de waterstoftechnologie.

3.2 Minder broeikasgassen

Ook minder broeikasgassen zijn gunstig voor de volksgezondheid, zij het indirect en op mondiale schaal. De discussie over het terugdringen van emissies is al een tijd in volle gang. Emissiearme energiebronnen, zoals zonne-, water- en windenergie en mogelijk kernenergie en biomassa, kunnen daarin een rol spelen.

We zagen al eerder dat de manier waarop waterstof wordt geproduceerd van invloed is op de duurzaamheid van deze energievorm. Met name de productie met behulp van fossiele brandstoffen wringt met het doel van lagere emissies van broeikasgassen. Een optie zou zijn om de productie van waterstof uit fossiele brandstof te koppelen aan een veilige kooldioxideopslag (de *Carbon Capture and Storage*-strategie).^{25,42} Aan de opslag van kooldioxide zijn echter risico's verbonden.⁴³ Die aanpak is dan ook te zien als een tijdelijke overbrugging op de weg naar een duurzame energievoorziening – maar wel een overbrugging die gunstiger is voor de volksgezondheid dan het gebruik blijven maken van fossiele brandstof voor het wegverkeer.

3.3 Minder geluidhinder

Bij gebruik van brandstofcellen om elektromotoren aan te drijven zullen voertuigen stiller worden dan nu het geval is. Ook dit leidt tot gezondheidswinst. De Gezondheidsraad heeft in het verleden uitgebreid gerapporteerd over de invloed van geluid op de gezondheid.^{44,45} Het effect zou voor een deel weer teniet worden gedaan doordat zich meer verkeersongevallen kunnen voordoen wanneer mensen auto's minder goed horen aankomen. Er zijn echter aanwijzingen dat

juist als er in het verkeer iets verandert, het risico van een ongeval althans tijdelijk juist afneemt in plaats van toeneemt, zodat voor dit gevolg mogelijk niet hoeft te worden gevreesd.^{46,47}

Risico's voor de volksgezondheid

Behalve voordelen voor de volksgezondheid kan gebruik van waterstof in het wegverkeer ook nadelen hebben. De directe risico's hangen vooral samen met de opslag van waterstof in voertuigen: waterstofbrand en explosies als gevolg van verkeersongevallen en lekken, blootstelling aan materialen uit brandstofcellen en opslagtanks na ongevallen. In het afvalstadium kunnen deze stoffen ook leiden tot milieuvervuiling en daardoor tot indirecte gezondheidsschade. Een ander indirect risico is het mogelijk optreden van atmosferische veranderingen als gevolg van lekkages van waterstof die plaats kunnen vinden tijdens productie, distributie en verbruik. Omdat nog onbekend is welke technologie gebruikt gaat worden en hoe de bijbehorende infrastructuur er uit zal zien, zijn nu nog niet alle risico's te voorzien.

4.1 Zorgvuldige introductie van nieuwe technologie

Rekening houden met risicomigratie en 'early warnings'

Bij technologische ontwikkelingen gaat de aandacht in eerste instantie vaak uit naar de veronderstelde voordelen.^{6,7} De bedoeling is immers om te voorzien in maatschappelijke behoeften of veronderstelde behoeften. Onvermijdelijk kleven aan een nieuwe of vernieuwde technologie echter ook nadelen – vaak risico's van

een heel andere aard, die niet altijd te voorzien zijn en voor een deel pas na invoering zichtbaar worden. Dat fenomeen wordt wel risicomigratie genoemd.^{48*}

De kennis over nieuwe 'bijwerkingen' ijlt dan dus na.⁸ Om dat 'na-ijlen' zoveel mogelijk in te perken is het zaak om vooraf mogelijke nadelige kanten van een technologie zo goed mogelijk in schatten. Dat is dan ook een van de redenen om op dit moment al aandacht te besteden aan de gezondheidsgevolgen van de waterstofeconomie, lang voordat sprake is van een eventuele grootschalige toepassing.

Daar echter niet alle risico's te voorzien zijn, is het zaak om ook na invoering van de technologie de vinger aan de pols te houden en bedacht te zijn op 'early warnings'.^{7,49**} Ook al is er op dat moment de nodige ervaring met waterstof, de echte transitie naar een waterstofeconomie vereist een schaalvergroting die onbekende risico's in zich kan herbergen.^{7,50}

Inschattingen maken voor de lange termijn

Wie inzicht wil krijgen in de risico's van technologieën doet er naar de mening van de commissie verstandig aan om niet alleen bij de invoering en de eerste toepassingen stil te blijven staan. Hoe lastig het ook is om verder in de toekomst te kijken, de keerzijden van innovaties manifesteren zich, zoals we net zagen, vaak pas bij ingeburgerd gebruik en in de slotfase van de levenscyclus van een technologische toepassing. Voorbeelden zijn het afvalprobleem bij de energieopwekking in kerncentrales en de afgedankte mobiele telefoons in het huisvuil.

Dat vergt in het algemeen, en dus ook in het geval van de eventuele overgang naar waterstof in het wegverkeer, een levenscyclusbenadering⁵¹. Daarbij worden in een zo vroeg mogelijk stadium de gezondheidsrisico's in de diverse fasen van productie en gebruik meegewogen bij het bepalen van de waarde van een grondstof in het economisch verkeer. Dat is van belang voor een zo adequaat mogelijke inschatting van de risico's.

Als er diverse opties zijn, moeten de risico's van elk in kaart worden gebracht. Als men bijvoorbeeld diverse technologieën wilt vergelijken, zoals het gebruik van waterstof en biobrandstof, moeten daarvoor diverse scenario's beoordeeld worden.³⁸ Specifiek voor waterstof geldt dat er bekeken moet worden welke gevolgen voortkomen uit de verschillende productiemethoden. Het

* In het aangehaalde artikel wordt het geval besproken van polybroomverbindingen. Om het risico op brandwonden in te perken wordt kleding en elektronica geïmpregneerd met deze stoffen. Vroeg of laat komen ze via de afvalstromen in het milieu en blijken risico's voor de gezondheid van mens en milieu op te leveren.

** In een recent uitgebracht advies *Voorzorg met rede* van de Gezondheidsraad over toepassing van het voorzorgsbeginsel wordt op de deze kwestie uitgebreider ingegaan.

maakt voor de gezondheidsrisico's van de waterstoftechnologie namelijk nogal uit of waterstof wordt gewonnen met elektriciteit die is opgewekt door zonnecellen of met kolen.

Bij deze benadering, waarin geprobeerd wordt op voorhand een zo compleet mogelijk beeld te krijgen van de risico's, volstaat het niet alleen technologen te consulteren. Het gaat er om alle belanghebbenden 'aan het woord te laten komen' en hun verwachtingen en bezorgdheden bij de ontwikkeling en maatschappelijke invoering van de nieuwe of vernieuwde technologie te betrekken. Zo'n aanpak is onderdeel van een proces van *risk governance*.^{52*}

4.2 Acuut gevaar door brand en explosie

Welke risico's zijn op dit moment te voorzien als waterstof op grote schaal brandstof gaat leveren voor het wegverkeer? Een eerste probleem is het acute gevaar door een brand of een explosie.⁵³

Zuivere waterstof brandt bij daglicht bijna onzichtbaar en bij een brand komt weinig warmtestraling vrij.^{**} Daardoor wordt een waterstofbrand in eerste instantie niet gemakkelijk herkend, terwijl die wel tot verwondingen kan leiden en zich ongemerkt kan uitbreiden. Door het bijmengen van sporegassen die de vlam kleuren en een alarmerende geur toevoegen (zoals bij aardgas), kan dat overigens ondervangen worden.⁵⁰

Een andere eigenschap die tot gevaarlijke situaties kan leiden is dat waterstof dat zich mengt met lucht over een zeer breed concentratiegebied kan ontbranden of exploderen; bij andere brandstoffen is dat concentratiegebied veel geringer (zie figuur 4 in bijlage B).

Deze eigenschappen maken dat vooral in gesloten ruimtes al bij kleine lekkages het gevaar bestaat van een explosie of ontbranding – iets wat zich dus kan voordoen in de productie, bij de distributie en in het gebruik. Om die reden zijn brand- en explosiegevaar vrijwel onvermijdelijk een risico dat hoort bij het toepassen van waterstofgas. Gevoegd bij het vermogen om door te dringen in de structuren van verschillende materialen, zoals staal en plastics, maakt dit waterstof technisch gezien tot een lastig te hanteren gas.

* Met 'governance' wordt bedoeld de structuren en processen voor collectieve besluitvorming, waarbij zowel overheids- als particuliere instanties en partijen betrokken zijn. Het komt erop neer dat in onze moderne samenleving besluiten niet meer door de overheid van bovenaf worden opgelegd, maar dat ze in netwerken van alle betrokken partijen tot stand worden gebracht. Past men dit gedachtegoed toe op risico's en risicogerelateerde besluitvorming, dan is er sprake van *risk governance*. Het onlangs verschenen advies van de Gezondheidsraad over het voorzorgsbeginsel (2008/18) gaat in detail op *risk governance* in.

** Zie voor enkele eigenschappen van waterstof bijlage B.

Het blussen van een waterstofbrand vergt ook speciale aandacht. Een waterstofbrand dient niet te worden geblust tenzij dat absoluut noodzakelijk is. Er is dan namelijk het gevaar van een spontane explosieve herontsteking. Beter is het de toevoer van het gas te stoppen. Brandweer, pomphouders en automobilisten moeten hierop worden getraind en voorgelicht.

Mogelijkheden van risicobeheersing

De kennis over en de ervaring met het gebruik van waterstofgas maken het mogelijk de risico's van brand en explosie enigszins te kwantificeren.¹⁰ De cijfers geven aan dat het weliswaar mogelijk is aan de Nederlandse kwantitatieve milieurisicocriteria te voldoen maar dat wel de nodige inspanning geleverd moet worden om de risico's zo laag te houden als redelijkerwijs mogelijk is (conform het ALARA-beginsel* in het risicobeleid²⁴). Dat kan onder meer door veilige ontwerpen voor installaties, het gebruik van sporegassen, en heldere gebruiksvorschriften. Verder moeten de gebruikers (dus ook de algemene bevolking) vertrouwd gemaakt worden met de toepassingen van waterstofgas. Op die manier zullen de risico's – met lekkage in gesloten ruimtes als grootste probleem – beperkt kunnen worden.

Toch blijkt uit gegevens van de NASA dat risicobeheersing geen sinecure is.⁵⁵ Bij de industriële incidenten met waterstof ging het in één op de vijf gevallen om lekken die niet waren gedetecteerd, ondanks de speciale training van het personeel, uitgebreide procedures en de aanwezigheid van detectoren.

Er is in de literatuur geen consensus of waterstof risicovoller is dan andere brandstoffen, zoals LPG, methanol of propaan. De aard en omvang van de risico's hangen namelijk erg van de gebruiksmodaliteiten af, zoals de opzet van de distributiesystemen.³¹

4.3 Vervuiling door brandstofcellen en brandstoftanks

Een tweede type risico hangt samen met het gebruik van metalen en andere verbindingen in de opslagtanks en brandstofcellen in voertuigen. Ongelukken met brandstofcellen (in voertuigen) door brand en explosies leiden tot het vrijkomen van deze stoffen. Naast de gevolgen van het ongeval op zich kan ook dat tot mogelijke gezondheidsschade leiden.

Aard en ernst van die risico's zullen afhangen van het type of de types brandstofcellen en brandstoftanks die algemeen gebruikt gaan worden in een toekomstige voertuigen.

* ALARA: As Low As Reasonable Achievable.

stige waterstofeconomie. In verschillende brandstofcellen worden verschillende elektrolyten gebruikt die bij het vrijkomen tot gezondheidsschade kunnen leiden. Zo kan kaliumloog bij contact tot brandwonden leiden en bij een brand kan zwavelzuur tot giftige dampen en brandwonden leiden.

Verder worden tot nu toe zware metalen gebruikt in brandstofcellen, in het bijzonder als elektrodematerialen (platina). Vanwege de kosten en beperkte beschikbaarheid van bepaalde zware metalen wordt veel onderzoek verricht naar alternatieve materialen. Zo wordt onderzocht of koolstof (al dan niet in de vorm van nanostructuren) kan worden gebruikt als dragermateriaal voor de zware metalen, waardoor er minder metaal nodig is. Een aandachtspunt bij het gebruik van nanokoolstofdeeltjes is dat deze deeltjes in vrije vorm mogelijk schadelijk kunnen zijn bij inademing.^{52,56}

Duurzame toepassing van brandstofcellen (en brandstoftanks) zal dus aandacht vergen. Voorkomen moet worden dat schadelijke stoffen in het milieu terecht komen. Dat vergt beperking van het risico van incidenten, maar ook beleid voor de verantwoorde verwerking van brandstofcellen die aan het eind van hun levensduur zijn gekomen.

4.4 Veranderingen in de atmosfeer

Een bijzonder punt van zorg vormt de invloed van weggelekte waterstof op de atmosfeer.^{57,58} Waterstof reageert namelijk met de zogeheten OH-radicalen in de atmosfeer die belangrijk zijn voor het reinigend vermogen van de atmosfeer, zoals bij de afbraak van methaan. Door de ingewikkelde chemische reacties die er in troposfeer en de stratosfeer plaatsvinden is het netto-effect op bijvoorbeeld het broeikas effect en de dikte van de stratosferische ozonlaag niet eenvoudig te voorspellen. De gevolgen zullen onder meer afhangen van de invloed van de vermindering van de emissies van stikstofoxiden en koolmonoxide door het gebruik van brandstofcellen, maar ook van de hoeveelheid broeikasgassen en andere stoffen die bij de productie van waterstof en de constructie van de waterstofinfrastructuur vrijkomen. Er wordt daarnaast uiteenlopend gedacht over de waarden van enkele belangrijke parameters (waaronder het verlies van waterstof in de keten van productie tot en met gebruik) waarop de berekeningen zijn gebaseerd.⁵⁹⁻⁶²

Uit deze discussie blijkt volgens de commissie niet dat de voordelen voor de gezondheid teniet gedaan worden door mogelijke effecten van waterstof op de atmosfeer.

4.5 Vervuiling door ongereguleerde productie

Wanneer waterstof op grote schaal wordt toegepast, ontstaat er naar verwachting een prijsgedreven wereldmarkt.⁶³ Er kan dan in elk land en met elke denkbare methode waterstof gemaakt worden, bijvoorbeeld met behulp van kolen en zonder afvang van kooldioxide. In theorie zou zo met een beperkte lokale milieuwetgeving grootschalig goedkope en milieuvriendelijk geproduceerde waterstof aangeboden kunnen worden op de wereldmarkt. Dat zou een deel van het gezondheids- en milieuvoordeel van waterstof weer teniet kunnen doen. Het is daarom raadzaam om er nu al over na te denken hoe dergelijke scenario's kunnen worden voorkomen. Wellicht biedt een certificeringssysteem voor waterstofproductie – in combinatie met internationale afspraken – een uitkomst.

4.6 Afnemende verkeersveiligheid door stillere voertuigen

Auto's met elektromotoren zijn stiller dan auto's met interne verbrandingsmotoren. Dat zou mogelijk tot meer verkeersslachtoffers aanleiding kunnen geven. In het vorige hoofdstuk heeft de commissie al aangegeven dat er aanvankelijk ook minder slachtoffers zouden kunnen zijn en geen toename van de verkeersonveiligheid optreedt.

Vinger aan de pols

In dit slothoofdstuk vat de commissie eerst de voorgaande hoofdstukken kort samen, om vervolgens aanbevelingen te doen voor een begeleiding van de ontwikkeling van de waterstoftechnologie. Belangrijk is daarbij dat in het bijzonder de overheid de ‘vinger aan de pols’ houdt en zo bevordert dat de baten voor de volksgezondheid overheersen.

5.1 Voor- en nadelen voor de volksgezondheid

Het toepassen van waterstof zal zeker in stedelijke gebieden leiden tot een afname van de luchtvervuiling door het afnemen van de uitstoot van verbrandingsproducten van benzine, diesel en gas. Bij toepassing van brandstofcellen zal ook het verkeersgeluid afnemen omdat de motoren stiller worden.

De mate waarin ook de emissie van broeikasgas zal verminderen, met de indirecte gevolgen voor de gezondheid die dat heeft, hangt sterk af van de productiewijze. Bij grootschalig gebruik van bijvoorbeeld kolen komt veel kooldioxide vrij. Dat zou dan opgeslagen moeten worden om de emissie daarvan te voorkomen of in elk geval zoveel mogelijk te beperken. De technologie daarvoor is echter nog in ontwikkeling en kent zijn eigen risico's. Het gebruik van waterstof leidt dus niet zonder meer tot een uit het oogpunt van klimaataantasting duurzame energievoorziening voor het wegverkeer maar doet dat alleen onder bepaalde voorwaarden.

Behalve gezondheidsvoordelen zijn er ook risico's verbonden aan de introductie van waterstof voor het wegverkeer. Sommige risico's zijn al bekend, omdat waterstof in de chemische industrie uitgebreid wordt toegepast. Daarbij valt te denken aan brand en explosies die door de aard van het gas bijzondere eisen stellen aan preventie en bestrijding. Hoe die risico's uitpakken bij grootschalige toepassing buiten de industriële omgeving is moeilijk te voorspellen.

Daarnaast zijn er mogelijk ook effecten op de atmosfeer en hogere luchtlagen. Een zekere mate van lekkage tijdens productie, distributie en gebruik (van 'well to wheel') lijkt namelijk onvermijdelijk. De effecten van gelekt waterstof zijn echter zeer onzeker en het nettoresultaat laat zich moeilijk voorspellen.

Verder heeft de geschiedenis geleerd dat elke nieuwe technologie onverwachte mogelijkheden kent maar ook onvoorziene risico's met zich meebrengt. De onverwachte risico's manifesteren zich soms pas geruime tijd na het ingeburgerd raken van de technologie. De commissie ziet geen reden te veronderstellen dat dit bij het toepassen van waterstof als brandstof voor het wegverkeer anders zal zijn.

5.2 Noodzaak van draagvlak in de bevolking

Wil een technologie zich een vaste plaats in de samenleving veroveren, dan zal daarvoor draagvlak moeten zijn. Ontbreekt dat draagvlak of kalft het af, dan leidt dat tot maatschappelijke spanningen, zoals de ontwikkeling van kernenergie voor elektriciteitsproductie en de introductie van genetische gemodificeerde gewassen hebben laten zien. In kringen van beleidsmakers, ondernemers en technici, is wel gedacht dat het gebrek aan draagvlak vooral te maken had met gebrek aan inzicht in en kennis over de nieuwe technologie. Onderzoek heeft echter aangetoond dat zaken als vertrouwen in de ondernemers die de technologie introduceren, vertrouwen in de overheid als beschermer van het algemeen belang, de mogelijkheid de voordelen van de technologie te plukken en tegelijkertijd het gevoel te hebben de risico's te beheersen een hoofdrol spelen.⁶⁴⁻⁶⁶

Onderzoek naar de wijze waarop het publiek op waterstof in het wegverkeer zal reageren is logischerwijs nog beperkt. Via waterstof aangedreven voertuigen zijn immers slechts op zeer kleine schaal in de vorm van proefprojecten geïntroduceerd. Uit het momenteel beschikbare onderzoek (waaronder dat in het kader van het Amsterdamse waterstofbusproject⁶⁷) blijkt dat zorgen over mogelijke nadelen van de technologie vooralsnog een beperkte rol spelen.^{27,67,68} Hoewel een meer duurzame energievoorziening voor het vervoer in het algemeen wel op een positief onthaal kan rekenen, laten verscheidene onderzoeken ook zien dat de acceptatie van waterstofauto's sterk door prijs en prestatie worden bepaald. Ook

is er de vraag van de situering van bijvoorbeeld tankstations. Omwonenden zullen niet of nauwelijks profiteren van de voordelen, maar zien zich wel geconfronteerd met de introductie van een nieuw, door het individu niet te beheersen risico in zijn of haar leefomgeving.⁶⁹

Als de ontwikkeling van de waterstoftechnologie een positief onthaal blijft krijgen onder beleidsmakers en ondernemers, dan is het zaak aandacht te besteden aan draagvlak in de bevolking. Daarbij gaat het er niet alleen om mensen te informeren over de voordelen waarbij de aanvankelijke hogere kosten kunnen worden gecompenseerd door subsidies en overheidsinvesteringen (die overigens naar verwachting aanzienlijk zullen zijn³). Er moet ook aandacht uitgaan naar de risico's en de zorgen die daarover in de bevolking leven. En het is van belang om alert te zijn op signalen van onvoorziene risico's: de 'vinger aan de pols'.

5.3 Noodzaak van transitie management

In het vierde Nationaal Milieubeleidsplan (NMP 4) staan verschillende scenario's beschreven voor de overgang naar een duurzame energiehuishouding.⁷⁰ Een van de beschreven eindbeelden is het gebruik van waterstof als dominante energiedrager. Bij zo'n ingrijpende verandering wordt wel gesproken over 'transitie'. Inmiddels geeft de Interdepartementale Projectdirectie Energietransitie vorm aan het transitiebeleid uit het NMP 4. Transities worden opgevat als grote veranderingen in de manier waarop maatschappelijke functies (zoals vervoer) vervuld worden. Het ingrijpende karakter van de introductie van de waterstoftechnologie is een voorbeeld van een transitie.

Wat betekent dat? In de eerste plaats is in dat geval transitie management nodig, met de overheid in een regierol.⁷¹ Daarnaast pleiten ook de complexiteit en de zeer lange termijn van de omschakeling voor sturing door de overheid.³ De duurzaamheid van de gebruikte energiebronnen en de wijze waarop een infrastructuur wordt verwezenlijkt zullen daarbij belangrijke thema's zijn.

In de afgelopen jaren zijn verscheidene rapporten verschenen over de transitie naar het grootschalige gebruik van waterstof.⁷²⁻⁷⁴ Veel rapporten gaan echter vooral in op de technologische kant. Maar de commissie benadrukt dat ook de al genoemde aandacht voor draagvlak in de bevolking onontbeerlijk is, wil de samenleving de vruchten van de waterstoftechnologie kunnen plukken. Verder zijn naast de invloed op de economie en het lokale en wereldwijde milieu ook de invloeden op de volksgezondheid een integraal onderdeel van de door de commissie voorgestane aanpak.⁷¹

Met zorgvuldig, stapsgewijs transitie management kunnen gezondheidskwesties een natuurlijke plaats krijgen bij het ontwikkelen en eventueel invoeren van

de waterstoftechnologie. Daarbij komen ook de nadelige na-ijleffecten op de gezondheid in beeld en kan men trachten deze zoveel mogelijk tegen te gaan. Maar het gaat niet alleen om nadelen voor de gezondheid. De commissie wijst erop dat de ontwikkeling en de introductie van een technologie ook gepaard gaan met verschuivingen in aanvankelijk voorziene toepassingen.⁶ Ook daaruit kunnen voordelen voor gezondheid en welzijn voortvloeien. Dat kan kansen bieden ook voor het plukken van gezondheidsvruchten. Ook dit is een reden om de ‘vinger aan de pols’ te houden. Op dit ogenblik worden zulke kansen, voor zover de commissie kan overzien nog nauwelijks geëxploreerd: het substitutiedenken – benzine wordt ‘slechts’ vervangen door waterstof – lijkt de technologieontwikkeling te bepalen.

De commissie sluit zich aan bij pleidooien om nieuwe technologie stapsgewijs te introduceren als onderdeel van een democratisch proces.⁷⁵ Waar dat proces uitkomt, laat zich niet van tevoren voorspellen. Deze aanpak biedt echter wel de gelegenheid om voorzorg toe te passen bij onvoorziene dreigingen en tegelijk de onvoorziene kansen van de waterstoftechnologie – andere vormen van mobiliteit – te benutten.

Literatuur

- 1 Nieuwe energie voor het klimaat. Werkprogramma Schoon en Zuinig. Den Haag: Ministerie van VROM; 2007 september. Rapport VROM-7421. Internet: <http://www.energie.nl/index2.html?nel/n107e0901.html>, accessed 04-06-2008.
 - 2 NAS-NRC-NAE Committee on Alternatives and Strategies for Future Hydrogen Production and Use. The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs. Washington, DC: National Academy Press; 2004 February. Internet: http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=10922, accessed 04-06-2008.
 - 3 NAS-NRC Committee on Assessment of Resource Needs for Fuel Cell and Hydrogen Technologies. Transitions to Alternative Transportation Technologies: A Focus on Hydrogen. Washington, DC: National Academy Press; 2008. Internet: <http://www.nap.edu/catalog/12222.html>, accessed 18-07-2008.
 - 4 HyWays, the European Hydrogen Roadmap. Brussels: European Commission, Directorate-General for Research; 2007. Project Report of Contract SES6-502596. Internet: http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/nn/hyways-roadmap_en.pdf, accessed 04-06-2008.
 - 5 Uyterlinde MA, Ybema JR, van den Brink RW. De belofte van een duurzame Europese energiehuishouding. Energievisie van ECN en NRG. Petten, Nederland: Energieonderzoek Centrum Nederland; 2007: Rapport ECN-E-07-061. Internet: <http://www.ecn.nl/publicaties/default.aspx?nr=ECN-E--07-061>, accessed 6-4-2008.
 - 6 Geels FW, Smit WA. Failed technology futures: pitfalls and lessons from a historical survey. *Futures* 2000; 32(9-10): 867-85.
 - 7 Harremoës P, Gee D, MacGarvin M, Stirling A, Keys J, Wynne B, et al. Late lessons from early warnings: the precautionary principle 1896-2000. Copenhagen: European Environment Agency;
-

2001. Environmental Issue report 22. Internet: http://reports.eea.eu.int/environmental_issue_report_2001_22/en/Issue_Report_No_22.pdf, accessed 04-06-2008.
- 8 von Gleich A. Vorsorgeprinzip. In: Bröchler S, Simonis G, Sundermann K, editors. Handbuch Technikfolgenabschätzung. Berlin: Editions Sigma; 1999. 287-93. Internet: http://www.ta-net-rw.de/fileadmin/ta_net/pdf_dateien/von_Glei_grafik.pdf, consulted 19-02-2004.
- 9 World Commission on the Ethics of Scientific Knowledge and Technology. The Precautionary Principle. Paris: UNESCO; 2005. Internet: <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001395/139578e.pdf>, accessed 04-06-2008.
- 10 Rosyid OA. System-analytic Safety Evaluation of the Hydrogen Cycle for Energetic Utilization [PhD Thesis]: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg; 2006 Mai 4. Internet: <http://diglib.uni-magdeburg.de/Dissertationen/2006/abdo.pdf>, consulted 04-06-2008.
- 11 Hydrogen-powered plane takes off. BBC News. 2008 April 4. Internet: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/technology/7330311.stm>, accessed 04-06-2008.
- 12 Newell RG. The hydrogen economy. Laying out the groundwork. Resources 2005; 156(Winter): 20-3.
- 13 Lovins AB. Twenty Hydrogen Myths. Snowmass, CO: Rocky Mountain Institute; 2003 June 20. White Paper no. E03-05 (update 17-02-2005). Internet: http://www.rmi.org/images/other/Energy/E03-05_20HydrogenMyths.pdf, accessed 04-06-2008.
- 14 Kennedy D. The Hydrogen Solution. Science 2004; 305(5686): 917.
- 15 McDowall W, Eames M. Forecasts, scenarios, visions, backcasts and roadmaps to the hydrogen economy: a review of the hydrogen futures literature for UKSHEC. London: Policy Studies Institute; 2004. UKSHEC Social Science Working Paper No. 8. Internet: <http://www.psi.org.uk/ukshec/publications.htm>, accessed 04-06-2008.
- 16 McDowall W, Eames M. Forecasts, scenarios, visions, backcasts and roadmaps to the hydrogen economy: A review of the hydrogen futures literature. Energy Policy. 2006; 34(11):1236-50.
- 17 General Motors Unveils Second Propulsion System for Chevrolet Volt. E-Flex Hydrogen Fuel Cell Continues Move Toward Electric Drive. Detroit, MI, USA General Motors Corporation; 2007 April 20. Internet: <http://media.gm.com/servlet/GatewayServlet?target=http://image.emerald.gm.com/gmnews/viewpressreldetail.do?domain=796&docid=35402>, accessed 04-06-2008.
- 18 Honda makes first hydrogen cars. BBC News. 2008 June 16. Internet: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/business/7456141.stm>, accessed 16-06-2008.
- 19 Freeman S. Getting Hydrogen Cars To Live Up to Their Hype. The Washington Post. 2007 January 23. Internet: <http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2007/01/22/AR2007012201323.html?referrer=email>, accessed 05-06-2008.
- 20 Vier jaar Brandstofcelbus afgesloten [persbericht]. Amsterdam: GVB; 2008 januari 25. Internet: <http://www.gvb.nl/overgvb/nieuws/Pages/Vier%20jaar%20brandstofcelbus%20afgesloten.aspx>, accessed 18-04-2008.
- 21 Yang C. Hydrogen and electricity: Parallels, interactions, and convergence. Int J Hydrogen Energy 2008; 33(8): 1977-94.
-

- 22 Panyor L. Renewable energy from dilution of salt water with fresh water: pressure retarded osmosis. *Desalination* 2006; 199(1-3): 408-10.
- 23 Hydrogen production. Chapter 5. In: Miyamoto K, editor. *Renewable biological systems for alternative sustainable energy production (FAO Agricultural Services Bulletin - 128)*. Rome: Food and Agriculture Organization; 1997. Internet: <http://www.fao.org/docrep/w7241e/w7241e0g.htm>, consulted 04-06-2008.
- 24 Spath PL, Mann MK. *Life Cycle Assessment of Hydrogen Production via Natural Gas Steam Reforming*. Golden, CA: US Department of Energy, National Renewable Energy Laboratory; 2001. Technical Report NREL/TP-570-27637 (revised 2001). Internet: <http://www.nrel.gov/docs/fy01osti/27637.pdf>, accessed 04-06-2008.
- 25 Service RF. The Carbon Conundrum. *Science* 2004; 305(5686): 962-3.
- 26 Scheepers MJJ, Seebregts AJ, Lako P, Blom FJ, van Gemert F. *Fact Finding Kernenergie t.b.v. de SER-Commissie Toekomstige Energievoorziening*. Petten, Nederland: Energieonderzoek Centrum Nederland; 2007 september. Rapport ECN-B-07-015. Internet: http://www.kennislink.nl/upload/178945_391_1191404241951-FactFindingKernenergiesamenvatting.pdf, accessed 20-06-2008.
- 27 Ricci M. *Experts' assessments and representations of risks associated with hydrogen*. Salford, UK: UK Sustainable Hydrogen Energy Consortium, Institute for Social, Cultural and Policy Research, University of Salford; 2005 July. UKSHEC Social Science Working Paper No. 12. Internet: <http://www.psi.org.uk/ukshcec/pdf/Ricci%20WP%2012.pdf>, accessed 09-07-2008.
- 28 Hydrogen delivery: US Department of Energy, Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program; 2007 November 1. Internet: http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/delivery/current_technology.html, accessed 04-06-2008.
- 29 His S. Hydrogen: An Energy Vector for the Future? In: *Panorama 2004*. Rueil-Malmaison Cedex, France: IFP; 2004. Internet: http://www.ifp.com/content/download/57523/1274810/file/IFP-Panorama04_11-HydrogeneVA.pdf, consulted 04-06-2008.
- 30 Agnolucci P. Hydrogen infrastructure for the transport sector. *Int J Hydrogen Energy* 2007; 32(15): 3526-44.
- 31 Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context. Ispra (VA), Italy: European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability; 2007 March. WELL-to-WHEELS Report Version 2c. Internet: <http://ies.jrc.cec.eu.int/wwt.html>, accessed 04-06-2008.
- 32 National Renewable Energy Laboratory. *Hydrogen basics*. 2008. Internet: http://www.nrel.gov/learning/eds_hydrogen.html.
- 33 Dagani R. Tempest in a tiny tube. *Chem Eng News* 2002; 80(2): 25-8.
- 34 Munir KA, Jones M. Discontinuity and After: the Social Dynamics of Technology Evolution and Dominance. *Organ Stud* 2004; 25(4): 561-81.
- 35 Kim C-R. Toyota to Start Lithium-Ion Battery Output in 2009. *Planet Ark*. 2008 June 12. Internet: <http://www.planetark.com/dailynewsstory.cfm/newsid/48754/story.htm>, accessed 12-06-2008.
-

- 36 Hetzner C. Daimler to Offer Electric Mercedes in 2010. Planet Ark. 2008 June 23. Internet: <http://www.planetark.com/dailynewsstory.cfm/newsid/48931/story.htm>, accessed 19-08-2008.
- 37 Schindall J. The charge of the ultra-capacitors. Nanotechnology takes energy storage beyond batteries. IEEE Spectrum Online. 2007 November. Internet: <http://www.spectrum.ieee.org/print/5636>, accessed 19-08-2008.
- 38 Eames M, McDowall W. UK-SHEC Hydrogen Visions. London: Policy Studies Institute; 2005 april. UKSHEC Social Science Working Paper No. 10. Internet: <http://www.psi.org.uk/ukshec/publications.htm>, accessed 04-06-2008.
- 39 Gezondheidsraad. Gevoelige bestemmingen luchtkwaliteit. Den Haag: Gezondheidsraad; 2008. Publicatie nr 2008/09.
- 40 Fauser F. Particulate Air Pollution with Emphasis on Traffic Generated Aerosols. Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory; 1999 February. Report Risø-R-1053(EN). Internet: <http://www.risoe.dk/rispubl/PBK/pbkpdf/ris-r-1053.pdf>, accessed 04-06-2008.
- 41 Vogel G. Can the Developing World Skip Petroleum? Science 2004; 305(5686): 967.
- 42 Pacala S, Socolow R. Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies. Science 2004; 305(5686): 968-72.
- 43 Damen K, Faaij A, Turkenburg W. Health, Safety and Environmental Risks of Underground CO₂ Storage - Overview of Mechanisms and Current Knowledge. Climatic Change 2006; 74(1): 289-318.
- 44 Gezondheidsraad. Over de invloed van geluid op de slaap en de gezondheid [The Influence of Night-time Noise on Sleep and Health]. Den Haag: Gezondheidsraad; 2004. Publicatie nr 2000/14. Internet: <http://www.gr.nl/samenvatting.php?ID=1036>, accessed 04-06-2008.
- 45 Health Council of the Netherlands: Committee on Noise and Health. Noise and Health [Geluid en gezondheid]. The Hague: Health Council of the Netherlands; 1994. Publication nr 1994/15E. Internet: <http://www.gr.nl/pdf.php?ID=1087&p=1>, accessed 04-06-2008.
- 46 Fuller R. Towards a general theory of driver behaviour. Accid Anal Prev 2005; 37(3): 461-72.
- 47 Wilde GJS. Target Risk. Toronto: PDE Publications; 1994. ISBN 0-9699124-0-4. Internet: <http://pavlov.psyc.queensu.ca/target/>, accessed 04-06-2008.
- 48 Alcock RE, Busby J. Risk Migration and Scientific Advance: The Case of Flame-Retardant Compounds. Risk Anal 2006; 26(2): 369-81.
- 49 van Asselt MBA, Rotmans J. Uncertainty in Integrated Assessment Modelling: From positivism to pluralism. Climatic Change 2002; 54(1-2): 75-105.
- 50 Bellaby P, Flynn R, Ricci M. Is hydrogen safe? An approach to the study of perceptions of risk among those who may have a stake in a future hydrogen economy. London, UK: Policy Sciences Institute; 2004. Conference paper of the UK Sustainable Hydrogen Energy Consortium (UKSHEC). Internet: <http://www.psi.org.uk/ukshec/pdf/Nottingham.pdf>, accessed 04-06-2008.
- 51 Matthews HS, Lave L, MacLean H. Life Cycle Impact Assessment: A Challenge for Risk Analysts. Risk Anal 2002; 22(5): 853-60.
-

- 52 Gezondheidsraad. Betekenis van nanotechnologieën voor de gezondheid. Den Haag: Gezondheidsraad; 2006. Publicatie nr 2006/06. Internet: <http://www.gezondheidsraad.nl/pdf.php?ID=1340&p=1>, accessed 04-06-2008.
- 53 Hydrogen safety. Washington, DC: US Department of Energy; 2008. H-facts 1.1008. Internet: http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/h2_safety_fsheets.pdf, accessed 04-06-2008.
- 54 Minister van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. Omgaan met risico's; de risicobenadering in het milieubeleid. Bijlage bij het Nationaal Milieubeleidsplan. Den Haag: SDU Uitgevers; 1989. Tweede Kamer, vergaderjaar 1988-1989, 21137 nr 5.
- 55 Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems: Guidelines for Hydrogen System Design, Materials Selection, Operations, Storage, and Transportation. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, Office of Safety and Mission Assurance; 1997 February 12. Safety Standard NSS 1740.16 (cancelled July 25, 2005). Internet: <http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/canceled/871916.pdf>, accessed 22-07-2008.
- 56 Donaldson K, Stone V, Tran CL, Kreyling W, Borm PJA. Nanotoxicology. *Occup Environ Med* 2004; 61: 727-8.
- 57 Schultz MG, Diehl T, Brasseur GP, Zittel W. Air Pollution and Climate-Forcing Impacts of a Global Hydrogen Economy. *Science* 2003; 302(5645): 624-7.
- 58 Tromp TK, Shia RL, Allen M, Eiler JM, Yung YL. Potential Environmental Impact of a Hydrogen Economy on the Stratosphere. *Science* 2003; 300(5626): 1740-2.
- 59 Eiler JM, Tromp TK, Shia RL, Allen M, Yung YL. Assessing the Future Hydrogen Economy [letter, reply]. *Science* 2003; 302(5643): 228-9.
- 60 Kammen DM, Lipman TE. Assessing the Future Hydrogen Economy [letter]. *Science* 2003; 302(5643): 226.
- 61 Lehman PA. Assessing the Future Hydrogen Economy [letter]. *Science* 2003; 302(5643): 227-8.
- 62 Lovins AB. Assessing the Future Hydrogen Economy [letter]. *Science* 2003; 302(5643): 226-7.
- 63 Forsberg CW. Future hydrogen markets for large-scale hydrogen production systems. *Int J Hydrogen Energy* 2007; 32(4): 431-9.
- 64 Marris C. Public views on GMOs: deconstructing the myths. Stakeholders in the GMO debate often describe public opinion as irrational. But do they really understand the public? [viewpoint]. *EMBO reports* 2001; 2(7): 545-8.
- 65 Slovic P. Perception of risk. In: *The perception of risk*. London: Earthscan Publications; 2000; Risk society and policy series. p. 220-31.
- 66 Montijn-Dorgelo FNH, Midden CJH. The role of negative associations and trust in risk perception of new hydrogen systems. *J Risk Res.* 2008;11(5):659-71.
- 67 Klein Wolt K, Jakobs E, van der Steenhoven P. De waterstofbus in Amsterdam. Een onderzoek naar het draagvlak en acceptatie voor de waterstofbus. Amsterdam: Gemeente Amsterdam, Dienst Onderzoek en Analyse; 2005 juli. Internet: <http://www.gvb.nl/OVERGVB/PROJECTEN/BRANDSTOFCELBUS/Pages/Folders.aspx>, accessed 02-07-2008.
-

- 68 Altmann M, Schmidt P, Mourato S, O'Gara T. AcceptH2 WP3: Analysis and comparisons of existing studies. Ottobrunn, Germany/London: L-B-Systemtechnik/Imperial College of Science, Technology and Medicine; 2003 August. Study in the framework of the ACCEPTH2 project: Public Acceptance of Hydrogen Transport Technologies. Internet: http://www.accepth2.com/results/docs/WP3_final-report.pdf, accessed 02-07-2008.
- 69 Mumford J, Gray D. Making a Drama Out of a Crisis a Dramaturgical Perspective on the New Technology Controversy. *J Risk Res* 2007; 10(8): 1065-83.
- 70 Ministerie van Volkshuisvesting Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. Nationaal Milieubeleidsplan 4. 2001: vrom 01.0433 14548/176.
- 71 Rotmans J, Martens P. Transitions in a globalising world: what does it all mean? In: Martens P, Rotmans J, editors. *Transitions in a globalising world*. Lisse, The Netherlands: Swets & Zeitlinger Publishers; 2002. p. 117-31. Internet: http://sustainabilityscience.org/files/martens-rotmans_transitions_ch6.pdf, consulted 04-06-2008.
- 72 Transitie-pad A5: waterstof. Den Haag: Ministerie van Economische Zaken; 2004 januari. Transitie naar een duurzame energiehuishouding.
- 73 Jeremy Rifkin: 'Europe can lead the third industrial revolution'. Euractiv.com. 2008 January 31. Internet: <http://www.euractiv.com/en/energy/jeremy-rifkin-europe-lead-third-industrial-revolution/article-170005>, accessed 25-07-2008.
- 74 van der Klein K, van Dijk J-J, Maatman D, Hisschemöller M, Knoester B, Florisson O, et al. Waterstof: Brandstof voor Transitie. Utrecht: SenterNovem; 2006 oktober. Advies van het Platform Nieuw Gas, Werkgroep Waterstof. Internet: http://www.senternovem.nl/mmfiles/Waterstof%20brandstof%20voor%20transities%2027-10-06_tcm24-200339.pdf, accessed 25-07-2008.
- 75 Schot J. Constructive Technology Assessment Comes of Age. The birth of a new politics of technology; 1998. International Summer Academy on Technology Studies, Deutschlandberg, Austria. Internet: <http://www.ifz.tu-graz.ac.at/sumacad/schot.pdf>, accessed 11-11-2001.
- 76 Waterstof - H. Delft: Lenntech Water technology en Lucht behandeling; 2006. Internet: <http://www.lenntech.com/elementen-periodiek-systeem/H.htm>, accessed 04-06-2008.
- 77 Hydrogen Properties. Washington, DC: US Department of Energy, College of the Desert; 2001. Module 1. Internet: http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm01r0.pdf, accessed 04-06-2008.
-

A De commissie

B Enkele gegevens over waterstof

Bijlagen

De commissie

-
- prof. dr. W.F. Passchier, *voorzitter*
bijzonder hoogleraar Risico-analyse, Universiteit Maastricht
 - dr. ir. J.W. Erisman
chemicus, Unitmanager Biomassa, Kolen & Milieuonderzoek, Energie
Onderzoekcentrum Nederland, Petten
 - drs. P.J. van den Hazel
medisch-milieukundige, Hulpverlening Gelderland Midden, Arnhem
 - prof. dr. ir. D. Heederik
hoogleraar Gezondheidsrisico-analyse, Institute for Risk Assessment
Sciences, Universiteit Utrecht
 - prof. dr. R. Leemans
hoogleraar Milieusysteemanalyse, Wageningen Universiteit en
Researchcentrum
 - dr. ir. J. Legler
toxicoloog, Instituut voor Milieuvraagstukken, Vrije Universiteit Amsterdam
 - dr. J.P. van der Sluijs
onderzoeker wetenschap, technologie en samenleving, Copernicus Instituut
voor Duurzame Ontwikkeling en Innovatie, Universiteit Utrecht
 - drs. J.W. Dogger, *secretaris*
Gezondheidsraad, Den Haag
 - dr. ir. P.W. van Vliet, *secretaris*
Gezondheidsraad, Den Haag
-

De Gezondheidsraad en belangen

Leden van Gezondheidsraadcommissies worden benoemd op persoonlijke titel, wegens hun bijzondere expertise inzake de te behandelen adviesvraag. Zij kunnen echter, dikwijls juist vanwege die expertise, ook belangen hebben. Dat behoeft op zich geen bezwaar te zijn voor het lidmaatschap van een Gezondheidsraadcommissie. Openheid over mogelijke belangenconflicten is echter belangrijk, zowel naar de voorzitter en de overige leden van de commissie, als naar de voorzitter van de Gezondheidsraad. Bij de uitnodiging om tot de commissie toe te treden wordt daarom aan commissieleden gevraagd door middel van het invullen van een formulier inzicht te geven in de functies die zij bekleeden, en andere materiële en niet-materiële belangen die relevant kunnen zijn voor het werk van de commissie. Het is aan de voorzitter van de raad te oordelen of gemelde belangen reden zijn iemand niet te benoemen. Soms zal een adviseurschap het dan mogelijk maken van de expertise van de betrokken deskundige gebruik te maken. Tijdens de installatievergadering vindt een bespreking plaats van de verklaringen die zijn verstrekt, opdat alle commissieleden van elkaars eventuele belangen op de hoogte zijn.

Enkele gegevens over waterstof

Deze bijlage is ontleend aan ⁷⁶.

Tabel 1 Enkele gegevens van het element waterstof (H).

Atoomnummer	1
Atoommassa	1,007825 g×mol ⁻¹
Dichtheid	0,0899×10 ⁻³ g×cm ⁻³ bij 20 °C
Smeltpunt	- 259,2 °C (13,95 K)
Kookpunt	- 252,8 °C (20,35 K)
Isotopen	1 en 2 neutronen (deuterium en tritium)
Energie eerste ionisatie	1311 kJ×mol ⁻¹
Ontdekt door:	in 1671 door Boyle

Waterstof is het eerste element van het periodiek systeem. Onder normale omstandigheden is het een kleurloos, geurloos en smaakloos gas, gevormd door diatomaire moleculen H₂. Het waterstofatoom, aangeduid als H, bestaat uit een kern met één proton en uit één elektron. Waterstof is een onderdeel van water en van alle organische stoffen en is overal aanwezig, niet alleen op aarde maar ook in de rest van het heelal.

Toepassingen

De belangrijkste huidige toepassing van waterstof is bij de ammoniaksynthese. Waterstof wordt verder veel gebruikt tijdens brandstofproductie, onder andere tijdens hydrocracking (afbraak van stoffen door waterstof) en tijdens zwaveleli-

minatie. Grote hoeveelheden waterstof worden verbruikt tijdens katalytische hydrogenatie van onverzadigde plantaardige oliën voor de productie van vaste vetten. Hydrogenatie wordt toegepast tijdens de fabricage van organische producten. Tenslotte wordt waterstof gebruikt als raketbrandstof.

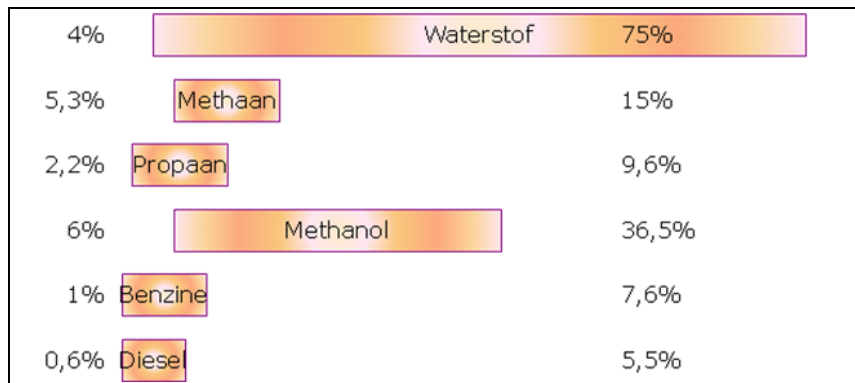
Eigenschappen

Enkele eigenschappen van waterstof zijn opgesomd in tabel 1. Waterstof is van alle bekende stoffen de lichtst ontvlambare. Het is wat beter oplosbaar in organische oplosmiddelen (zoals ethanol) dan in water. Veel metalen absorberen waterstof. Absorptie van waterstof door staal resulteert in broos staal.

Bij kamertemperatuur is waterstof niet erg reactief, tenzij het is geactiveerd door bijvoorbeeld een passende katalysator. Bij hoge temperaturen is waterstof zeer reactief.

Hoewel waterstof over het algemeen diatomair is, zullen de moleculen bij hoge temperaturen uiteenvallen in losse atomen. Vrije waterstofatomen zijn erg reactief, ook bij normale temperaturen. Ze reageren met oxiden en chloriden van metalen als zilver, koper, lood, bismut en kwik. Waterstof reageert met een aantal metallische en niet-metallische elementen tot hydriden. Waterstofatomen kunnen met zuurstof behalve tot water reageren tot waterstofperoxide (H_2O_2).

Waterstof reageert met zuurstof tot water, maar de reactie verloopt bij normale temperaturen erg langzaam. Wanneer de reactie wordt versneld met behulp van een katalysator of een elektrische vonk, vindt deze plaats met explosieve snelheid. Het traject van explosieve concentraties is relatief groot vergeleken met andere brandstoffen (figuur 4).



Figuur 4 Ontbrandbaarheidstrajecten van mengsels van een brandstof en lucht bij normale temperatuur en druk.⁷⁷