



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Naar een veilige en duurzame energietransitie

Vermijd Zeer Zorgwekkende Stoffen zoveel mogelijk in **vloeibare waterstofdragers**



Waterstof (H₂) is een belangrijke en duurzame energiebron. Het kan vervoerd en opgeslagen worden met behulp van vloeibare waterstofdragers. Deze chemische stoffen kunnen Zeer Zorgwekkende Stoffen (ZZS) zijn die schadelijk kunnen zijn voor mens en milieu. Ook is het mogelijk dat er ZZS gevormd worden tijdens het binden en afgeven van waterstof. In deze factsheet wordt het concept van vloeibare waterstofdragers toegelicht. Voor 10 veelbelovende waterstofdragers wordt aangegeven of er ZZS gebruikt of gevormd worden. Daarnaast wordt kort stil gestaan bij de recente ontwikkelingen rond deze technologie. Het RIVM beveelt aan om bij nieuwe toepassingen, zoals vloeibare waterstofdragers, waar mogelijk geen ZZS te gebruiken.

Context

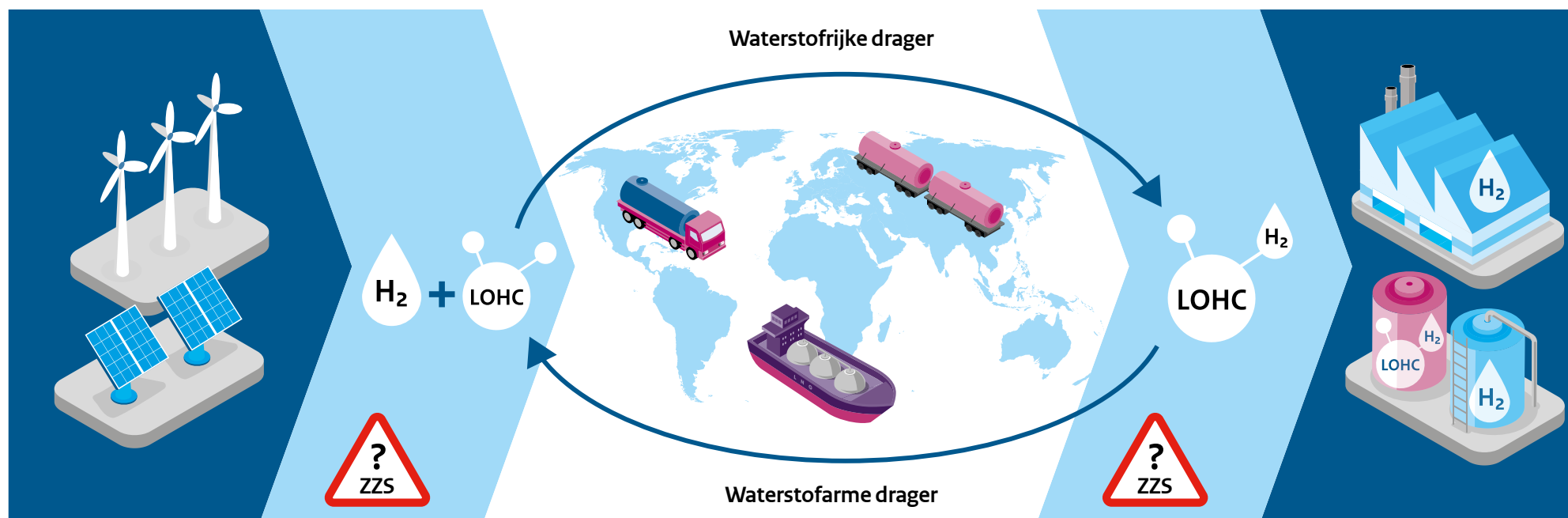
Naar verwachting produceert de Europese Unie in 2030 al 10 megaton duurzaam opgewekte waterstof. Nog eens 10 megaton zal worden geïmporteerd. Deze import zal voor een groot deel via Nederlandse havens lopen. Na 2030 zal de hoeveelheid nog verder stijgen.

Wereldwijd transport van waterstof als (gecomprimeerd) gas of als super-gekoelde vloeistof vergt infrastructuur, die op dit moment slechts zeer beperkt aanwezig is. Om op korte termijn grote hoeveelheden waterstof te kunnen importeren wordt gekeken of de bestaande infrastructuur voor fossiele brandstoffen hergebruikt kan worden. Dit kan als waterstof gebonden wordt aan chemische stoffen die vloeibaar zijn onder omgevingscondities. Dergelijke chemische stoffen worden vloeibare waterstofdragers genoemd.

Vloeibare waterstofdragers kunnen chemische stoffen zijn met of zonder koolstof in hun moleculaire structuur. Met koolstof worden ze LOHC (*liquid organic hydrogen carriers*) genoemd. Zonder koolstof noemen we ze LIHC (*liquid inorganic hydrogen carriers*). Er is een groot en divers aanbod van stoffen die mogelijk als waterstofdrager kunnen worden ingezet.

Concept van vloeibare waterstofdragers

De illustratie geeft het concept van vloeibare waterstofdragers weer. Een vloeibare waterstofdrager zonder waterstof noemen we een waterstofarme drager. Na binding met waterstof (hydrogenering) noemen we het een waterstofrijke drager. Aangezien de waterstof een deel van het molecuul wordt, is er sprake van



twee verschillende chemische stoffen per vloeibare waterstofdrager. Iedere vloeibare waterstofdrager is dus een paar, bijvoorbeeld: toluen - methylcyclohexaan.

De waterstofrijke drager kan vervolgens wereldwijd vervoerd worden. Na aankomst op de bestemming kan deze tijdelijk worden opgeslagen. Uiteindelijk is het de bedoeling om de waterstof weer af te geven (*dehydrogenering*) voor opslag, verdere distributie en/of gebruik. Bij het proces van waterstofafgifte wordt de waterstofarme drager weer gevormd. De waterstofarme drager moet dan weer terug getransporteerd worden om het proces te herhalen. Dit worden reversibele vloeibare waterstofdragers genoemd.

Er zijn ook circulaire vloeibare waterstofdragers. De waterstofarme drager is dan koolstofdioxide of stikstof. Na de waterstofafgifte kunnen deze van nature voorkomende gasen weer in de atmosfeer terugvloeien. Er is dan geen retourtransport nodig. Elke nieuwe cyclus begint weer met koolstofdioxide of stikstof. Er hoeft overigens geen netto toename te zijn van koolstofdioxide. Bij hydrogenering kan de koolstofdioxide namelijk uit de atmosfeer gehaald zijn en niet uit fossiele bronnen komen.

RIVM-onderzoek naar geselecteerde vloeibare waterstofdragers

Voordat deze technologie op grote schaal wordt ingezet, moet duidelijk zijn of vloeibare waterstofdragers schadelijk zijn voor de gezondheid of het milieu. Tot nu toe is de veiligheid alleen onderzocht vanuit het oogpunt van omgevingsveiligheid, bijvoorbeeld explosiegevaar. Het RIVM vindt het belangrijk om ook aandacht te besteden aan Zeer Zorgwekkende Stoffen (ZZS). ZZS zijn stoffen die schadelijk kunnen zijn voor mens en milieu doordat ze bijvoorbeeld kankerverwekkend zijn, de voortplanting belemmeren of zich stapelen in het milieu en voedselketens.

Daarom heeft het RIVM 8 LOHC's en 2 LIHC's geselecteerd die een goed beeld geven van de breedte van het veld en die enkele veelbelovende kandidaten omvatten.

Van deze 10 zijn de technische aspecten beschreven en de ZZS-eigenschappen van relevante stoffen onderzocht. Relevante stoffen voor een vloeibare waterstofdrager zijn de waterstofarme en de waterstofrijke drager, maar ook eventueel gebruikte oplosmiddelen en gevormde bijproducten. Een compleet overzicht van de afgeleide ZZS-statusen is in de tabel te vinden. Hieronder geven we de belangrijkste uitkomsten van het onderzoek weer.

ZZS-eigenschappen van vloeibare waterstofdragers

- Alle LOHC's hebben één of meerdere stoffen met ZZS-eigenschappen. Echter, de mate waarin ZZS aanwezig zijn of gevormd worden kan verschillen.
- Tijdens de waterstofafgifte van de circulaire LOHC's methanol en mierenzuur kan de ZZS koolmonoxide gevormd worden. Het gevormde koolmonoxide kan wel in hetzelfde proces weer met water reageren tot de waterstofarme drager koolstofdioxide (CO₂).
- De reversibele aromatische LOHC toluen vormt 3 ZZS-bijproducten tijdens herhaaldelijke waterstofbinding en -afgifte. De ZZS benzeen is daarvan het belangrijkste bijproduct.
- Bij de overige reversibele (hetero)aromatische LOHC's heeft tenminste de waterstofarme drager ZZS-eigenschappen. Dit betekent dat transport en opslag van deze vloeibare waterstofdragers gepaard gaat met grote ZZS-volumes.
- De circulaire LIHC ammoniak bevat geen stoffen met ZZS-eigenschappen, maar is acuut zeer giftig wat vanuit omgevingsveiligheid een bron van zorg is.
- Helaas was het voor de reversibele LIHC siliconenhydridederivaten niet mogelijk om de ZZS-eigenschappen in kaart te brengen door gebrek aan gegevens. Het is belangrijk dat dergelijke gegevens beschikbaar komen voordat eventuele grootschalige toepassing plaatsvindt.

Stand van zaken en recente ontwikkelingen

- Ammoniak, toluen en benzyltolueen zijn het dichtst bij grootschalige toepassing voor transport en opslag van duurzame waterstof. De belangstelling voor methanol neemt toe.
- Doorontwikkeling van met name ammoniak, methanol, mierenzuur en benzyltolueen is gaande. Onderzocht wordt of de waterstof rechtstreeks afgegeven kan worden in eindapparaten met geïntegreerde brandstofcellen. Deze apparaten wekken dan direct elektriciteit op voor bijvoorbeeld off-grid energiesystemen of het aandrijven van schepen en zwaar transport. De vloeibare waterstofdragers doen dan feitelijk dienst als energiedragers, en niet meer alleen als waterstofdragers.

Hoe nu verder?

Zeer Zorgwekkende Stoffen kunnen schadelijke effecten hebben op mens en milieu. Daarom is het Nederlandse beleid erop gericht om ZZS zoveel mogelijk uit de leefomgeving te weren. Het beste is ZZS te vervangen door veiligere stoffen. Kan dat niet, dan is de aanbeveling om de uitstoot te minimaliseren. Bij nieuwe toepassingen is het beter om geen ZZS te introduceren. Dat geldt dus ook voor de productie en het gebruik van vloeibare waterstofdragers.

Het RIVM raadt aan om vanaf het ontwerp van vloeibare waterstofdragers tot en met het gebruik aandacht te hebben voor mogelijke schadelijke effecten voor mens en milieu. Dat kan met de aanpak van *Safe and Sustainable by Design*. Dit is belangrijk omdat waterstof in de toekomst op grote schaal zal worden toegepast. Zo kan de energietransitie veiliger en duurzamer worden.

Type		ZZS-status					
		ZZS	Beschouwen als ZZS	Potentiële ZZS	Gelijkwaardig aan potentiële ZZS	Waarschijnlijk geen ZZS	Geen conclusie mogelijk
MCH/TOL	reversibele LOHC (aromatisch)	3 bijproducten	-	-	-	MCH TOL	bijproduct
H18-/H0-DBT	reversibele LOHC (aromatisch)	bijproduct	H0-DBT	-	H18-DBT	3 bijproducten	bijproduct
H12-/H0-BT	reversibele LOHC (aromatisch)	bijproduct	H0-DBT	-	-	-	H12-BT
DHN/NAP*	reversibele LOHC (aromatisch)	NAP	-	DHN	-	-	oplosmiddel
H12-/H0-NEC	reversibele LOHC (heteroaromatisch)	H0-NEC bijproduct	-	-	-	H12-NEC	-
EG/EEG	reversibele LOHC (gekoppelde)	bijproduct	-	-	bijproduct	EG; EEG bijproduct 2 oplosmiddelen	-
FA/CO ₂	circulaire LOHC	bijproduct	-	-	-	FA; CO ₂ oplosmiddel	-
MET/CO ₂	circulaire LOHC	bijproduct	-	-	-	MET; CO ₂ oplosmiddel	-
NH ₃ /N ₂	circulaire LIHC	-	-	-	-	-	-
SHD/SS	reversibele LIHC	-	-	-	-	-	SHD; SS bijproducten oplosmiddelen

MCH: methylcyclohexaan; TOL: toluen; CHE: cyclohexaan; BEN: benzeen; H18-DBT: perhydrodibenzyltolueen; Ho-DBT: dibenzyltolueen; H12-BT: perhydrobenzyltolueen; Ho-BT: benzyltolueen; DHN: decahydronaftaleen; NAP: naftaleen; H12-NEC: dodecahydro-n-ethylcarbazoel; Ho-NEC: n-ethylcarbazoel; EG: ethyleenglycol; EEG: esters van ethyleenglycol; FA: mierenzuur; MET: methanol; CO₂: koolstofdioxide; NH₃: ammoniak; N₂: stikstof; SHD: siliciumhydridederivaten; SS: silica en/of silicaatverbindingen.

* Onlangs zijn LOHC's op basis van gesubstitueerd naftaleen voorgesteld, b.v. methylbenzylnaftaleen en cis-perhydro-1-(n-fenylethyl)naftaleen. Deze LOHC's zijn niet uitgebreid beoordeeld.

We merken echter op dat de waterstofarme dragers gesubstitueerde PAK's zijn die tot de ZZS-groep van PAK's behoren.

Auteurs: M. Marinković | J. Ng-A-Tham

Deze factsheet is opgesteld in het kader van het project Versterking van de kennisbasis van het RIVM over energietransitie en milieueffecten, met financiering van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat.

Volledig rapport is te vinden op: <https://doi.org/10.21945/RIVM-2023-0369>

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl

Januari 2024

De zorg voor morgen
begint vandaag