

# The inconvenient truth about Hydrogen

Ton Manders

Netwerkcafé KIVI

3 April 2023



# Inhoud

- Opinie test
- Eigenschappen van waterstof
- Waterstof in onze huidige samenleving
- Waterstof in de toekomst
  - Als Energieopslag
  - Als brandstof voor transport
  - Als warmtebron
  - Waterstof in de chemie
  - Inschatting behoefte
- Waar gaan we het maken
- Conclusie



# Interactie

## Hoe deelnemen?



1

Ga naar [wooclap.com](https://wooclap.com)

2

Voer de code van het  
evenement in de bovenste  
banner in

Evenementcode  
**ZZYTRL**

 [Deelnamelink kopiëren](#)

**wooclap**



100 %







61



# Introductie vraag

Ga naar [wooclap.com](https://wooclap.com) en gebruik de code **ZZYTRL**

Wat is uw mening over waterstof

- 1 Waterstof is de redding van ons klimaat en energie probleem. 2% 1 
- 2 Waterstof zal een grote rol spelen in de energietransitie en klimaat problematiek. 49% 23 
- 3 Waterstof is een hype en zal geen bijdrage gaan leveren aan klimaat en energie transitie. 6% 3 
- 4 Waterstof zal een beperkte rol spelen in de energietransitie en klimaat problematiek. 43% 20 

wooclap



100 %




47 / 61





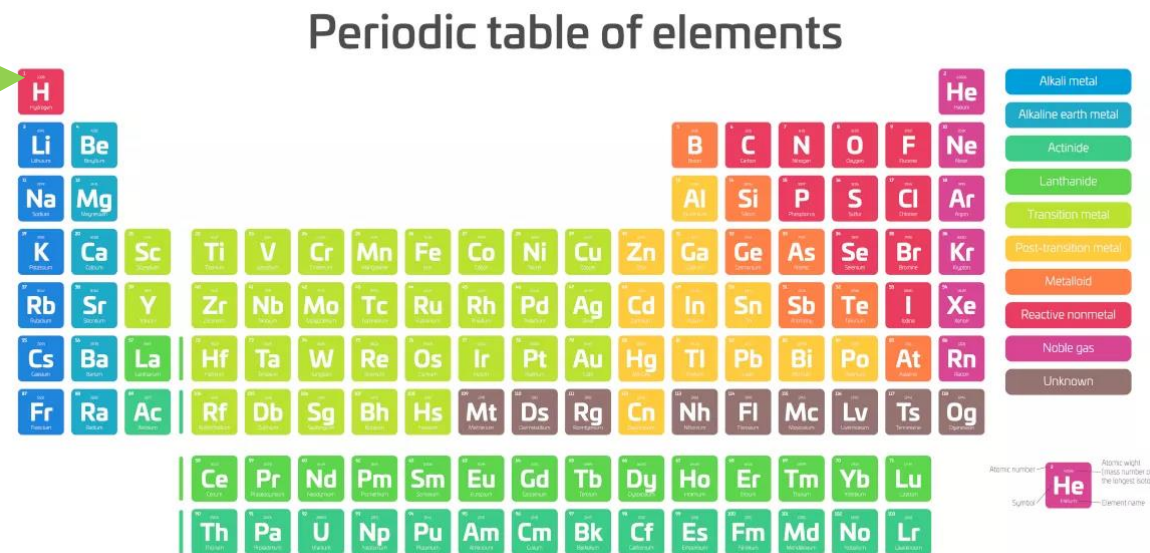
Eigenschappen van  
waterstof



**H<sub>2</sub>**  
**HYDROGEN**

# Waterstof: Eigenschappen

- Waterstof is het eerste element in het periodiek systeem



- H<sub>2</sub> is de bron van ons energie systeem
  - De energie komt uit de fusie van Waterstof atomen tot Helium
    - Simpel:  $4\text{H} \longrightarrow \text{He} + \text{Energy}$
    - 1 kg of H<sub>2</sub> levert 640 TJ
    - Energie verbruik van de wereld = 600 miljoen TJ = 907 ton H<sub>2</sub>
    - De zon zet per seconde 620 miljoen ton H<sub>2</sub> om in energie



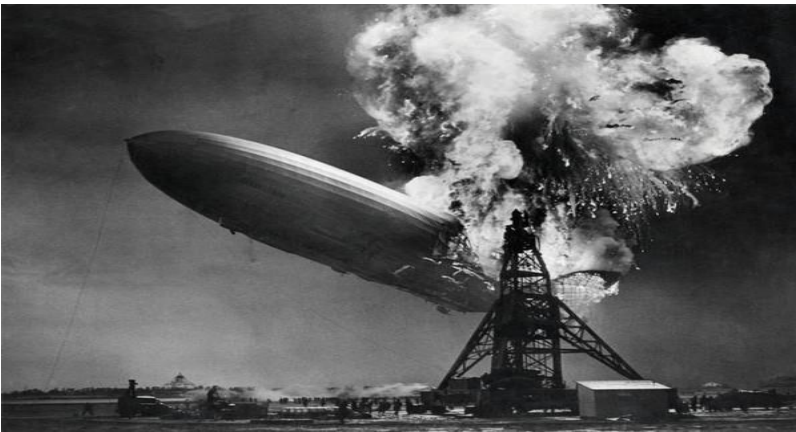
# Waterstof: Eigenschappen

- H<sub>2</sub> is een gas onder normale omstandigheden
- H<sub>2</sub> is een vloeistof minus 253 °C
  - Het vloeibaar maken vergt ca. 35% van de energie inhoud van H<sub>2</sub>
- H<sub>2</sub> heeft een lage energie dichtheid:

– Bij 1 bar, 25 C	11,8	MJ/m <sup>3</sup>
– Aardgas 1 bar, 25 C	39,6	MJ/m <sup>3</sup>
– Bij 700 bar en 25 C	4488	MJ/m <sup>3</sup>
– vloeibare H <sub>2</sub>	8520	MJ/m <sup>3</sup>
– LNG	22369	MJ/m <sup>3</sup>
– Olie/diesel	36300	MJ/m <sup>3</sup>

# Waterstof: Eigenschappen; Veiligheid

- $H_2$  is explosief in lucht tussen 4 en 75 vol% (aardgas tussen 5 en 15 vol%)
- Ontstekingsenergie is zeer laag 0.019 mJ voor aardgas is dat 0,1 mJ



The Hindenburg zeppelin 1937



The Challenger 1986

Hydrogen fuelling station  
Norway 2019





Waterstof in onze  
huidige samenleving

**HYDROGEN**



# Vraag

Ga naar **wooclap.com** en gebruik de code **ZZYTRL**

Hoeveel waterstof wordt er per jaar verbruikt in de EU27?



1 Ca. 1 miljoen ton per jaar 26% 12

2 ca. 5 miljoen ton/jaar 34% 16

3 ca. 8 miljoen ton/jaar 21% 10

4 ca. 15 miljoen ton per jaar 19% 9

wooclap



100 %



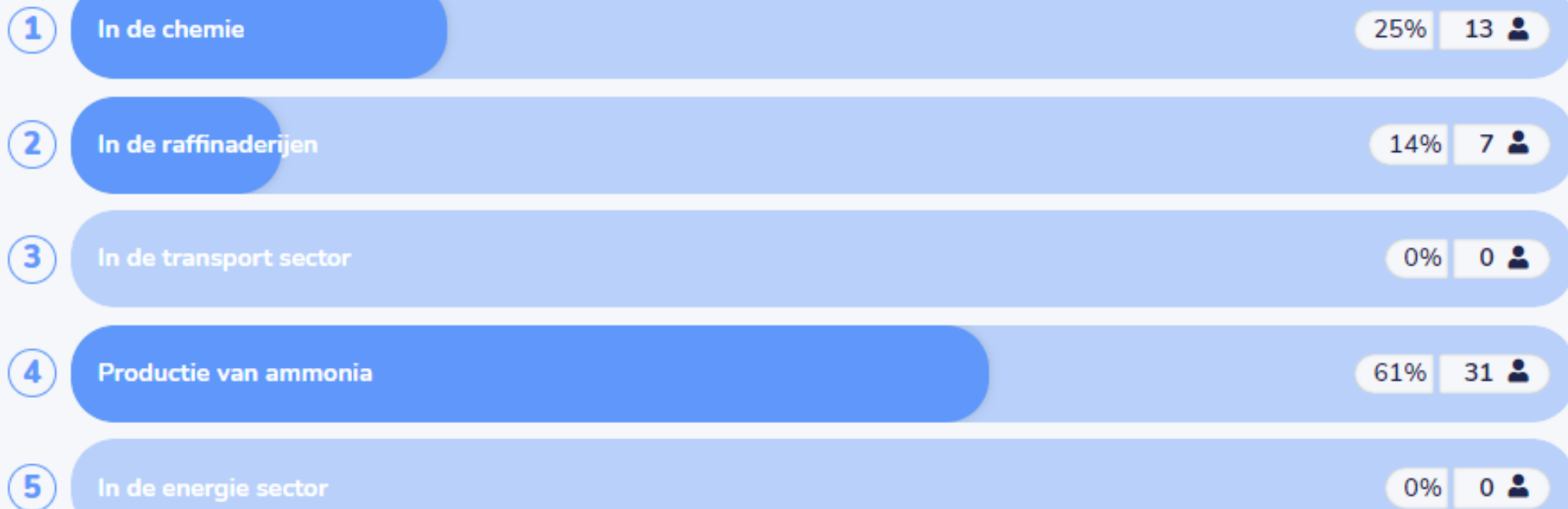
47 / 61



# Vraag

Ga naar **wooclap.com** en gebruik de code **ZZYTRL**

in welke sector wordt momenteel het meeste waterstof gebruikt?



# Vraag

Ga naar [wooclap.com](https://wooclap.com) en gebruik de code **ZZYTRL**

Wat is de belangrijkste productie wijze van waterstof?



- 1 Bijproduct in de chloor-natronloog en natriumchloraat elektrolyse 9% 4
- 2 Bijproduct in het olie raffinage proces 9% 4
- 3 Uit het steam methane reforming proces 78% 35
- 4 Als bijproduct van de productie van ethyleen en propyleen 4% 2

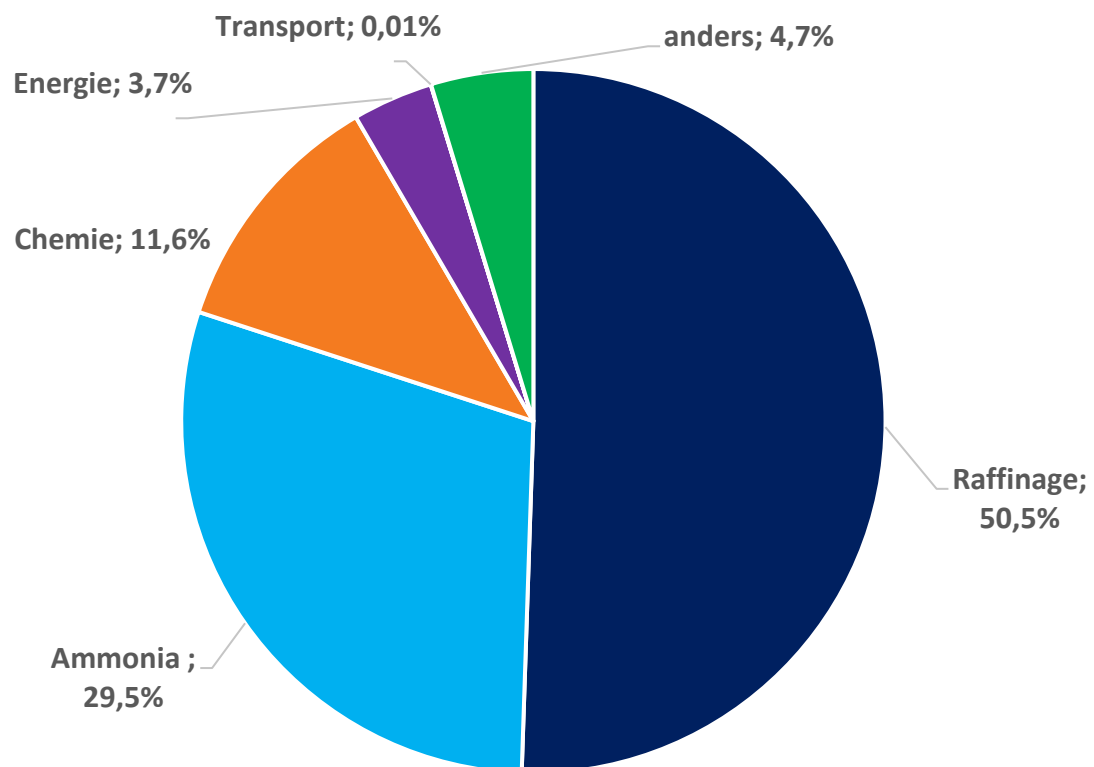
wooclap

100 %

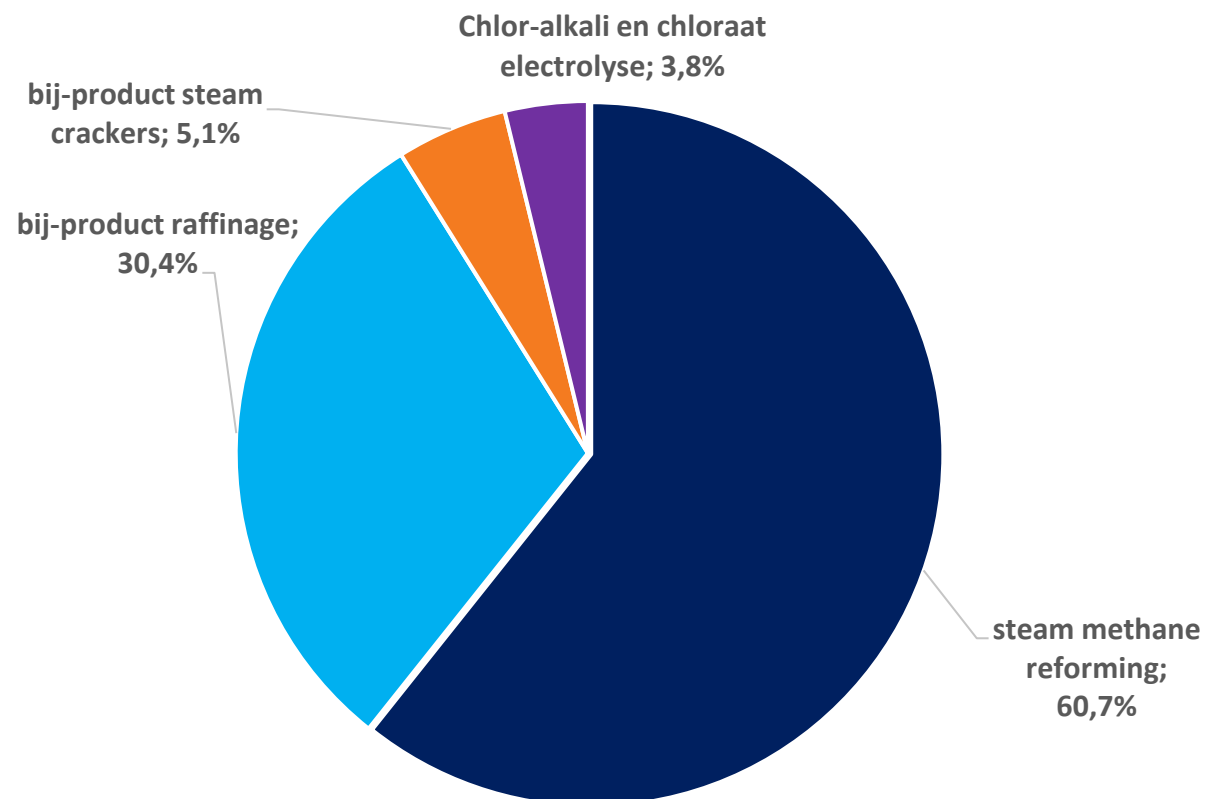
45 / 61

# Waterstof gebruik en herkomst

Waterstof gebruik in the EU27  
ca. 8 miljoen ton in 2020



Waterstof herkomst in the EU27  
ca. 8 miljoen ton in 2020



# Belangrijkste productie proces nu voornamelijk Steam methane reforming (SMR)

Reacties:

- $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$
- $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$

---

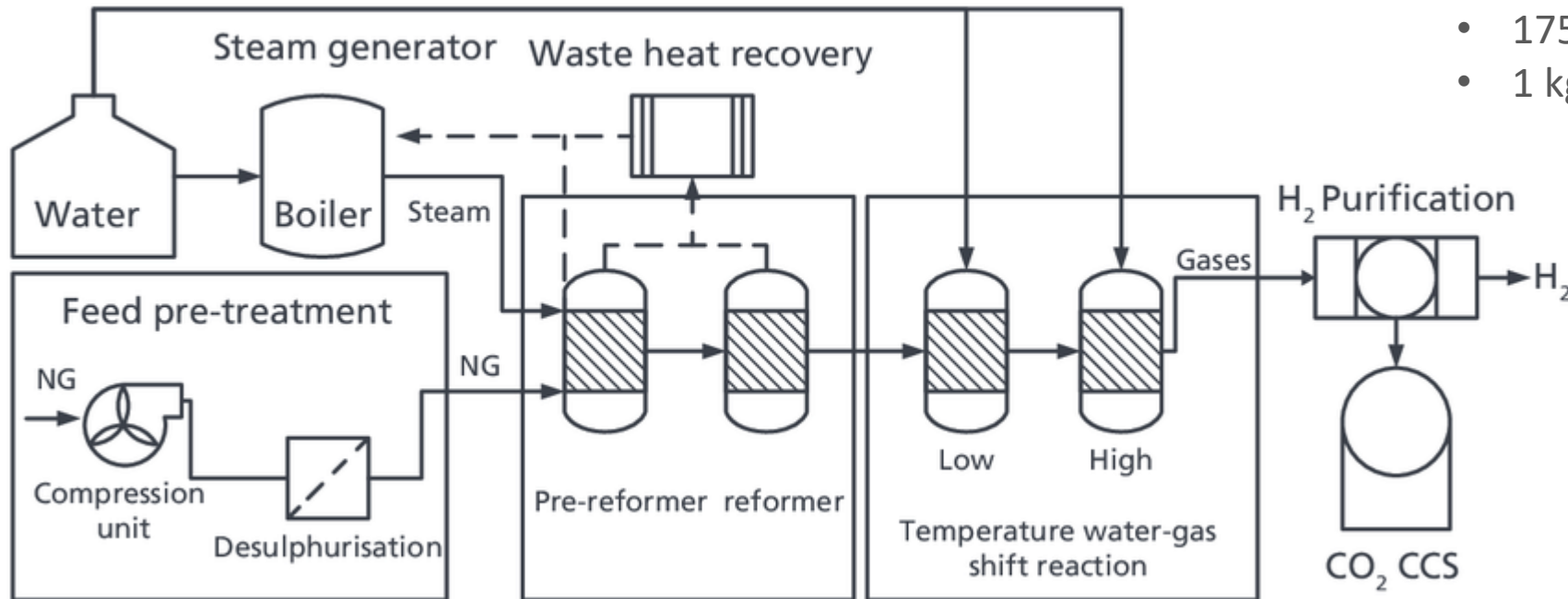
- $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$

Energie verbruik & CO<sub>2</sub> emissie:

- 158 MJ/kg H<sub>2</sub> energie eff. = 76%
- 9,1 – 9.5 kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>

Met CCS

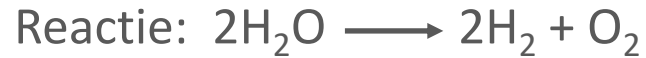
- 175 MJ/kg H<sub>2</sub> energie eff. = 68,5%
- 1 kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>



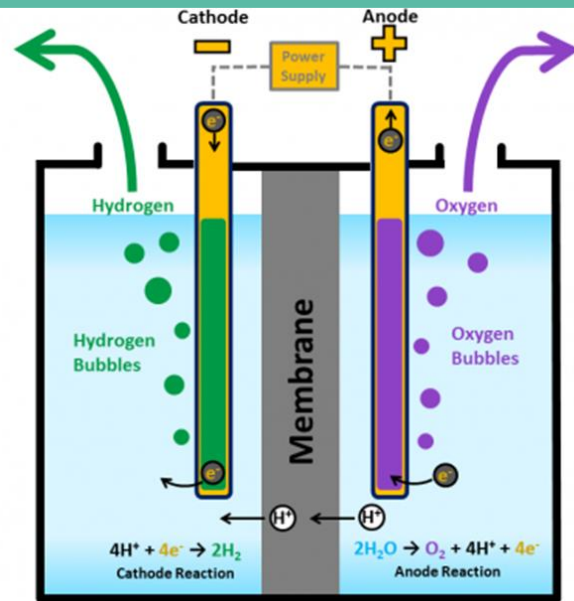
# Waterstof in de toekomst



# Belangrijkste productie proces in de toekomst water elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit

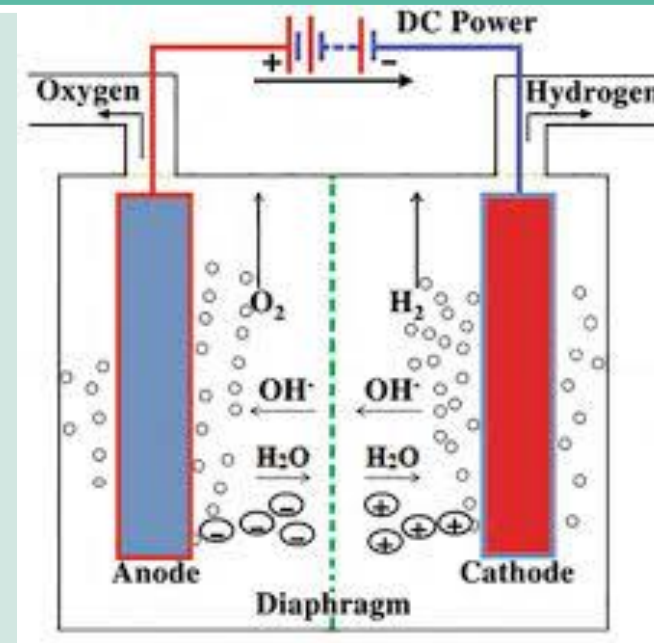


## PEM



Anode:  $2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$   $E^0 = 1.23$  Volt  
 Kathode:  $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \longrightarrow 2\text{H}_2$   $E^0 = 0.00$  Volt  
 Minimum Energie behoefte : 33 kWh/kg  $\text{H}_2$   
 praktisch electrolyzer terminal: 51 kWh/kg  $\text{H}_2$   
 Overall:  $\pm 55 - 65$  kWh/kg  $\text{H}_2$  (afhankelijk van waterkwaliteit en druk)  
 Energie eff.  $\pm 55\%$

## Alkaline



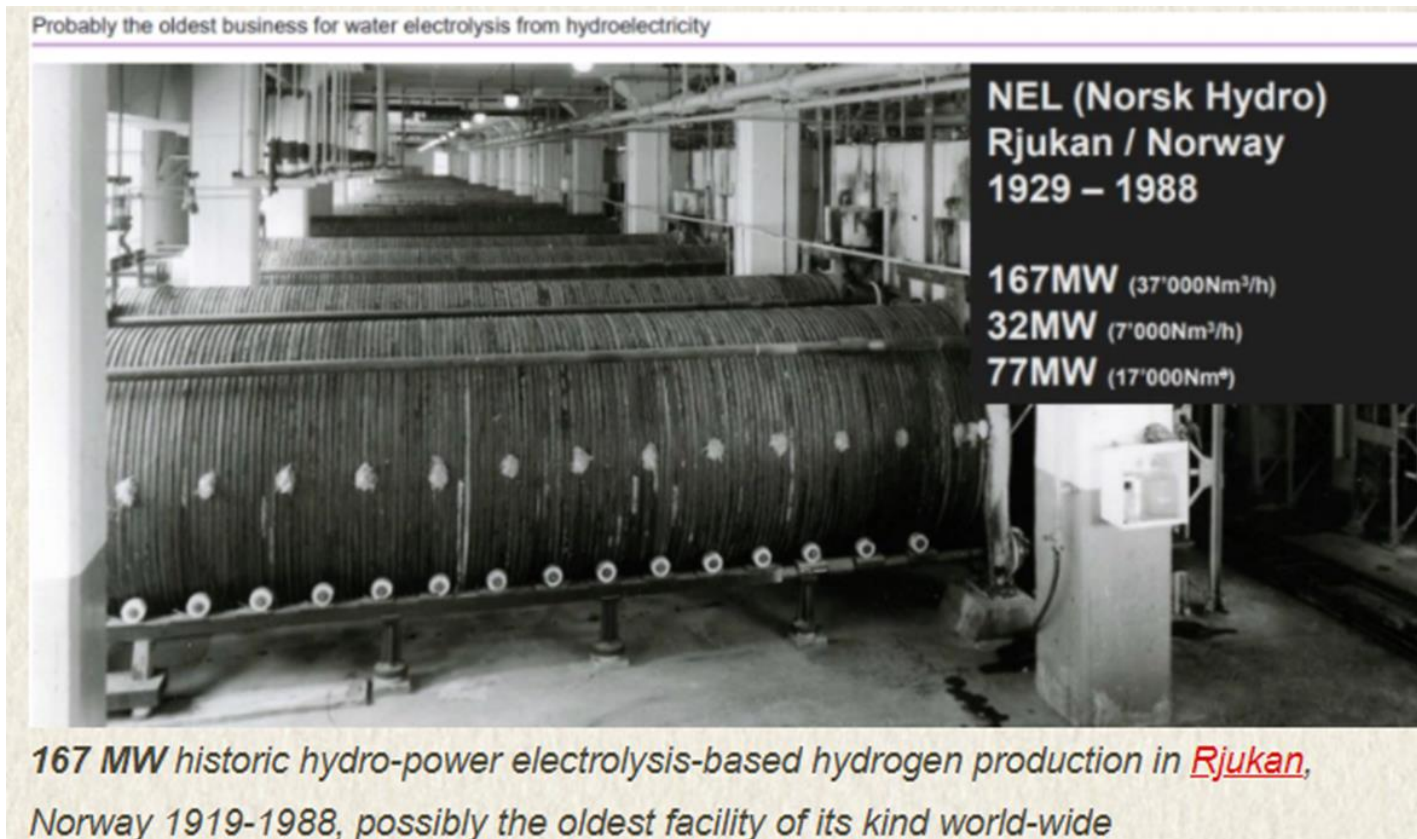
Anode:  $4\text{OH}^- \longrightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$   $E^0 = 0.40$  Volt  
 Kathode:  $4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \longrightarrow 2\text{H}_2 + 4\text{OH}^-$   $E^0 = -0.83$  Volt  
 Minimum Energie behoefte : 33 kWh/kg  $\text{H}_2$   
 praktisch electrolyzer terminal: 46 -50 kWh/kg  $\text{H}_2$   
 Overall:  $\pm 55 - 60$  kWh/kg  $\text{H}_2$  (afhankelijk van waterkwaliteit en druk)  
 Energie eff.  $\pm 57\%$



# Belangrijkste productie proces nu en in de toekomst

In de toekomst water elektrolyse

- Maar in feite is het al heel erg oud
- We doen grote aankondigingen 20 MW is nu de grootste maar.....

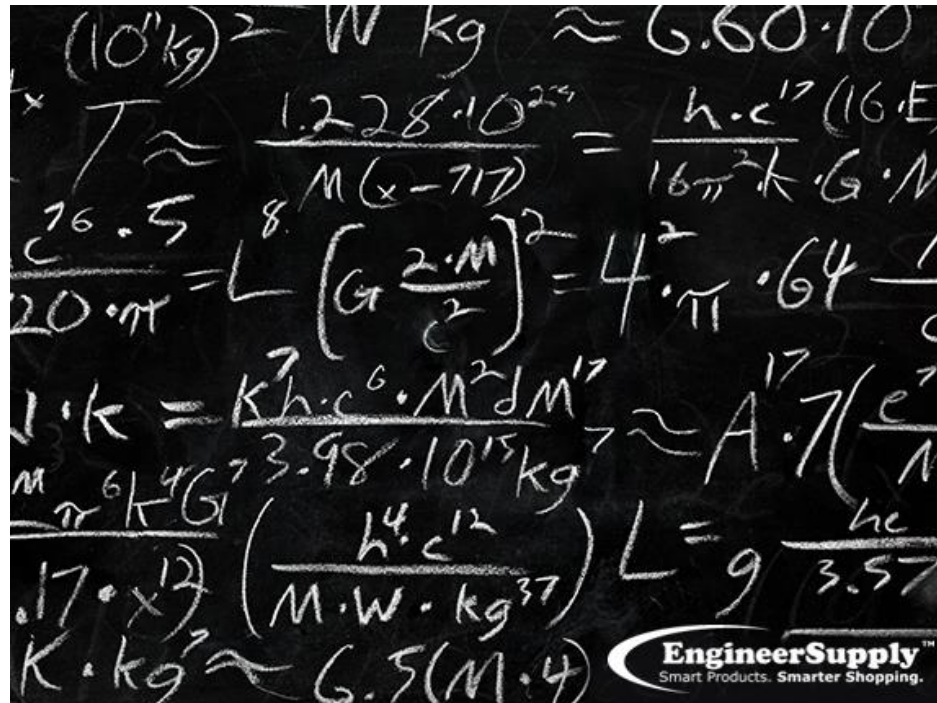


## EU Waterstof ambitie

- In de EU Waterstof Strategie, (Juli 2020)
  - In 2024, 6 GW van hernieuwbare waterstof productie ~ 0.9 miljoen ton/jaar
  - In 2030, 40 GW van hernieuwbare waterstof productie ~ 6 miljoen ton/jaar
- Onlangs ambitie naar boven bijgesteld in EU Repower; reactie op de oorlog in de Oekraïne:
  - In 2030: 10 miljoen ton/jaar hernieuwbare waterstof productie in Europa
  - In 2030: 10 miljoen ton/jaar hernieuwbare waterstof importeren

# En waar gaan we al die Waterstof gebruiken?

- Hoge ambitie??
- Begrijp ik het nog als ingenieur?
- Wat doet een ingenieur?
  - Hij begint te rekenen om te kijken of hij het kan begrijpen.....



Handwritten mathematical equations on a chalkboard, including:

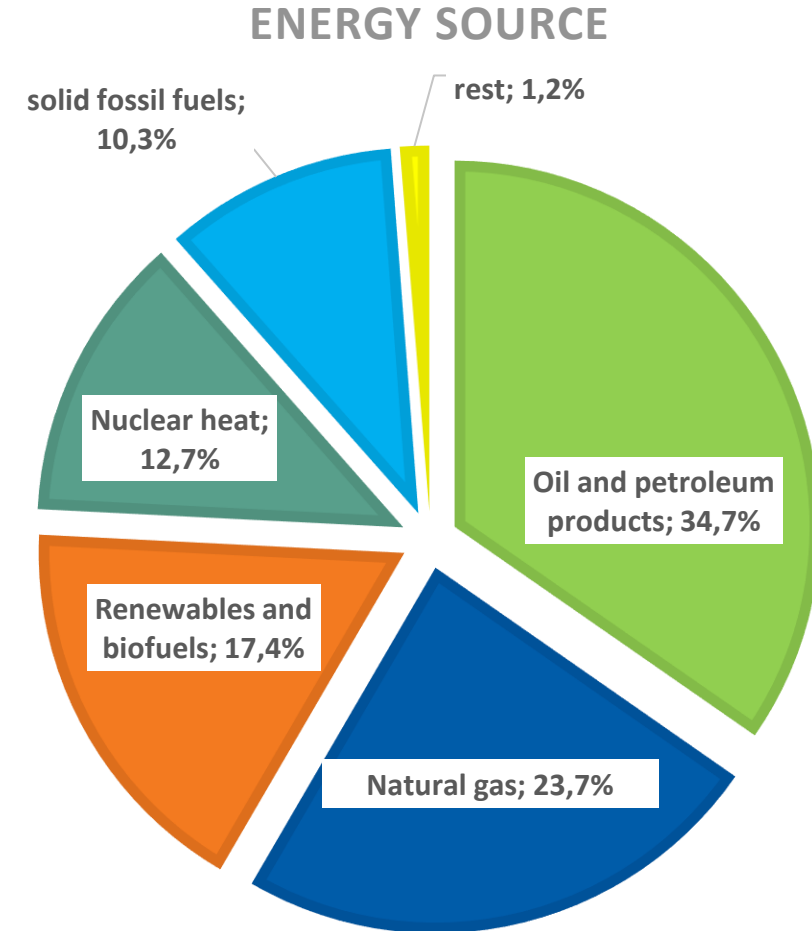
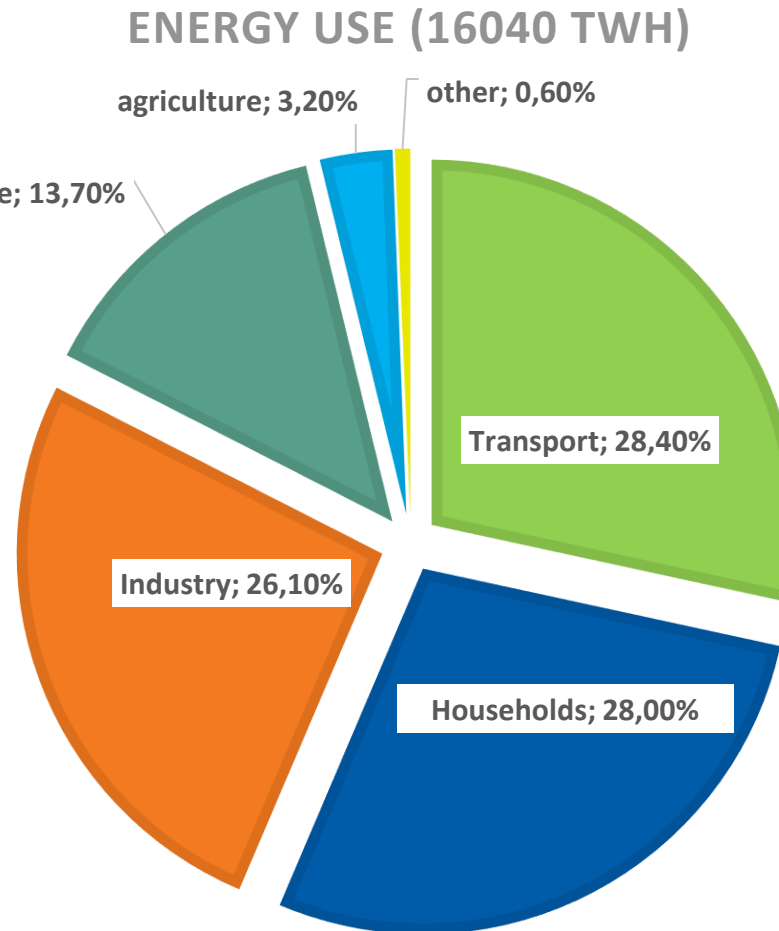
$$(10^4 \text{ kg})^2 \cdot W \cdot \text{kg} \approx 6.50 \cdot 10^{10}$$
$$T \approx \frac{1.228 \cdot 10^{25}}{8 \cdot M(x-717)} = \frac{h \cdot c^{17} (16 \cdot E)}{16 \pi^2 k \cdot G \cdot M}$$
$$\frac{26 \cdot 5}{20 \cdot \pi} = L \left( G \frac{2 \cdot M}{2} \right)^2 = 4 \cdot \pi \cdot 64 \frac{1}{c}$$
$$1 \cdot k = \frac{K^7 h \cdot c^6 \cdot M^2 d M^{17}}{\pi^6 k^4 G^7 3 \cdot 98 \cdot 10^{15} \text{ kg}} \approx A \cdot 7 \left( \frac{e^7}{M} \right)$$
$$\frac{17 \cdot x^{12}}{K \cdot \text{kg}^7} \left( \frac{h^4 \cdot c^{12}}{M \cdot W \cdot \text{kg}^{37}} \right) L = 9 \frac{hc}{3.57}$$
$$K \cdot \text{kg}^7 \approx 6.5 (M \cdot 4)$$

EngineerSupply™  
Smart Products. Smarter Shopping.



# Waar gaan we al die Waterstof gebruiken?

- 1<sup>st</sup> vragen?
  - Waar wordt onze energie gebruikt?
  - Welke energie soorten gebruiken we?
- 2<sup>e</sup> vraag?
  - Kan dit op een efficiënte manier door hernieuwbare waterstof vervangen worden of zijn er betere opties..?
- Zie volgende slides



# Welke rol zou Waterstof kunnen spelen?

- 70% van onze energie komt van fossiele brandstof.
- Dit moet vervangen worden door “koolstof neutrale” energie en het liefst ook nog hernieuwbare bronnen; opties:
  - Reduceren energie verbruik
  - Massaal elektrificeren op basis van hernieuwbare elektriciteit .... Zon en Wind
    - Directe elektrificatie
    - Het maken van waterstof uit water en elektriciteit als energie bron of als bouwsteen samen met CO<sub>2</sub> voor kunstmatige brandstoffen (E-fuels)
  - Biomassa;
    - ruim onvoldoende voor energie behoefte en problematisch voor biodiversiteit;
  - Meer nucleaire energie;

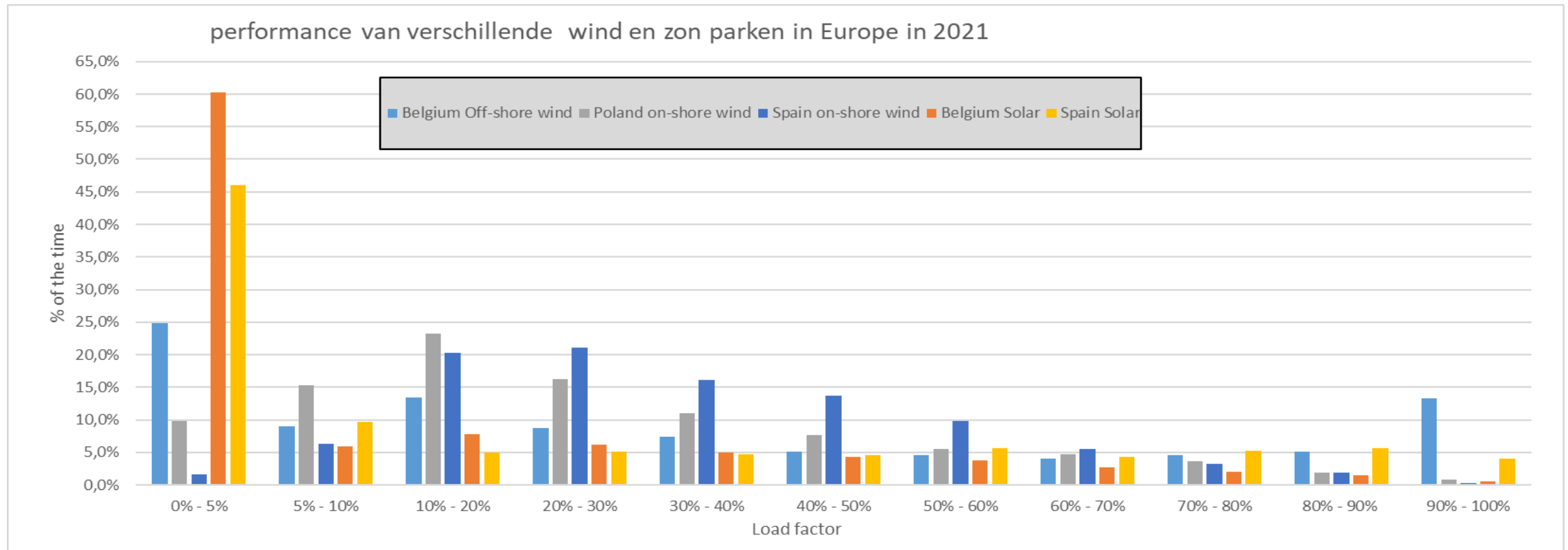
# Welke rol zou Waterstof kunnen spelen?

- Fossiel brandstof levert vandaag 11200 TWh aan energie
- Zonder efficiëntie maatregelen betekent dit:
  - 11200 TWh extra aan zon en wind als we 100% hernieuwbaar zouden willen elektrificeren (963 miljoen ton olie equivalenten)
    - In 2021 is 564 TWh aan wind en zon opgewekt
    - In 2021 is 720 TWh aan elektriciteit opgewekt met nucleaire energie
    - In 2021 is  $\pm 2400$  TWh aan fossiel gebruikt om elektriciteit te maken gemiddeld rendement  $\pm 45\%$  als dit vervangen wordt door wind/zon is er een energiebesparing van 1300 TWh
    - Nog nodig: 9900 TWh (11200-1300) komt overeen met:
      - Offshore Windturbines van 12 MW: 290.000 stuks; benodigd oppervlak ca. 340.000 km<sup>2</sup> oftewel 8 maal Nederland
      - Zonnecellen 60.000 km<sup>2</sup> oftewel 1.6 maal Nederland
- Indien dit van waterstof moet komen hebben we 300 miljoen ton nodig
  - En dus nog veel meer hernieuwbare of koolstof vrije elektriciteit: 18000 TWh

# Welke rol zou Waterstof kunnen spelen?

## Opslag van elektriciteit

- Grootse nadeel van wind en zon elektriciteit is het zeer variabele productie patroon
- Vele dagen zonder wind en/zon vergt grote “opslag capaciteit”



# Waterstof als energie opslag





# Welke rol zou Waterstof kunnen spelen?

## Opslag van elektriciteit

- Te vervangen energie verbruik 9900 TWh dat is orde 27 TWh/dag
- 1 dag opslag wat betekent dat?:
  - In batterijen
    - Een elektrische auto heeft 50 – 100 kWh aan capaciteit; Er zijn 240 miljoen passagiers auto's in Europa
    - Dat levert aan capaciteit orde 12 - 24 TWh bij 100% gebruik; 25% (??) bruikbaar
    - Dus het kan zeker bijdragen maar is zeker niet voldoende
  - Pumped hydro
    - Nagenoeg geen capaciteit meer beschikbaar
  - Waterstof
    - Om uit waterstof elektriciteit te maken ongeveer 50% efficiëntie; 17 kWh/kg H<sub>2</sub>
    - Dan is ca. nodig opslag van 1,6 miljoen ton
    - ervaring met H<sub>2</sub> opslag in zout cavernes ca. 8000 ton per caverne (van 240 – 60 bar): 200 cavernes voor 1 dag
      - Gasopslag in Europa is ca. 1074 TWh = 45 dagen energieverbruik
    - Haalbaar maar groot energie verlies: 1 kg H<sub>2</sub> maken kost 60 kWh en je krijgt 17 kWh terug = 28% rendement

# Waterstof in transport



# Vraagje over efficiëntie in transport

Ga naar **wooclap.com** en gebruik de code **ZZYTRL**

Energie efficiëntie in transport; wat is de beste oplossing?



1 Benzine en diesel leveren de beste efficiëntie 20% 9

2 Waterstof geeft de beste efficiëntie 4% 2

3 waterstof en elektrisch zijn beide even efficiënt 20% 9

4 Elektrisch heeft de hoogste efficiëntie en waterstof de slechtste 56% 25

wooclap

🔒 🔍 100% 🔍

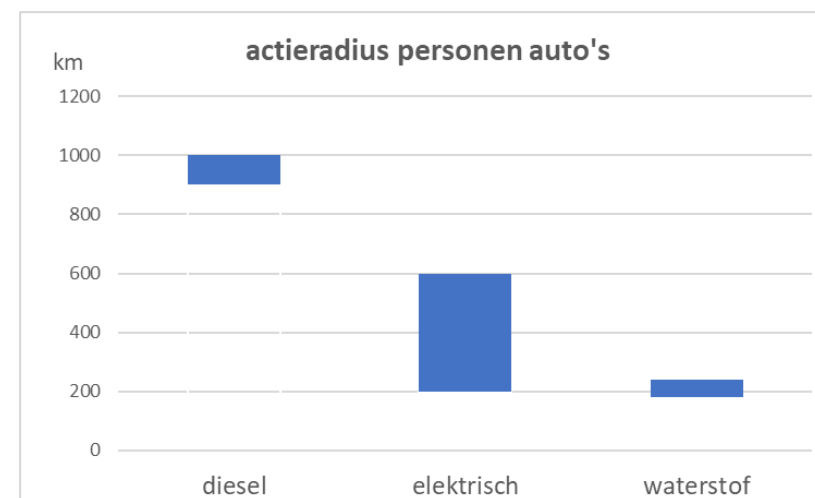
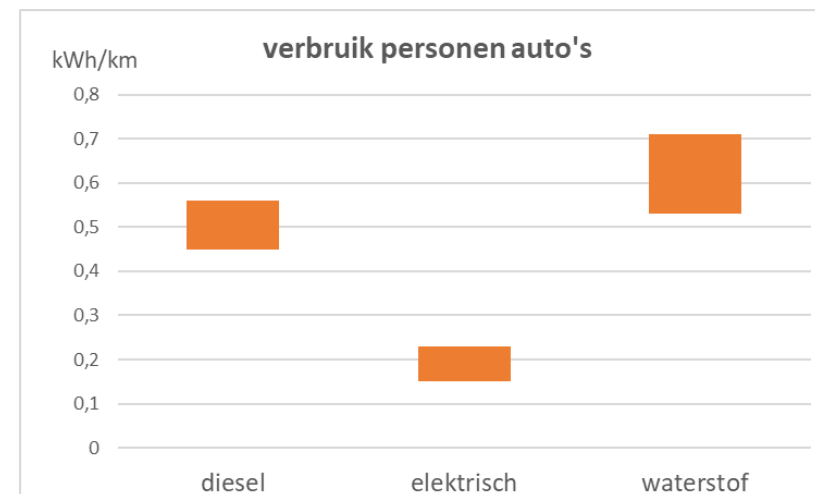
45 / 61 👤

i



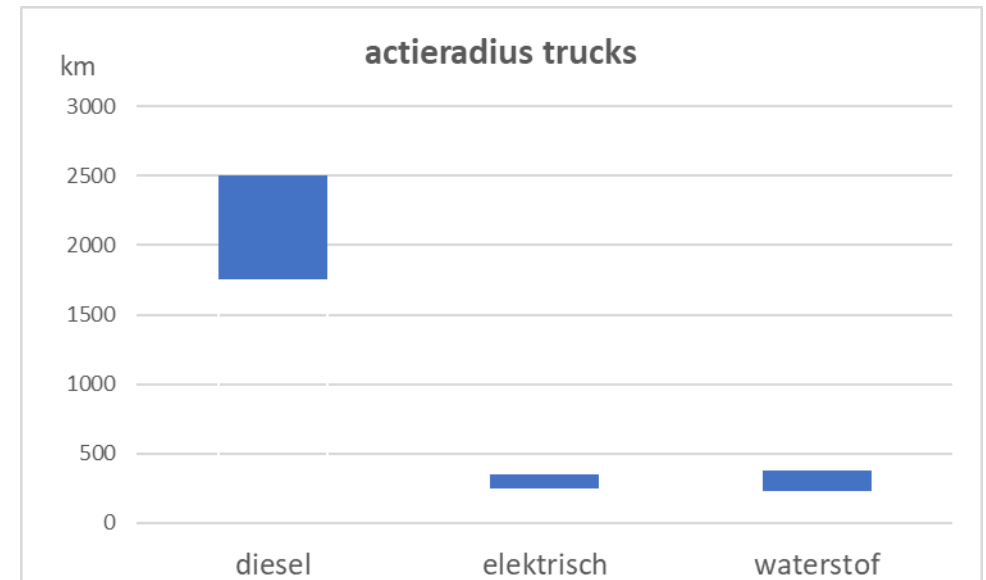
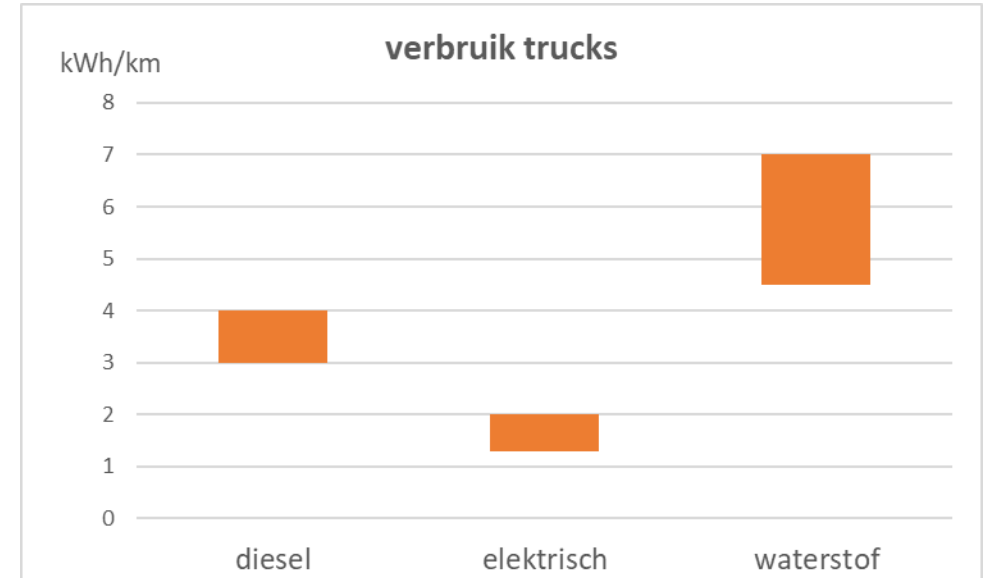
# Waterstof in de transport sector

- Ca. 28% van het energieverbruik vindt plaats in de transport sector.
  - Ca. 16% van het energieverbruik vindt plaats door personen auto's
- Energieverbruik van personen auto's per brandstof soort
  - Diesel auto ca. 1 op 18 tot 1 op 20: 0,50 - 0,56 kWh/km
  - Elektrisch 0,15 – 0,23 kWh/km
  - H<sub>2</sub>: 85 tot 115 km per kg: 0,52 – 0,71 kWh/km
- Actieradius
  - Diesel 50 liter tank: 900 – 1000 km
  - Elektrisch 45-100 kWh: 200 – 600 km
  - Waterstof tank 50 liter 700 bar: 180 – 240 km
- Vanuit efficiëntie is elektrisch de beste optie
  - Actieradius blijft een zwak punt maar H<sub>2</sub> geeft geen verbetering
  - Opladen/tanken voor H<sub>2</sub> wel sneller maar geen infrastructuur



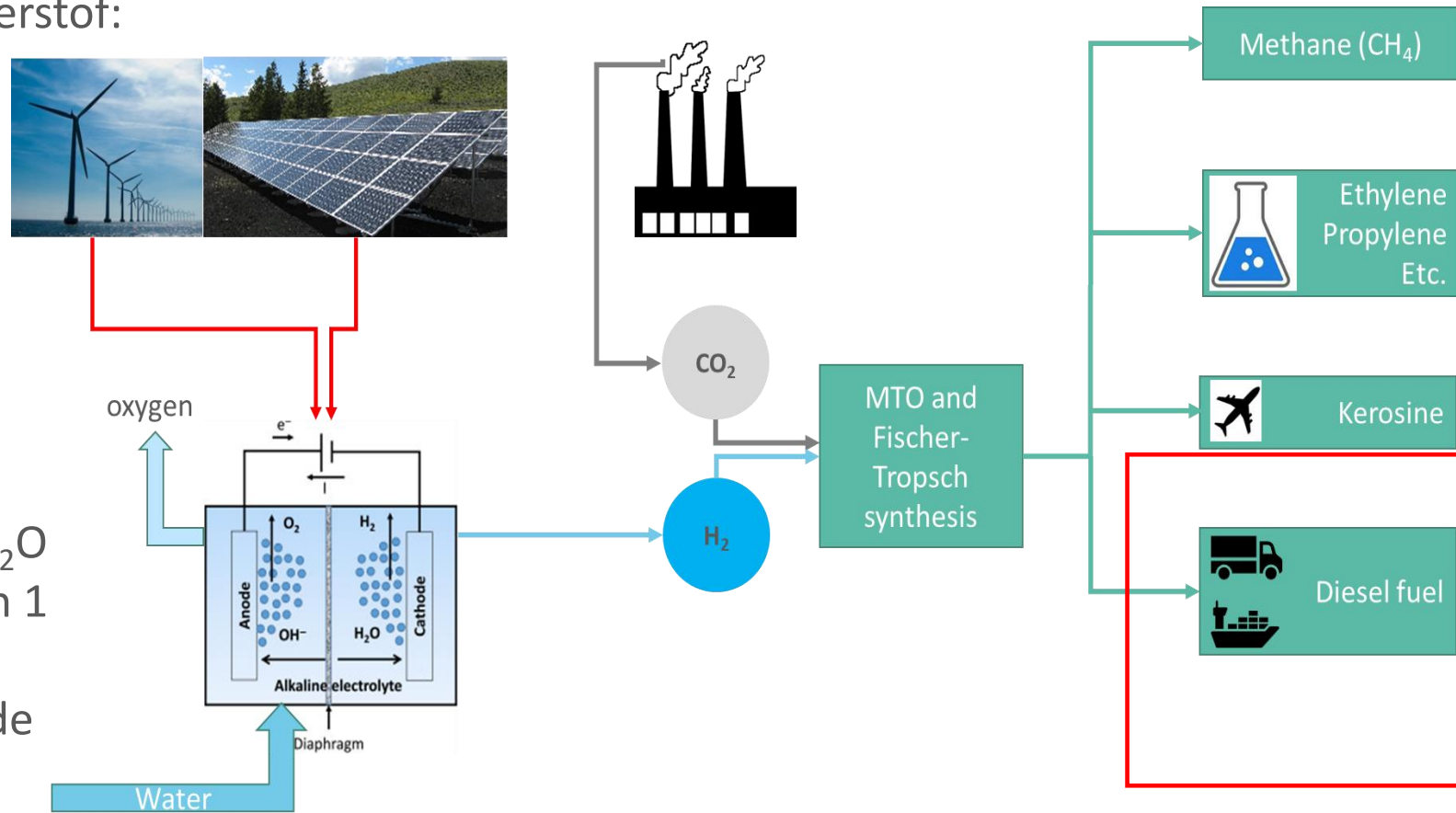
# Waterstof in de transport sector vrachtverkeer

- Energieverbruik van vrachtverkeer per brandstof soort
  - Diesel ca. 1 op 2,5 tot 3.5: 3 – 4 kWh/km
  - Elektrisch 1,3 – 2 kWh/km
  - H<sub>2</sub>: 8 – 13 km per kg: 4,5 – 7 kWh/km
- Actieradius
  - Diesel 700 liter tank: 1750 - 2500 km
  - Elektrisch kWh: 250 – 350 km
  - Waterstof tank 700 liter 700 bar: 230 – 380 km
- Vanuit efficiëntie is elektrisch de beste optie
  - Actieradius blijft een zwak punt maar H<sub>2</sub> geeft geen verbetering
  - Opladen/tanken voor H<sub>2</sub> wel sneller maar geen infrastructuur



# Waterstof in de transport sector andere opties

- Het probleem van elektrificatie/waterstof:
  - laadtijden
  - actieradius
- Probleem wordt groter voor
  - vliegverkeer
  - scheepvaart
- Alternatief: E-brandstoffen:
  - $3\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 3\text{H}_2 + 1.5\text{O}_2$
  - $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \longrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$
  - $n\text{CO} + (2n+1)\text{H}_2 \longrightarrow \text{C}_n\text{H}_{(2n+2)} + n\text{H}_2\text{O}$
- Energie behoefte voor productie van 1 liter E-diesel is ca. 25 kWh
- Dit is 2,5 keer de verbrandingswaarde van diesel



**NIET efficiënt maar soms de enige oplossing**

# Waterstof in de transport sector een inschatting

- Aannames:
  - Personen auto's 100% elektrisch
  - Ander transport 60% elektrisch, 20% op waterstof en 20% op E-fuels
- 28% van energie verbruik was in de transportsector (16% voor personen auto's)
  - Personen auto's: 2566 TWh
  - Rest: 1925 TWh
- Efficiëntie veranderingen:
  - Personen auto's van 0,51 kWh/km naar 0,19 kWh/km; energieverbruik 37% van huidig
  - Ander transport:
    - 60%: energie verbruik 47% van huidig
    - 20%: energieverbruik 165% van huidig
    - 20%: energieverbruik 250% van huidig
- Totaal resultaat nieuw energieverbruik 3100 TWh oftewel overall  $\pm 30\%$  energie besparing
- Aan waterstof ca. 18 miljoen ton

Waterstof als  
warmtebron

**H<sub>2</sub>**  
**HYDROGEN**

The image shows three large, vertical, cylindrical storage tanks made of highly reflective metal, likely stainless steel. They are arranged in a row, with the central one being the most prominent. Each tank has a metal walkway with railings at the top. The central tank is labeled with a large blue 'H<sub>2</sub>' and the word 'HYDROGEN' in blue capital letters below it. The background is a clear blue sky with some light clouds. In the bottom left corner, there are some green leaves of a tree or bush.



# Vraagje over efficiëntie in verwarmingsdoeleinden

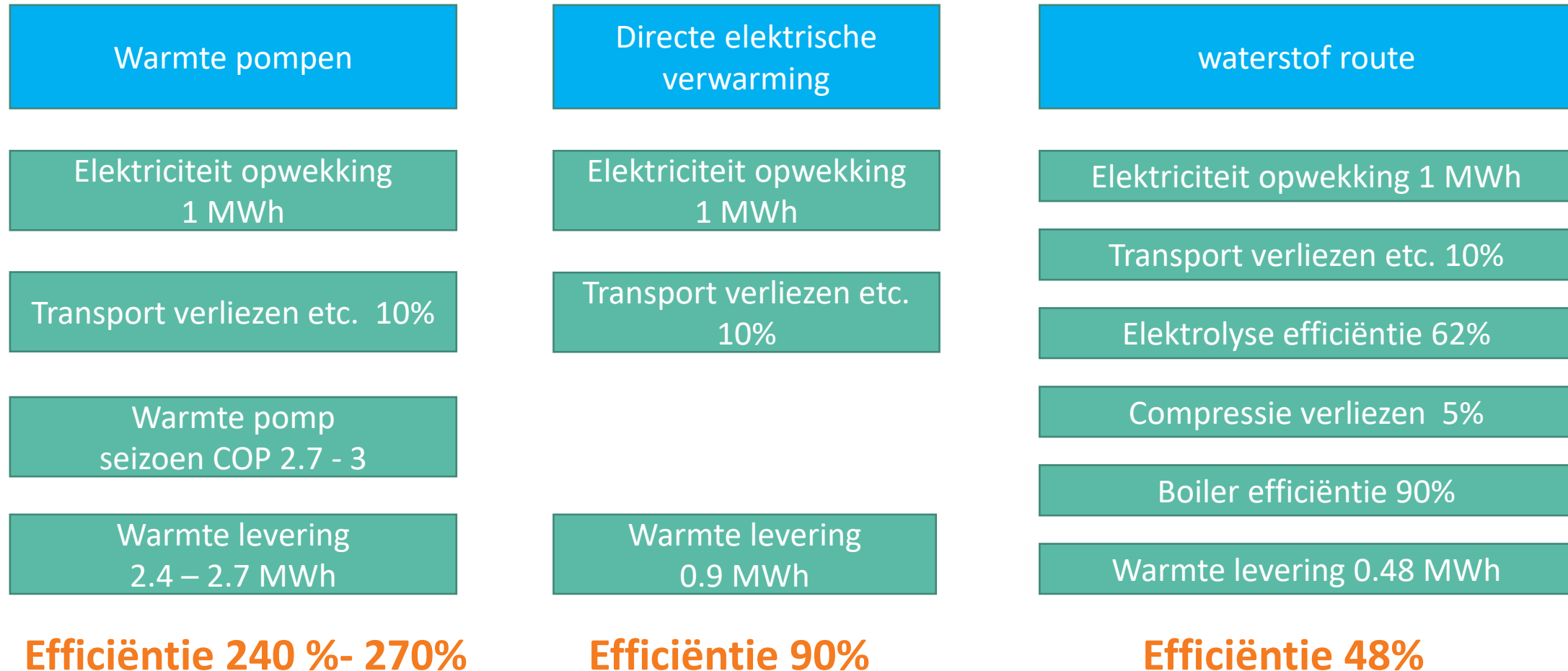


# Waterstof als brandstof voor verwarming doeleinden

- Veel energie is nodig voor verwarmingen doeleinden
  - Huishoudens/services relatief laagwaardige warmte behoefte (<80 C)
  - Industrie warmte behoefte in de range van 100 C tot zeer hoge temperaturen
- Welke rol zou waterstof kunnen spelen en zijn er betere alternatieven beschikbaar?

# Waterstof voor verwarmingsdoeleinden laagwaardige warmte voor huishoudelijk gebruik

- Efficiëntie van de opties



# Waterstof voor verwarming hoogwaardige warmte voor industrieel gebruik

- Verschillende opties maar sterk afhankelijk van omstandigheden
  - Warmtepompen (blijft lage temperatuur en afhankelijk van rest warmte temperatuur)
  - Mechanical Vapour recompression
  
  - Elektrische stoom boilers
    - Nu beschikbaar tot ca. 85 bar
  - In ontwikkeling elektrische fornuizen orde 800 - 900 C
  
  - Waterstof als brandstof
    - Kan resulteren in NO<sub>x</sub> problemen

**Waterstof zou zo veel mogelijk vermeden moeten worden voor warmte toepassingen; behalve in die gevallen waar het echt niet anders kan.**

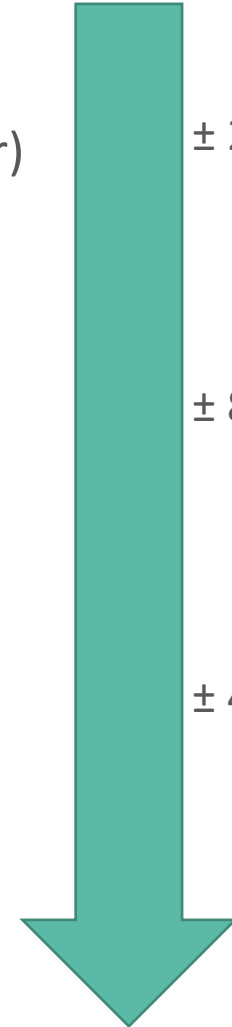
**Grove schatting 10% van industriële warmte behoefte orde 8 miljoen ton H<sub>2</sub>/jaar**

Energie efficiëntie

± 240% - 270 %

± 85% - 90%

± 40% - 50%

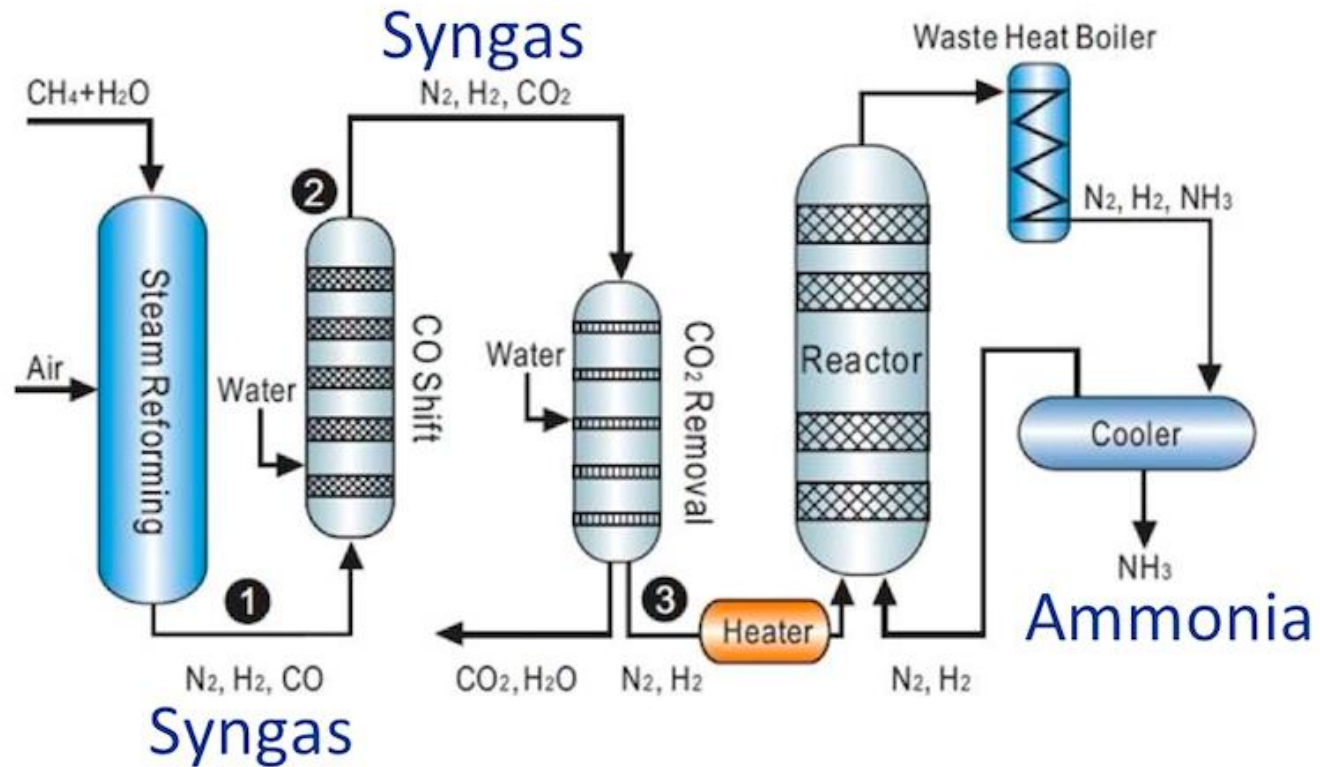


# Waterstof in de chemie



# Waterstof voor andere toepassingen ammonia bestaande proces

- De grootste chemische toepassing is nu ammonia (2,5 miljoen ton H<sub>2</sub>/jaar)

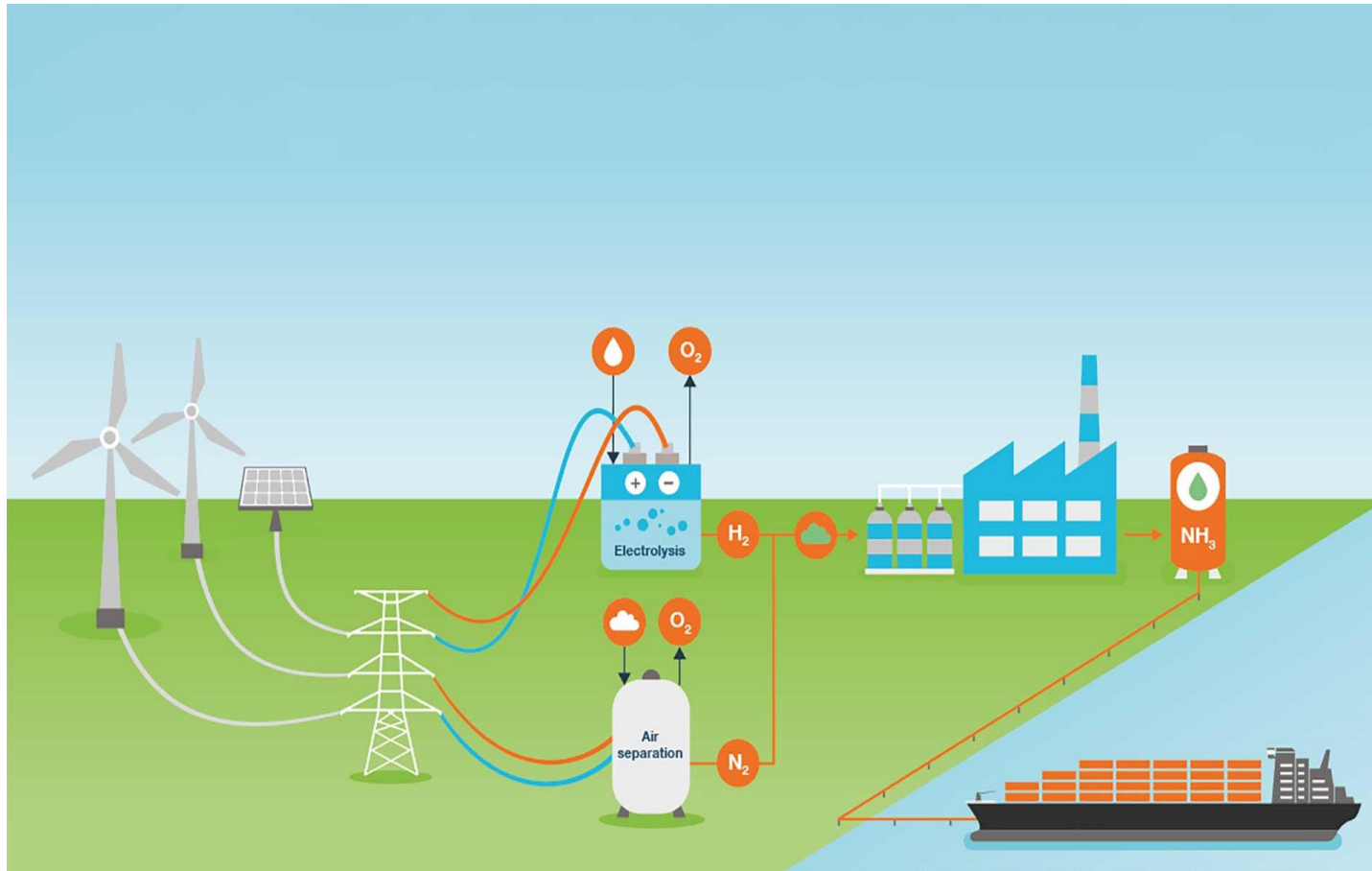


Energie behoeften:

- CH<sub>4</sub> als grondstof 5,8 MWh/ton NH<sub>3</sub>
- CH<sub>4</sub> als energie 3,0 MWh/ton NH<sub>3</sub>
- Rest energie 0,9 MWh/ton NH<sub>3</sub>
- Totaal 9,7 MWh/ton NH<sub>3</sub>
- CO<sub>2</sub> emissie 1,75 ton/ton NH<sub>3</sub>
- Jaarlijkse energie behoefte: 137 TWh

# Waterstof voor andere toepassingen ammonia nieuw proces

- De grootste chemische toepassing is nu ammonia (2,5 miljoen ton H<sub>2</sub>/jaar)



Energie behoefte:

- H<sub>2</sub> van water elektrolyse 10,7 MWh/ton NH<sub>3</sub>
- N<sub>2</sub> uit lucht scheiding 0,3 MWh/ton NH<sub>3</sub>
- Rest energie 1,4 MWh/ton NH<sub>3</sub>
- Totaal 12,4 MWh/ton NH<sub>3</sub>
- Jaarlijkse energie behoefte: 175 TWh

Hernieuwbare waterstof resulteert in een efficiëntie verlaging: 28% meer energie nodig

Maar geen keus als we koolstof neutraal willen worden

# Waterstof voor andere toepassingen

## Bestaande processen en de chemie

Processen die nu ook al waterstof gebruiken:

- Aniline
  - polyurethanen, medicijnen, rubber, gewasbescherming, pigmenten
- Methanol
  - hout producten, auto onderdelen, pigmenten, oplosmiddel, medicijnen, oplosmiddelen
- Waterstofperoxide
  - Papier, textiel, propyleen oxide, afvalverwerking
- Methaan sulfonzuur
  - Elektronica
- Zoutzuur
  - waterbehandeling, staal bewerking, voedingsmiddelen, latex,....)
- Orde 1 miljoen ton H<sub>2</sub>/jaar



# Waterstof voor andere toepassingen een nieuwe toepassing: staal

BLAST FURNACE ROUTE

HYBRIT ROUTE

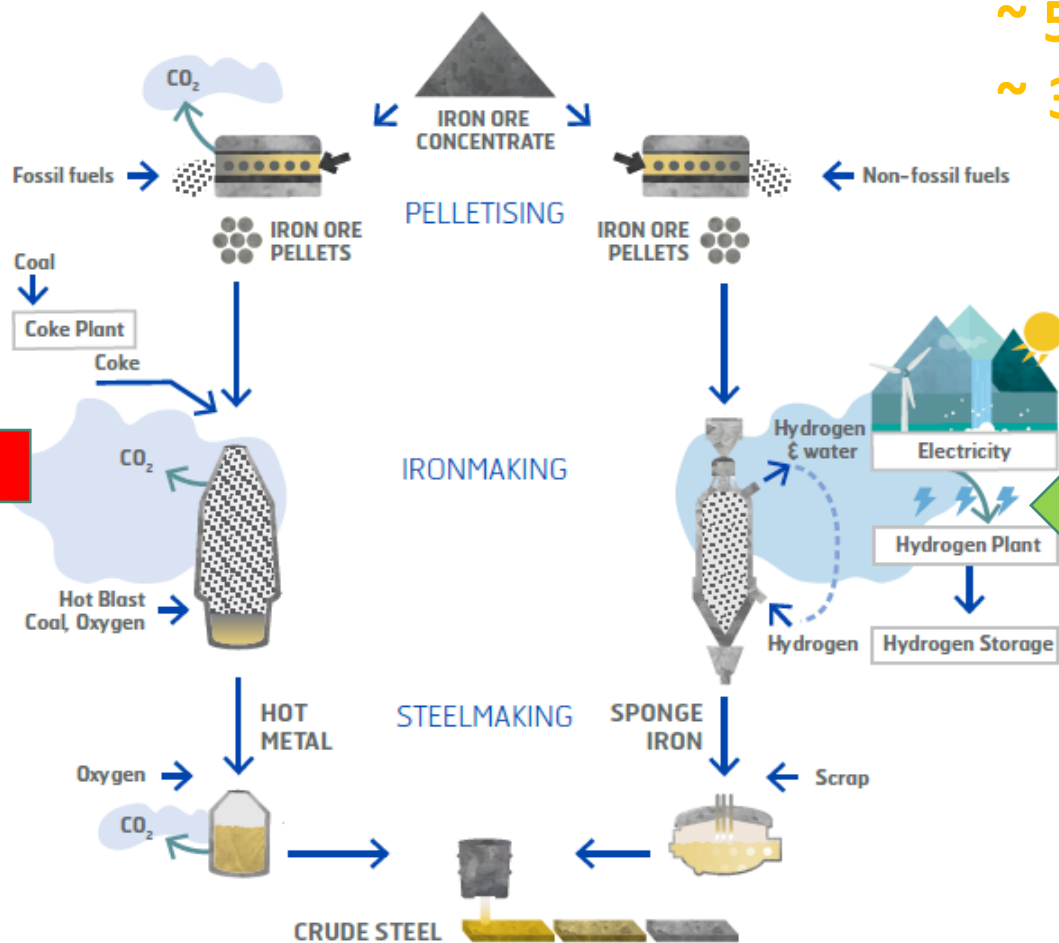
EU staal productie van erts ~ 100 miljoen ton/jaar:

~ 5 miljoen ton of waterstof

~ 300 TWh hernieuwbare elektriciteit

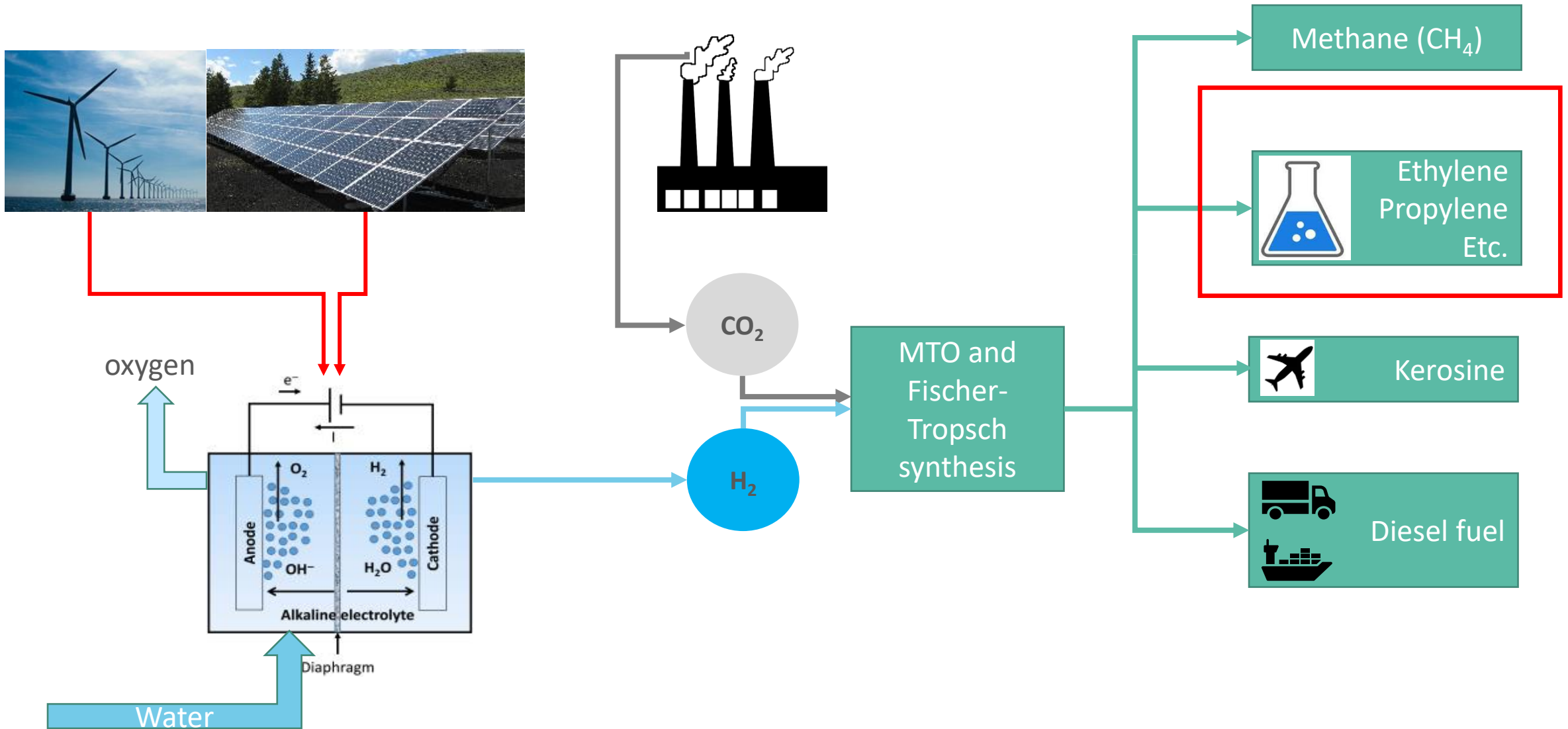
~ 1.8 ton CO<sub>2</sub>/ton staal

~ 50 kg H<sub>2</sub> /ton staal



# Waterstof voor andere toepassingen

## nieuwe toepassing: productie van ethyleen en propyleen

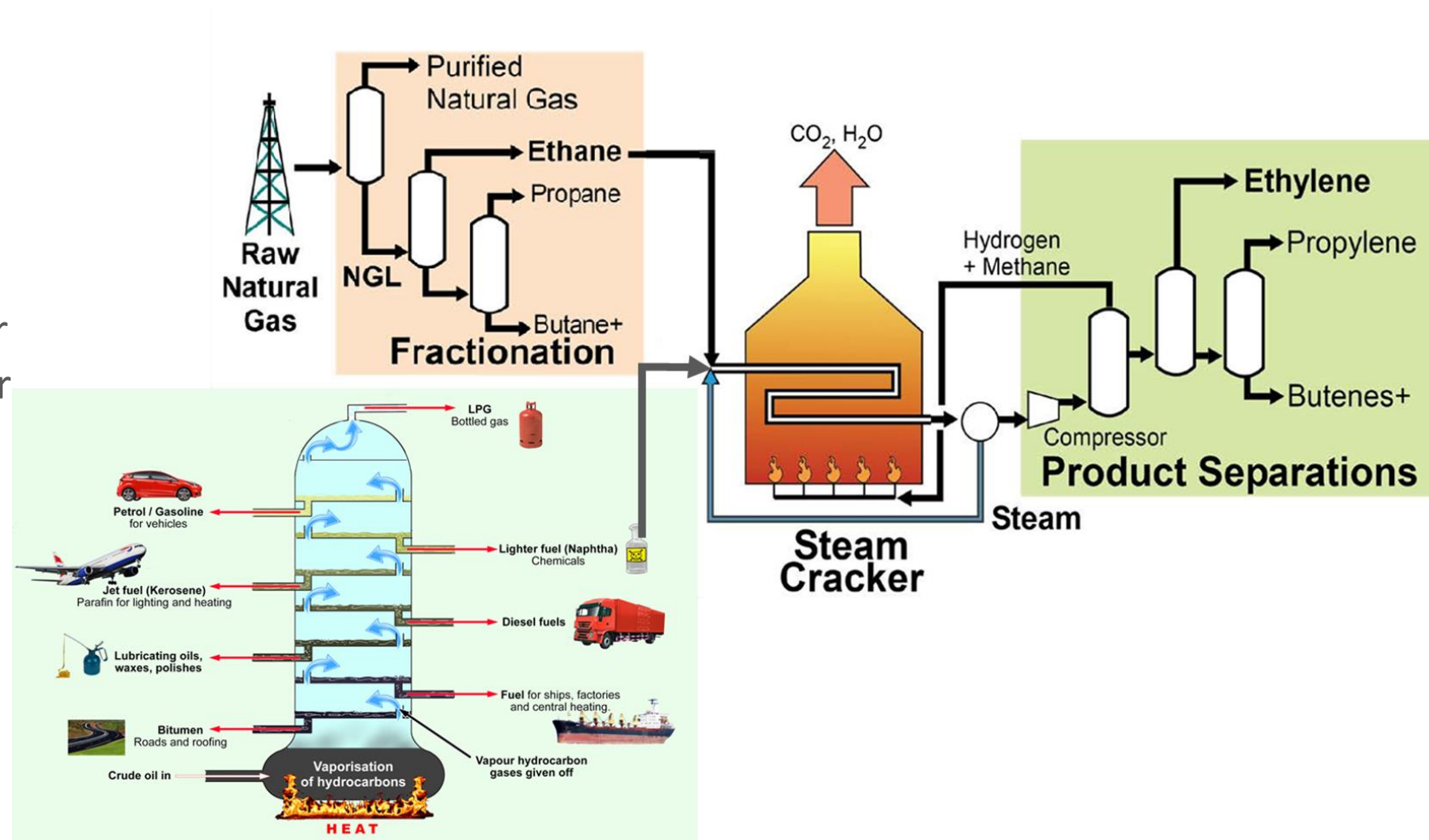


# Waterstof voor andere toepassingen

## nieuwe toepassing: productie van ethyleen en propyleen

### Huidige bronnen:

- Ethaan uit gas/shale gas
- Nafta uit aardolie
- Productie:
  - Ethyleen 22 miljoen ton/jaar
  - Propeen 17 miljoen ton/jaar
- Energie verbruik 16 MWh/ton

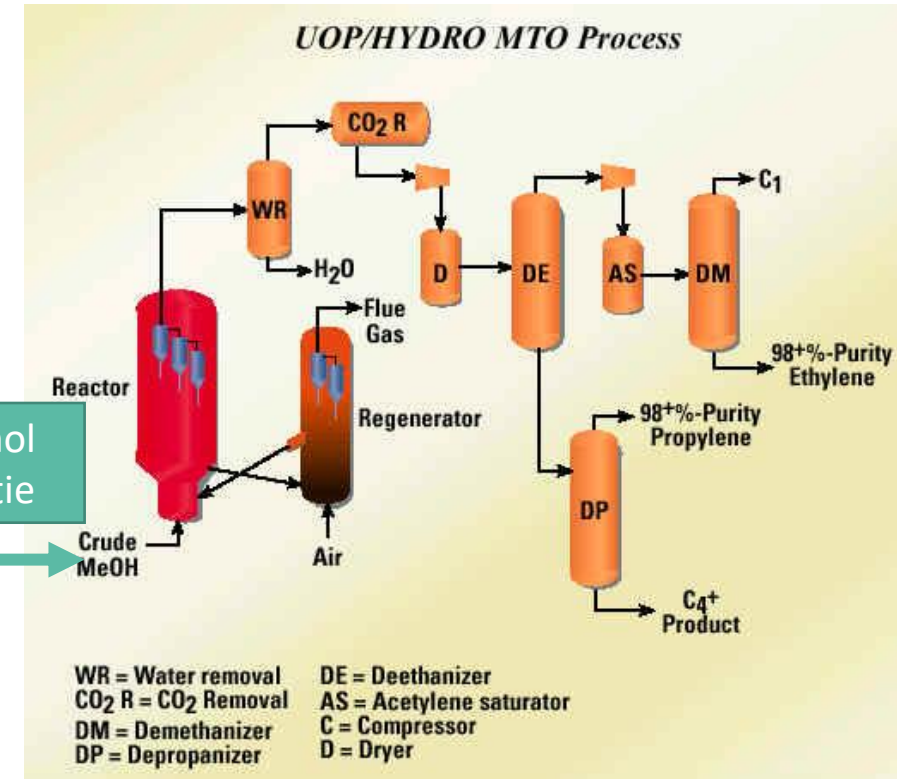
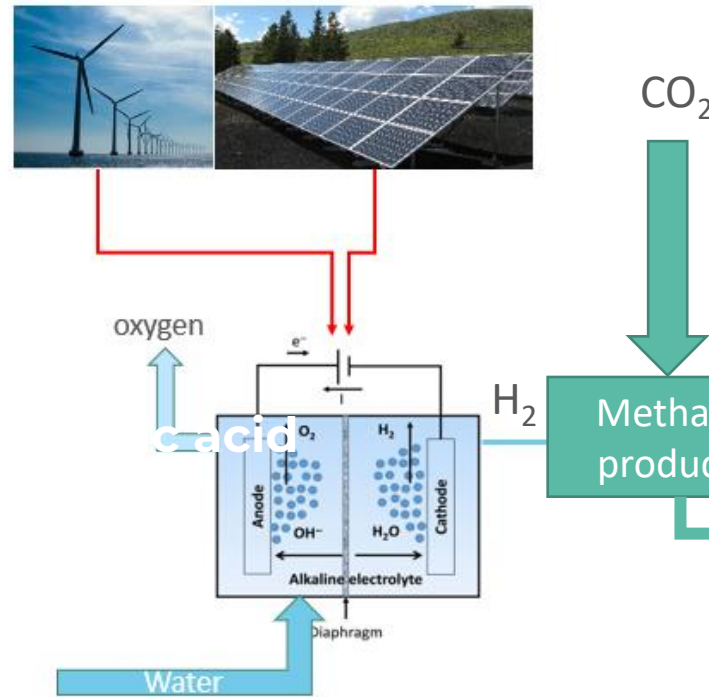


# Waterstof voor andere toepassingen

## nieuwe toepassing: productie van ethyleen en propyleen

Nieuw:

- H<sub>2</sub> uit water elektrolyse
- $6\text{H}_2 + 2\text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CH}_3\text{OH} + 2\text{H}_2\text{O}$
- $2\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CH}_3\text{OCH}_3 + \text{H}_2\text{O}$
- $\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2\text{O}$
- $3\text{CH}_3\text{OCH}_3 \rightarrow 2\text{C}_3\text{H}_6 + 3\text{H}_2\text{O}$
- Energie verbruik 27 MWh/ton
- **Energieverbruik stijgt met 70%**
- **Alternatief is biomassa, dat is waarschijnlijk efficiënter en kan beter voor dit soort toepassingen gebruikt worden dan als energie toepassing**



Inschatting van  
behoefte

**HYDROGEN**



# Waterstof een inschatting aan behoefte

- In de meeste gevallen is waterstof de minst energetisch efficiënte oplossing
- De alternatieven leveren zelfs vaak een lagere energie verbruik op dan de huidige fossiele toepassingen
- Een vaak gebruikt argument is dat efficiëntie niet uitmaakt omdat wind en zon toch gratis zijn.....
- Dit is natuurlijk ONZIN:
  - Windturbines en zonnepanelen vragen investeringen en onderhoud en veroorzaken ook “schade” en ruimte is ook niet ongelimiteerd aanwezig.
- Maar er is zeker in bepaalde toepassingen ruimte voor hernieuwbare waterstof
- En dan is er nog de vraag zelf maken of aanvoeren uit regio's met zeer veel en goedkope wind en zon

# Waterstof een inschatting van behoefte

- Dus een echte inschatting is lastig
- Een orde op basis van vorige slides:
  - Energie opslag om geen/lage wind zon productie op te vangen ?? miljoen ton
  - In transport toepassingen 18 miljoen ton
  - Verwarmingstoepassingen in de industrie 8 miljoen ton
  - Bestaande chemie 1 miljoen ton
  - Bestaand ammonia 3 miljoen ton
  - Nieuw staal 5 miljoen ton
  - Gebruik in raffinaderijen (gaat verdwijnen?) 0 miljoen ton
  - Totaal > 35 miljoen ton
- EU ambitie al 20 miljoen ton H<sub>2</sub> in 2030



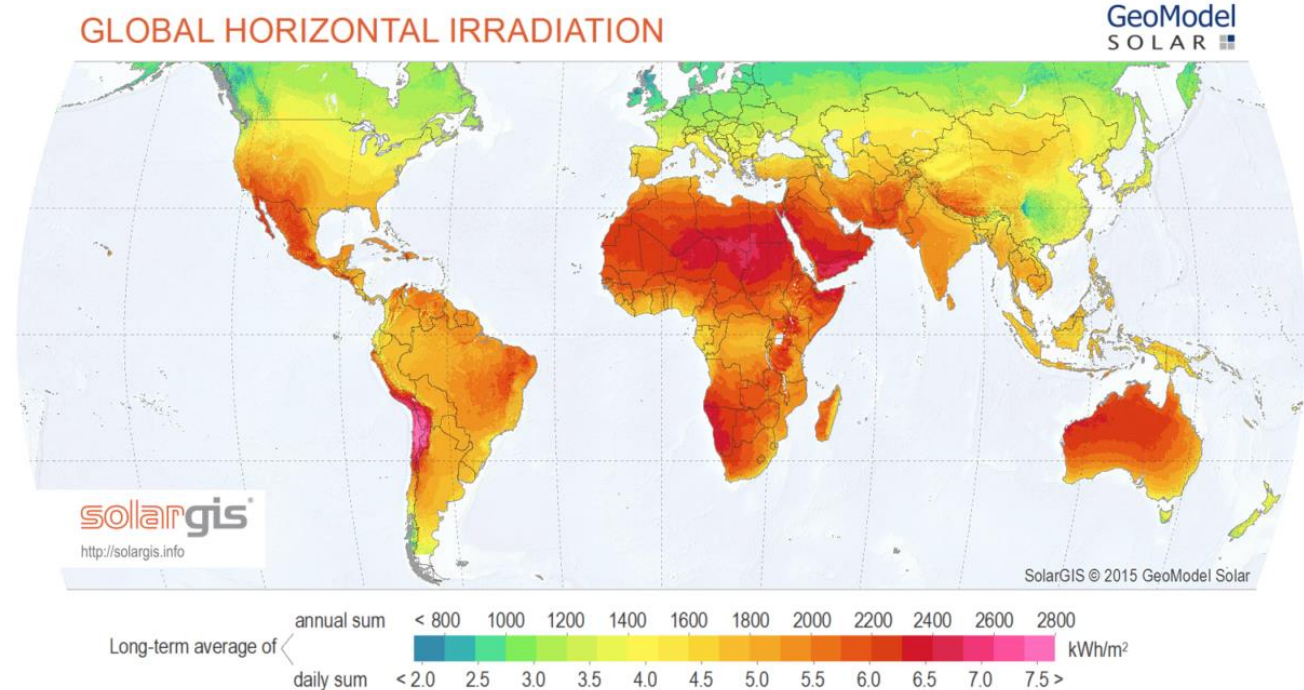
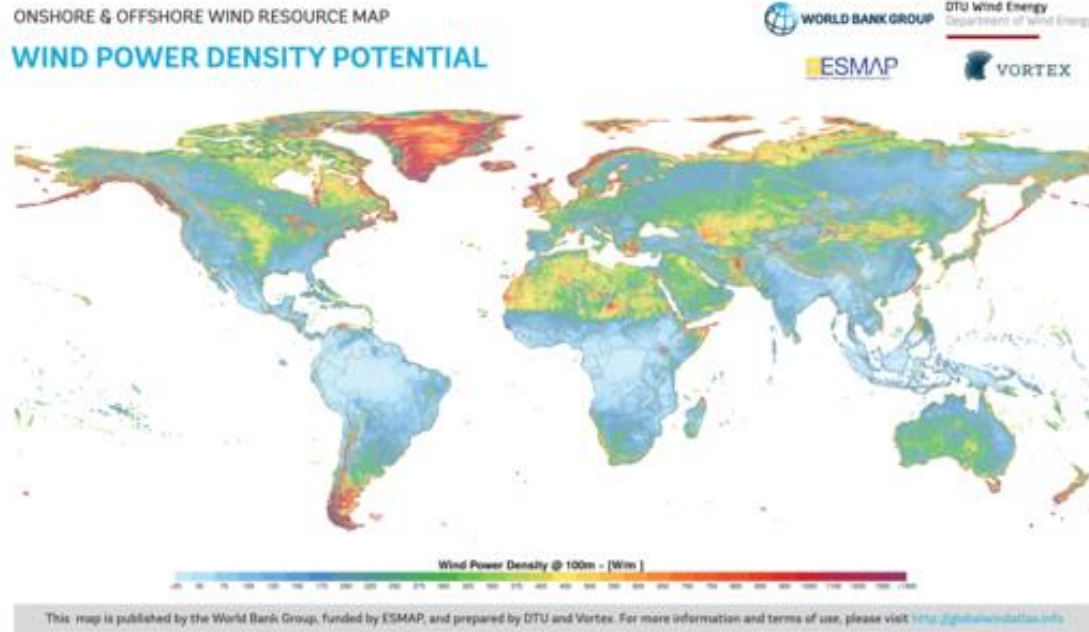
Waar gaan we  
dat maken?



**H<sub>2</sub>**  
**HYDROGEN**



# Waterstof lokaal maken of in zon/wind regio's buiten Europa



- Grote delen buiten Europa hebben een veel beter potentieel voor wind en zon
- In deze gebieden is het dus goedkoper om wind en zon op te wekken...
- Maar....

# Waterstof lokaal maken of in zon/wind regio's buiten Europa

- De meeste gebieden met deze goedkopere hernieuwbare elektriciteit liggen ver weg en hebben over het algemeen ook een water tekort....
  - Voor iedere kilogram H<sub>2</sub> is 9 kilogram water nodig.....
- Naast de ruimte voor de hernieuwbare energie is er ook wat ruimte nodig voor de water elektrolyse.
  - Een recente studie voor een 1 GW installatie (19 ton H<sub>2</sub>/uur) gaf aan dat er 10 ha oppervlak
    - Als dit alleen op hernieuwbare elektriciteit mag draaien met **1 uur tijds correlatie** (EU wet) produceert deze installatie ca. 53000 ton/jaar
  - Voor 50 miljoen ton/jaar is dan aan oppervalk nodig ca. 100 km<sup>2</sup>
  - Het bijbehorende windpark vergt een oppervalk van 94000 km<sup>2</sup> oftewel 2,2 maal Nederland

# Waterstof lokaal maken of in zon/wind regio's buiten Europa

- En hoe de energie te transporteren..... als waterstof??
  - Pijpleidingen zijn vaak te lang; Noord-Afrika zou een optie zijn? (orde 3000 km)
    - Verliezen van waterstof transport per pijpleiding zijn relatief klein; het grootste verlies zit hem in waterstof maken en op druk brengen voor de pijpleiding
      - Ca. 40 -45% verlies voor het maken van de waterstof en het op druk brengen
      - Ca. 5 - 10% van de energie inhoud verlies tijdens het transport over 3000 km
      - Waterstof naar elektriciteit converteren ca. 50% verlies
      - Per 1000 MWh opgewekt vermogen komt ca. 270 MWh beschikbaar: **27% rendement**
    - Waterstof transporteren per schip als vloeibare waterstof resulteert in nog meer verliezen
      - Ca. 40% verlies voor het maken van de waterstof
      - Ca. 35% verlies voor het vloeibaar maken van de waterstof
      - Ca. 40% van de energie inhoud verlies tijdens het transport over 3000 km (ervaring H<sub>2</sub> transport Australië – Japan)
      - Waterstof naar elektriciteit converteren ca. 50% verlies
      - Per 1000 MWh opgewekt komt 120 MWh beschikbaar: **rendement 12%**

# Waterstof lokaal maken of in zon/wind regio's buiten Europa

- En hoe de energie te transporteren..... als elektriciteit??
  - Is elektriciteit transporteren wellicht efficiënter?
    - Nieuwste vormen van gelijkstroom transport op > 500 kV resulteren in 10% verlies per 3000 km

Waterstof maken in landen ver weg met een gunstig hernieuwbaar energie profiel lijkt niet aantrekkelijk.

Energie verliezen zijn erg groot en ook daar zal energie uiteindelijk niet gratis zijn

**Bij transporten van vloeibaar waterstof > 7300 km kost het meer energie dan dat je energie die je vervoert**

## Conclusies

- De verwachtingen van Waterstof zijn groot
- Er zijn in veel gevallen energie efficiëntere oplossingen aanwezig
- Maar er blijven een aantal toepassingen over waar geen alternatieven zijn
- Het lastigste blijft het grillige patroon van hernieuwbare elektriciteit
- Hiervoor zijn andere oplossingen, zoals meer nucleaire energie.



Dank voor de  
aandacht en vragen

