

A wide-angle photograph of a TU Delft campus. In the foreground, a large, wide set of concrete steps leads up a grassy hill. Many people are sitting on the steps, some in groups, some alone. In the background, a large, modern building with a glass facade is visible on the right, and a tall, conical concrete structure with a metal lattice top stands prominently in the center. The sky is clear and blue.

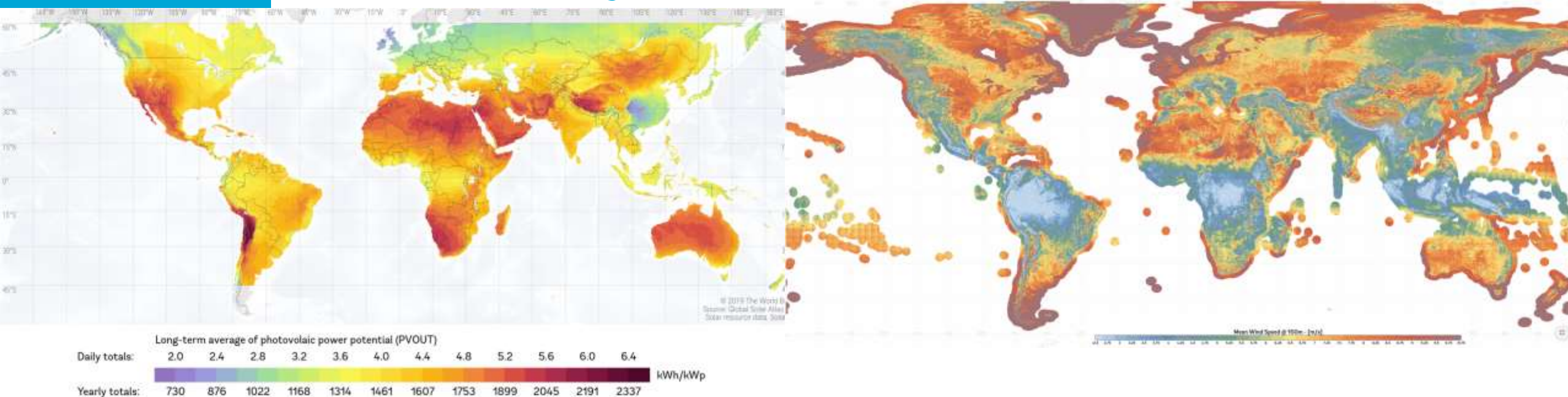
De (on)mogelijkheden van waterstof

5-10-2022

Prof. Dr. Ad van Wijk

**Elektriciteit productie uit zon en wind nu 1-2 cent/kWh
Maar lage kosten zon en wind heb je alleen op die plekken
met goede zon-instraling of hoge windsnelheden
én veel beschikbare ruimte.**

Dat vind je vaak ver weg van de energievraag.



Solar Resources Map

Wind Speed at 100 meter height Map

Mohammed Bin Rashid Al Maktoum Zonne Park in Dubai; 3.000 MW klaar, uitbreiding naar 5.000 MW



Oppervlakte nodig om alle energie voor de hele wereld te produceren 155.000 TWh (TWh=miljard kWh)



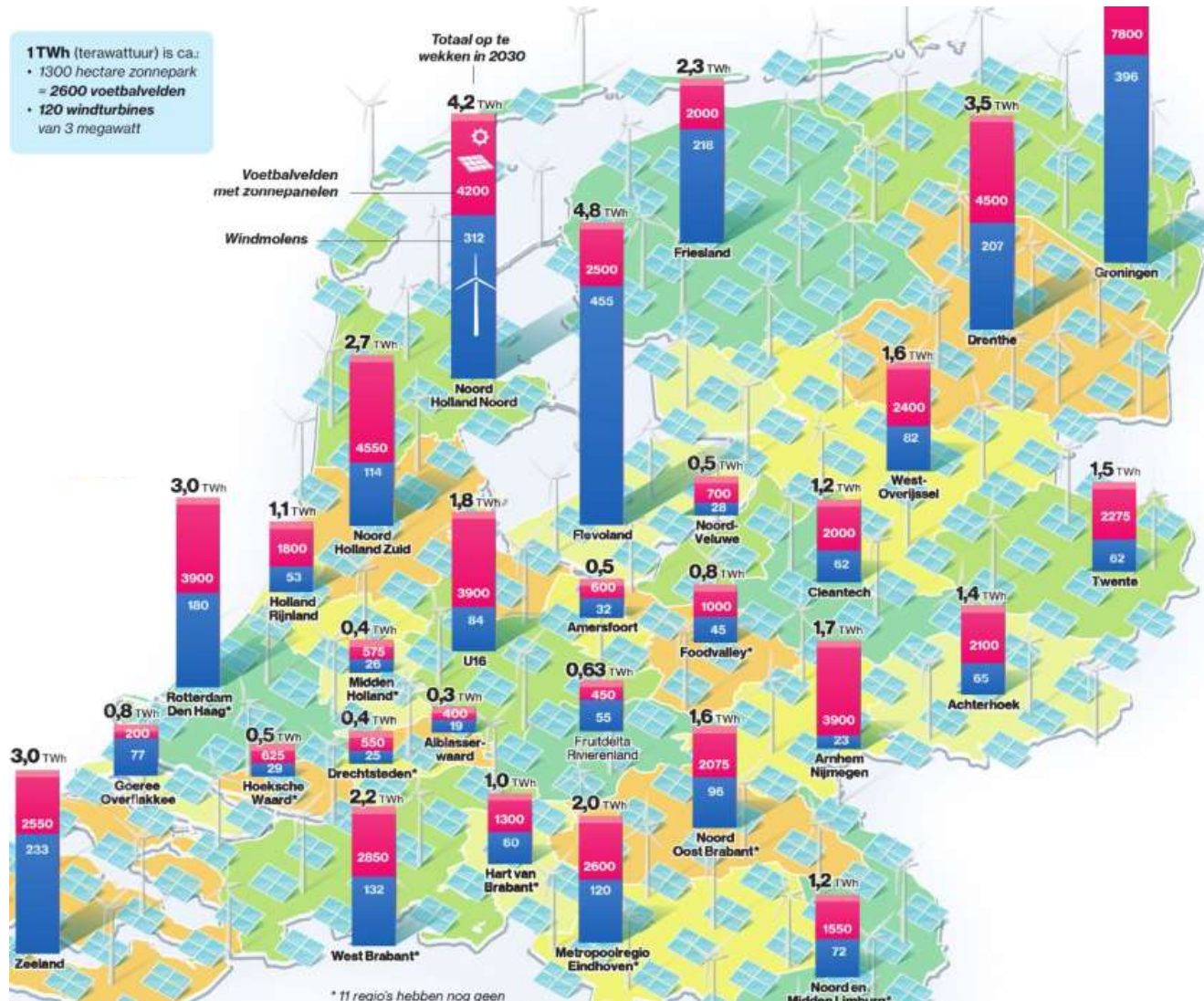
10% SOLAR AUSTRALIA



1.5% WIND PACIFIC OCEAN

In Nederland willen we in 2030 minimaal 35 miljard kWh elektriciteit met zon en wind op land opwekken

Veel in dunbevolkte gebieden en wind vooral aan de kust



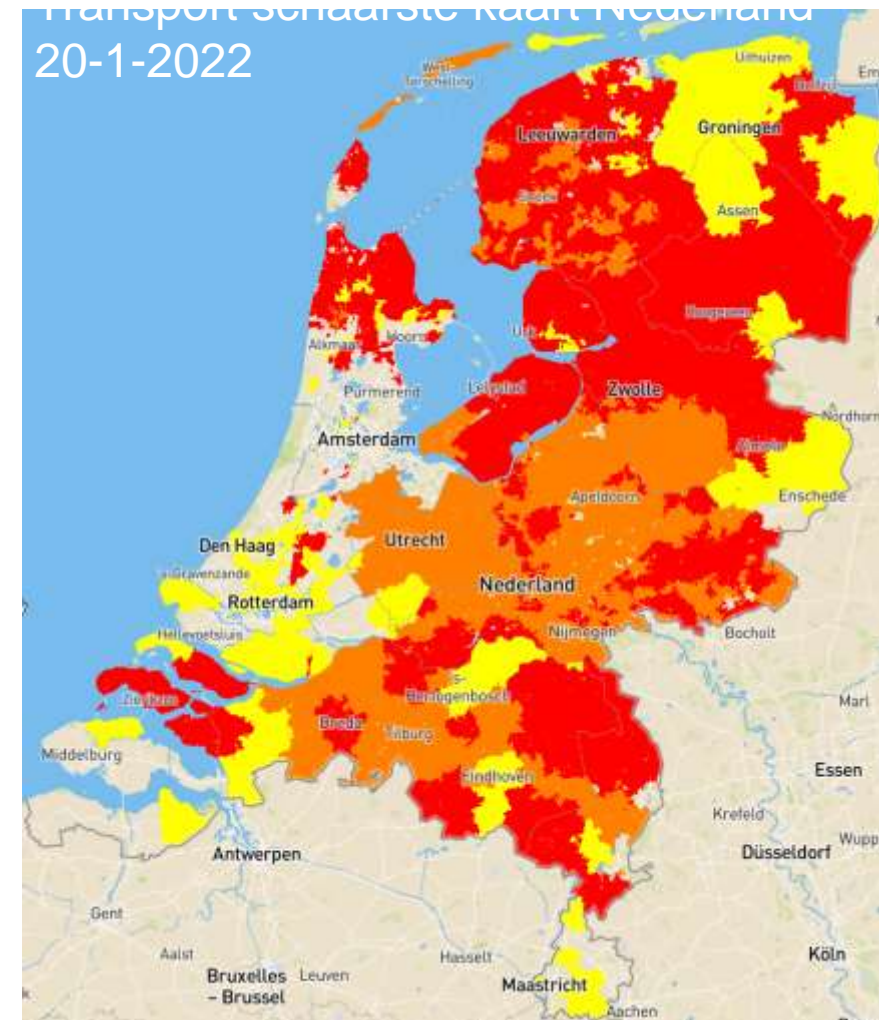
Elektriciteit infrastructuur is/wordt een groot knelpunt in de realisatie van een duurzaam energie systeem

Voor het aansluiten van zon en windvermogen op het elektriciteitsnet

Gas transportnet 15 keer zo groot dan elektriciteitstransport net

Voor het aansluiten van warmtepompen, Zon op dak en elektrische auto's op elektriciteitsnet

Gasaansluiting huis 10 keer zo groot (30 kW) dan elektriciteitsaansluiting (3 kW)



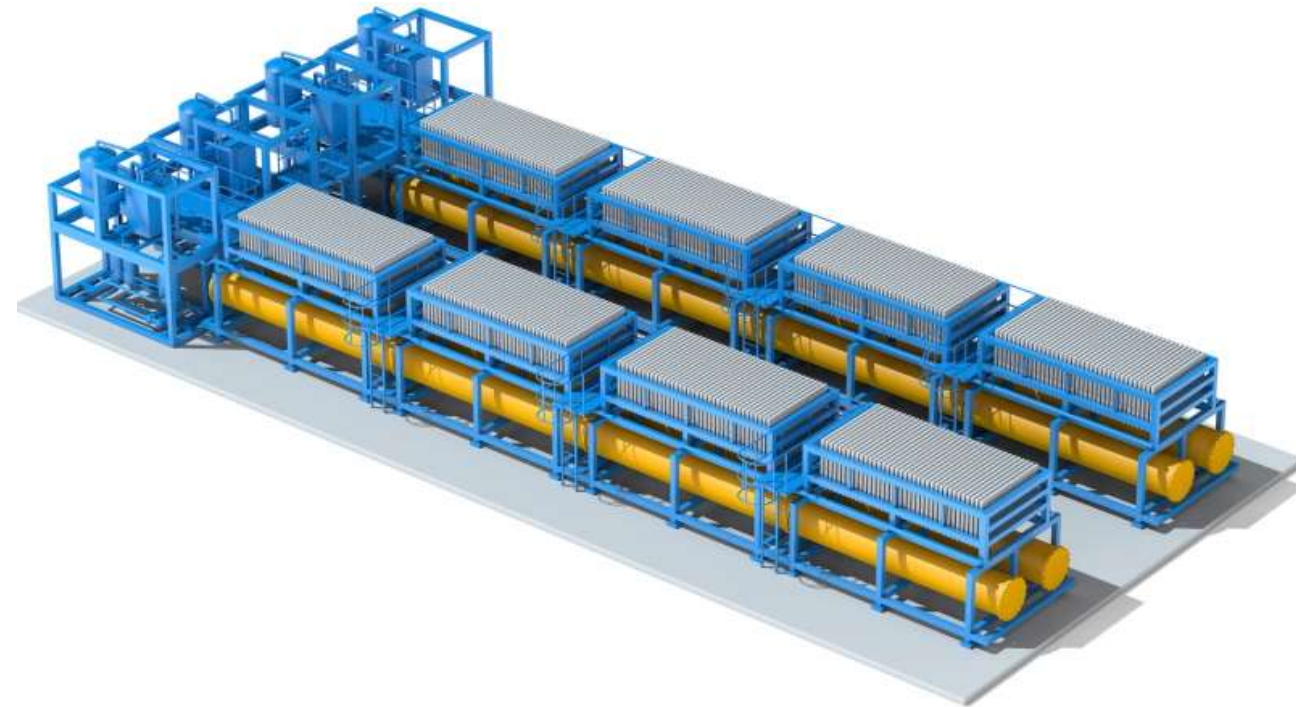
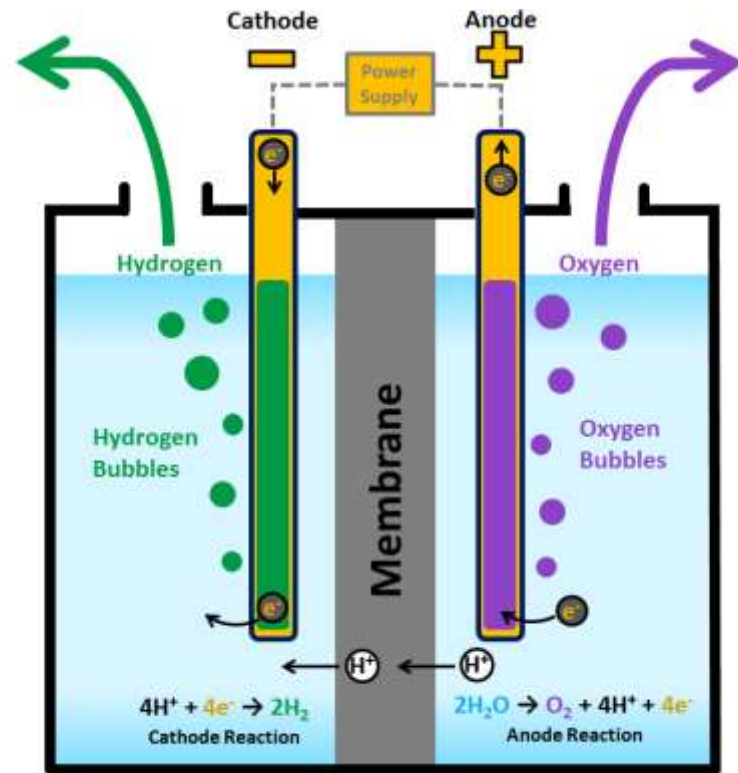
Betekenis van de kleurcodes

- Transparant: (nog) geen transportschaarste
- Geel: transportschaarste dreigt, er geldt een aangepast offerteregime
- Oranje: vooraankondiging structurele congestie bij ACM
- Rood: structureel congestie, nieuwe aanvragen voor transport worden niet gehonoreerd

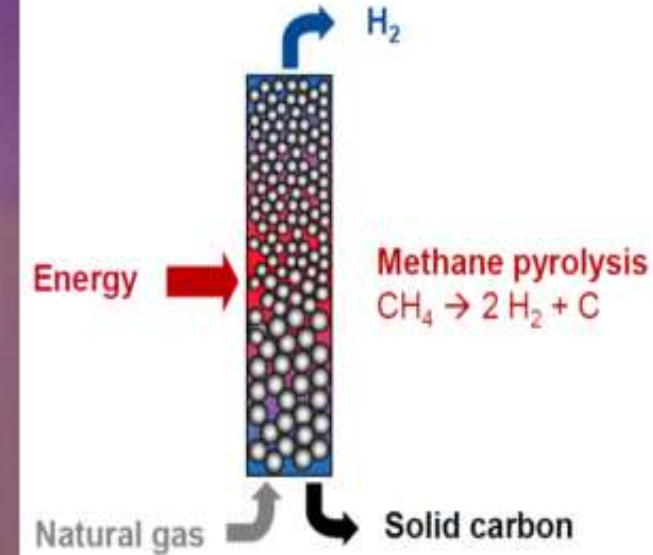
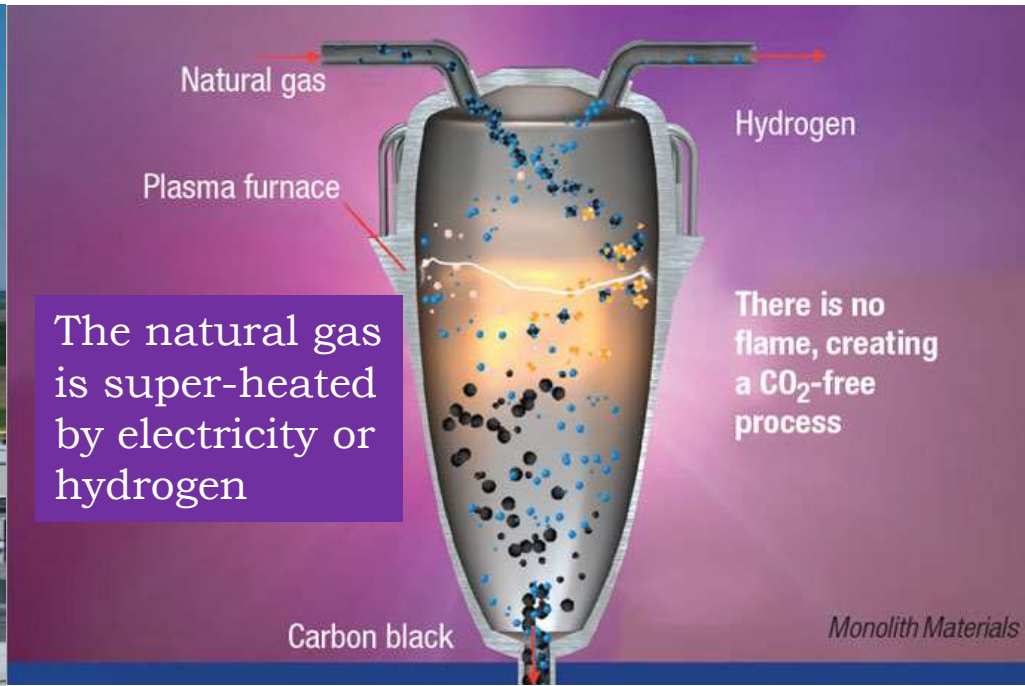
Waterstof is net zoals elektriciteit een koolstofvrije energiedrager

Je kunt waterstof maken uit fossiele energie, biomassa (reststromen) of uit water

Electrolyse van water, met elektriciteit uit duurzame energiebronnen geeft groene waterstof



Methane Pyrolysis



Olive Creek, Nebraska, US

Monolith: Plasma Methane Pyrolysis

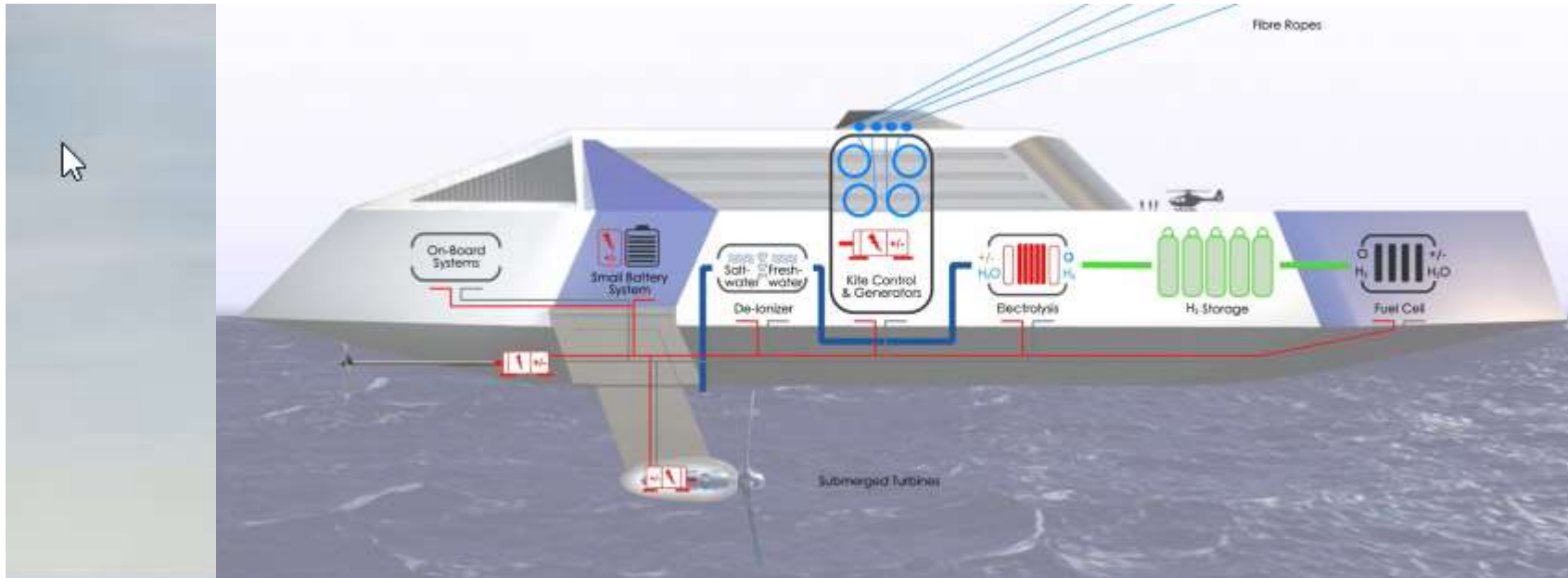
Monolith clean H₂ production has been granted 1 billion dollar loan by US DOE to expand hydrogen production, dec 2021

Zonnecellen die direct waterstof produceren

Eerste prototype paneel van start up bedrijf Solhyd,
spinoff van Katholieke Universiteit Leuven

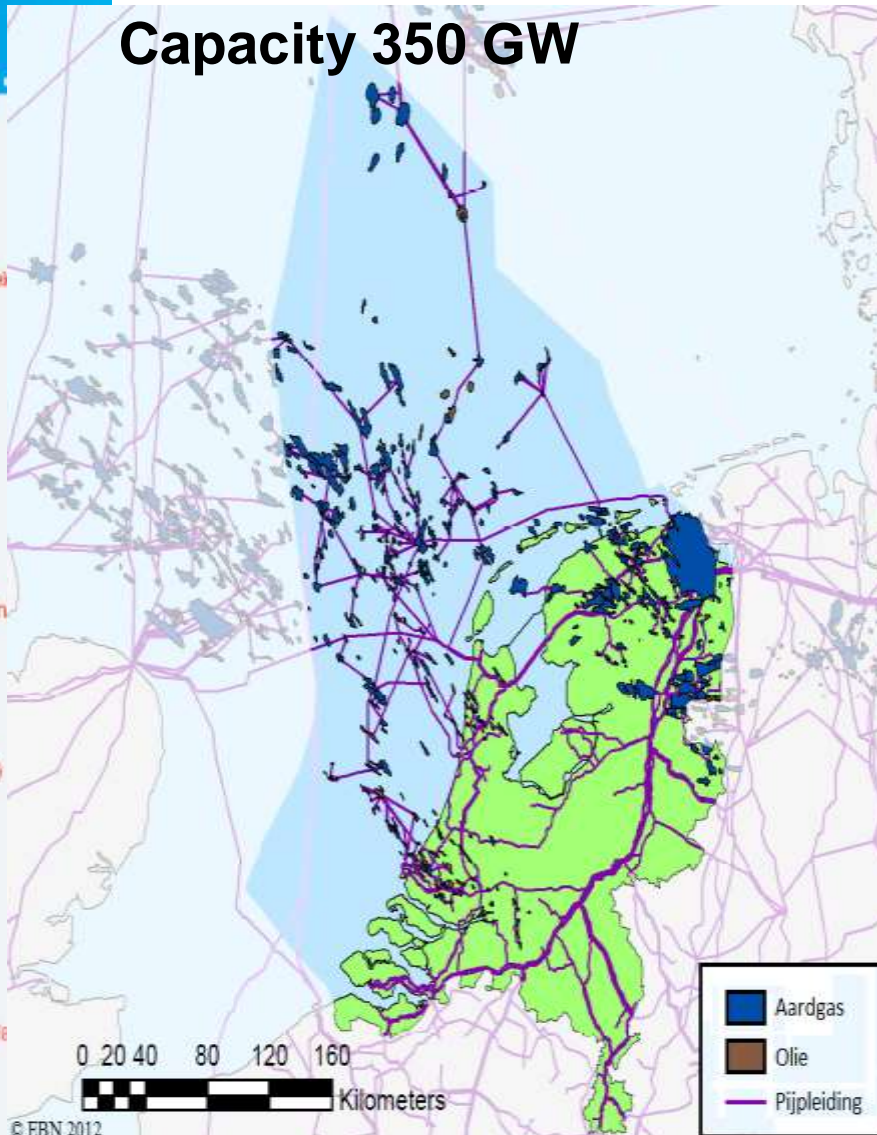


Offshore wind kite waterstof productie schepen, groene waterstof

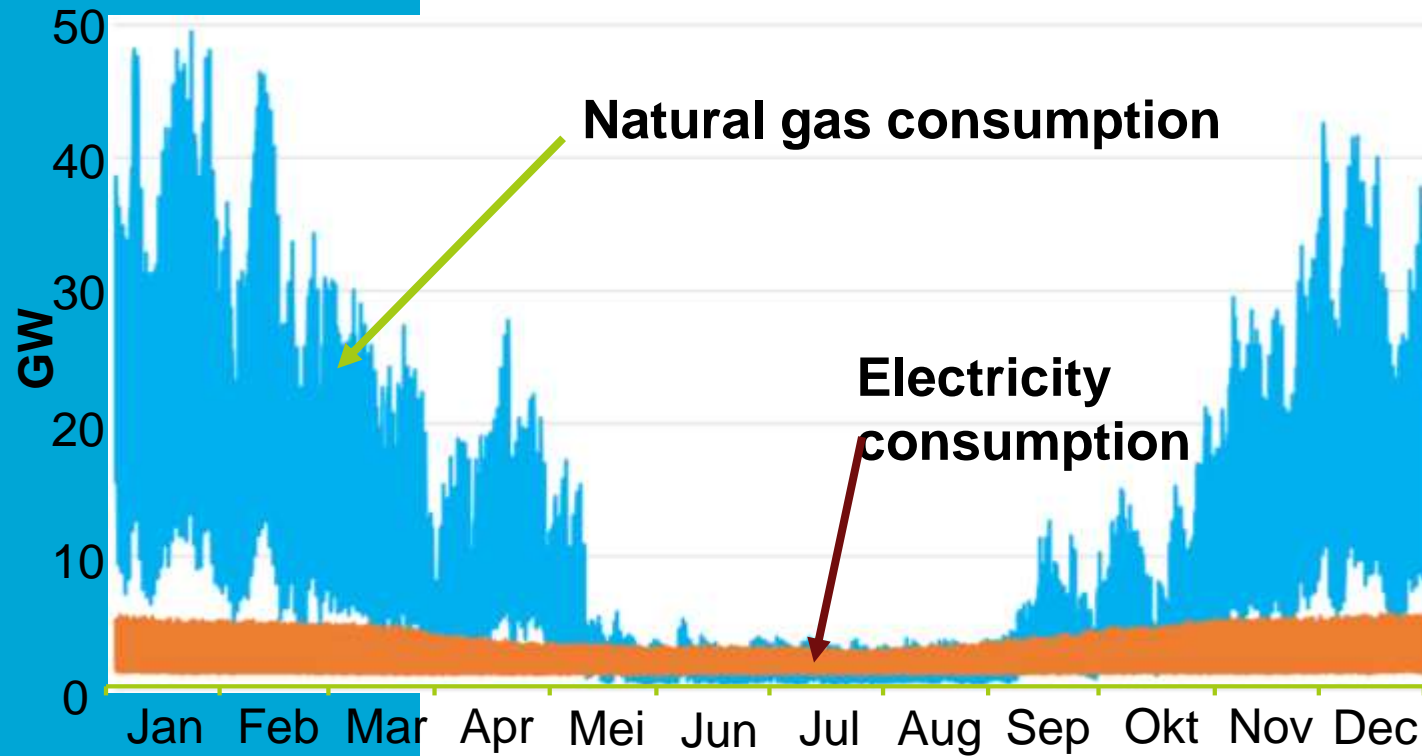


KITE HYDROGEN SHIPS

Om meer zon en wind in te passen moet je natuurlijk het elektriciteitsnet uitbreiden, maar ook het aardgasnet omvormen naar waterstof.



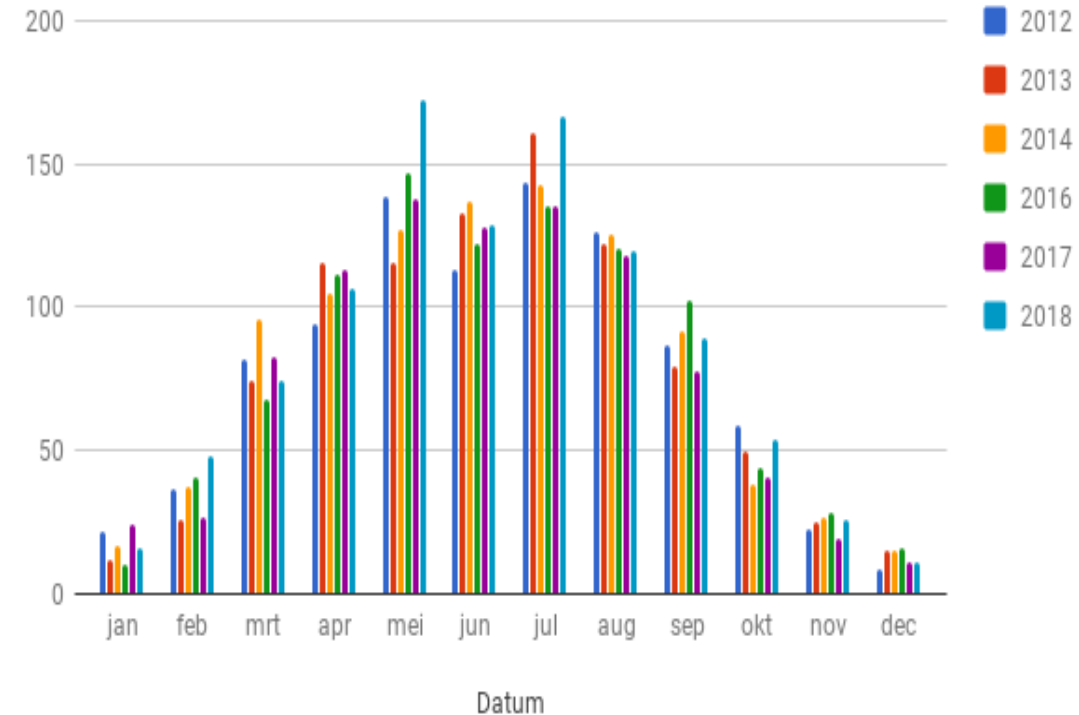
Opslag wordt een nog grotere uitdaging dan nu. Dag/nacht en seizoensopslag is nodig



7,8 million Dutch houses (2017)

Source: Kellner, 2018

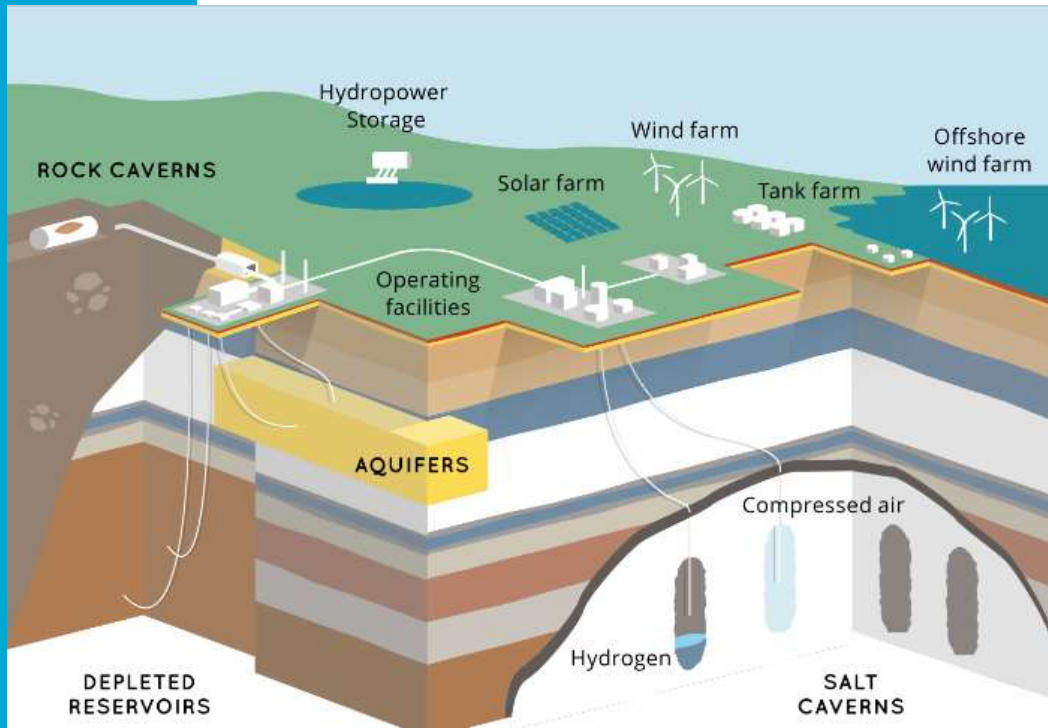
Zon per maand (Zuid)



<https://thuiszonnepanelen.nl/opbrengst-van-onze-zonnepanelen/>

Nu is er voor seizoensopslag zo'n 100 miljard kWh gasopslag = vergelijkbaar met opslag capaciteit van 1 miljard Tesla auto's met 100 kWh batterij.

Waterstof kan eenvoudig in zoetkoepels worden opgeslagen, die er al zijn



In 1 zoutkoepel kan 6.000 ton (240 miljoen kWh) waterstof = vergelijkbaar met opslag capaciteit van 2,4 miljoen batterij elektrische auto's (100 kWh batterij)

Zout koepel investeringskosten minder dan 0,5 Euro/kWh H₂

Batterij investeringskosten in de toekomst mogelijk 100 Euro/kWh

REPowerEU; Joint European Action for more affordable and sustainable energy, EC 8-3-2022

REPOWER EU TRACK	FOCUS	FF55 AMBITION BY 2030	REPOWEREU MEASURE	REPLACED BY THE END OF 2022 (BCM equivalent) estimate	ADDITIONAL TO FF55 BY 2030 (BCM equivalent) estimate
GAS DIVERSIFICATION	NON-RU NATURAL GAS	-	LNG diversification	50*	50
		-	Pipeline import diversification	10	10
	MORE RENEWABLE GAS	17 bcm of biomethane production, saving 17 bcm	Boost biomethane production to 35bcm by 2030	3.5	18
	HYDROGEN ACCELERATOR	5.6 million tonnes of renewable hydrogen, saving 9-18.5 bcm	Boost hydrogen production and imports to 20mt by 2030	-	25-50
ELECTRIFY EUROPE	HOMES	Energy efficiency measures, saving 38 bcm	EU-wide energy saving, e.g. by turning down the thermostat for buildings' heating by 1°C, saving 10bcm	14	10
		Counted under overall RES figures below	Solar rooftops front loading – up to 15 TWh within a year	2.5	frontloaded
		30 million newly installed heat pumps installed in 2030, saving 35 bcm in 2030	Heat pump roll out front loading by doubling deployment resulting in a cumulative 10 million units over the next 5 years	1.5	frontloaded
		POWER SECTOR	Deploy 480 GW of wind capacities and 420 GW of solar capacities, saving 170bcm (and producing 5.6 Mt of Green Hydrogen)	Wind and solar front loading, increasing average deployment rate by 20%, saving 3bcm of gas, and additional capacities of 80GW by 2030 to accommodate for higher production of renewable hydrogen.	20
TRANSFORM INDUSTRY	ENERGY-INTENSIVE INDUSTRIES	Front load electrification and renewable hydrogen uptake	Front load Innovation Fund and extend the scope to carbon contracts for difference	Gas savings counted under the renewable hydrogen and renewables targets	



Ursula von der Leyen, State of the Union 14-9-2022

A UNION THAT STANDS STRONG TOGETHER

Hydrogen can be a game-changer for Europe.

- We need to move from the niche market to the mass market for hydrogen.
- With REPowerEU, we have doubled our target: we want to produce ten million tonnes of renewable hydrogen in the EU each year by 2030.
- To achieve this, we need to create a market maker for hydrogen, to bridge the investment gap and connect future supply and demand.
- This is why I can announce today that we are going to create a new European Hydrogen Bank.
- It will help guarantee the purchase of hydrogen, in particular by using the resources of the Innovation Fund.
- It will be able to invest 3 billion euros to help build the future hydrogen market.

This is how the economy of the future will be built.

Hydrogen Accelerator; hydrogen pipeline infrastructure



<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN&qid=1653033742483>



Waterstof project Nieuwegein



Zonnepark bestaand,
Windturbines langs kanaal toekomst



Dual Fuel Tractor en Holder;
60-80% waterstof bijmengen mogelijk



Waterstof tankstation bij JosScholman
Nieuwegein/Utrecht
Officieel geopend 8 Oktober 2021



Artist impression Nieuwegein

Electrolyser besteld, operationeel Q2 2023

Dual fuel Tractor, waterstof bijmengen in diesel motor (60%-80% van diesel wordt vervangen door waterstof)



Groningen Seaports-Soluforce; flexibele waterstof leiding



Waterstof Brandstofcel Elektrisch Transport



Stellantis/Opel:
Waterstof elektrische Bestelwagen



Doosan:
Waterstof drones



Alstom
Waterstof brandstofcel trein



Toyota: Waterstof Heftruck



Caetano: Waterstof bus met
Toyota brandstofcel



Hyzon-Holthausen: Productie
waterstof brandstofcel trucks

Waterstof Brandstofcel tractoren

Allis Chalmers (1959)



H2Trac verkoopt eerste waterstof-brandstofcel trekker aan Stadsboerderij Almere (31-5-2021)



HoltHausen en Hyzon maken Waterstof brandstofcel trucks in Groningen



Noodstroom aggregaat op waterstof



500 kW brandstofcel op waterstof bij datacenter NorthC in Groningen

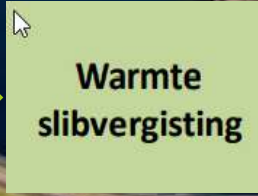
<https://www.northcdatacenters.com/northc-realiseert-in-groningen-de-eerste-noodstroomvoorzieningen-op-groene-waterstof-in-europa/>

Rioolwaterzuivering geïntegreerde groene-energie keten

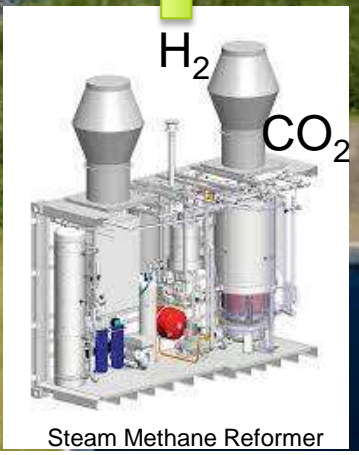


H₂

O₂



- Pure zuurstof uit elektrolyse
- Factor 5,6 minder volume
- Reductie energie tot 50% totaal verbruik waterschap
- Reductie lachgas
- Compactere zuivering

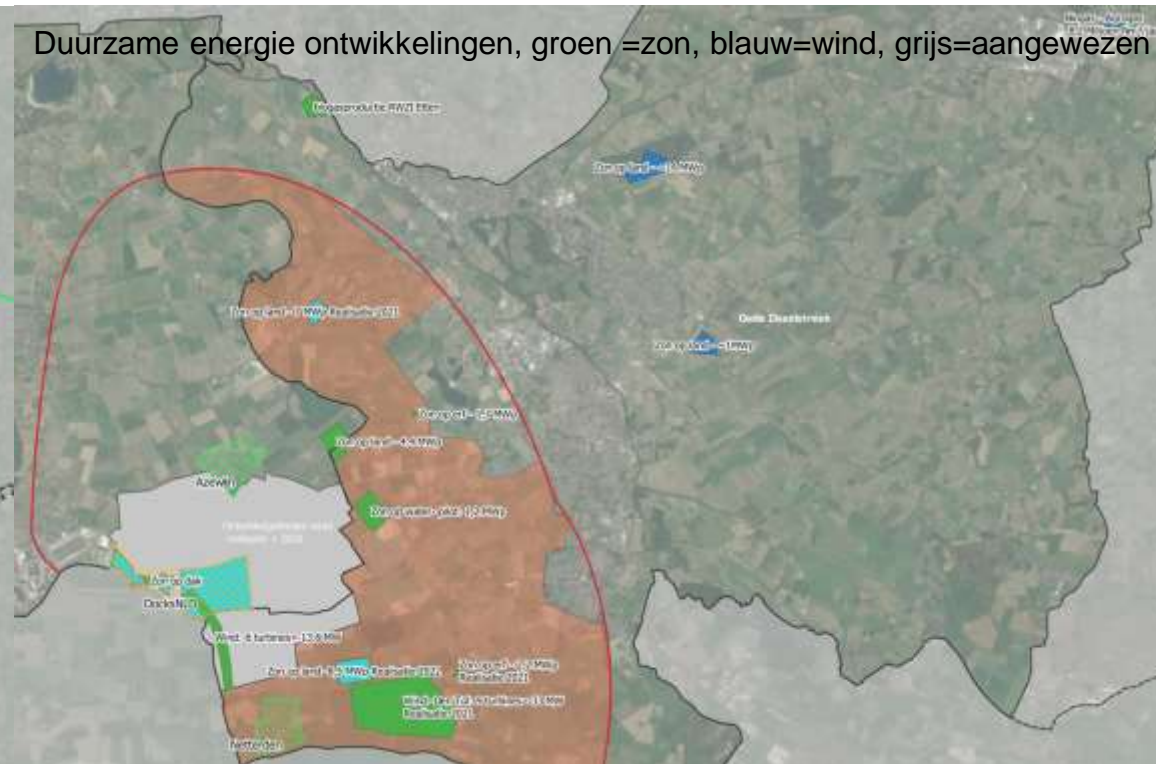


Biomassa vergister plus kleinschalige SMR (Stoom Methaan Omvormer) zet biogas om naar groene waterstof en groene CO₂



- | | | | |
|----------------------------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| 1. Ventilation fan | 5. Hydrogen storage | 9. Reformate cooler | 13. Low temperature shift |
| 2. Desulphurisation vessel | 6. Water separator for vacuum pump | 10. Electronics cabinet | 14. Coolant expansion vessel |
| 3. PSA-vessels | 7. Vacuum pump | 11. Steam generator | 15. Burner air blower |
| 4. Off-gas storage | 8. Coolant heater | 12. Reformer unit | 16. Water purification system |

Gebiedsontwikkeling Montferland-Oude IJsselstreek



Vraagontwikkeling

- Steenfabriek gas naar waterstof
- DocksNLD, nieuw logistiek bedrijven terrein A12, waterstof voor trucks, vorkheftrucks, etc.
- Agrarische bedrijven, waterstof voor tractoren, machines en verwarming boerderijen
- Woningen, twee kleine kernen met oude woningen, Netterden en Azewijn van gas naar waterstof

Aanbodontwikkeling

- Grote zonneparken en windparken in ontwikkeling
- Gebied aangewezen waar grootschalig zon en wind mag worden ontwikkeld
- Maar netcapaciteit is er niet en is op deze locatie nog vervelender doordat ze aan de grens liggen.
- Conversie naar waterstof zou oplossing kunnen bieden.
- Aansluiting op waterstofbackbone noodzakelijk voor balanceringsvraag en aanbod

Stadsgas productie Utrecht Gemeentelijke gasfabriek 1862-1959 > 50% waterstof in stadsgas



TOEN EN NU OVERVECHT

AD 18-5-2022

Gasfitters in de wijk Overvecht

Heel Utrecht moet eind 1965 van het stadsgas af zijn. Te beginnen in Overvecht. Dus trekt op 6 juli 1965 een grote ploeg gasfitters de wijk in om huis-aan-huis alle kachels, gasbers en fornuizen geschikt te maken voor aardgas. In één dag moet de klus geklaard zijn, want de stadsgasleiding is al afgesloten en vanavond moeten de huisvrouwen natuurlijk wel weer hun potje kunnen koken. Aardgas, wat een wonder was dat. Kart-en-klaar zat het zomaar onder de grond in Groningen. Veel schroeft die dan het uit steenkool gewonnen fabrieksgas, waar Utrechters tot dan toe op kookten



▲ Vanavond kookt deze huisvrouw op aardgas. FOTO: HET UTRECHTSE VAN DER WERF



▲ Marijke kookt elektrisch, veel schoner voor de pannen. FOTO: PALLA SWIERINGA

en stookten. Een nadeel: alle gas-toestellen in alle huizen moesten ervoor worden omgebouwd. Maar dat valt in het niet bij de energietransitie waar we nu voor

staan. Heel Utrecht moet in 2050 van het gas af zijn. En weer is Overvecht de proeftuin. Bij de tienhoogflat van Marijke aan de Henriëttedreef zijn ze al zover. Het

dak, de gevel en zelfs alle balkonhekjes zijn bedekt met zonnepanelen. De bewoners stoken en koken alleen nog maar op de elektriciteit

die de flat zelf opwekt. Dus geen last van stijgende energieprijzen en kijkt, de pannen blijven zo lekker schoon aan de onderkant. - Paula Swieringa

Verwarmen met waterstofketels

Remeha

Worcester Bosch



Remeha HYDRA

	Hydrogen	Natural gas	
CO ₂	0	9	%
	0	190	g/kWh
	0	2500	kg/jaar*
CO	0	48	ppm
NOx	20	30	mg/kWh Hs
Efficiency**	115	108	% LCV
	97	97	% HCV
Output Heating	24	24	kW
Output DHW	28	28	kW

* At average gas consumption
** Tretour = 30°C, 30% load

Waterstofketel
(Maart 2019 gelanceerd)



Gasketel die geschikt is voor waterstof
(15-11-2019 gelanceerd)

Slimme hybride oplossing, kosten efficient en weinig overlast:

- Isoleren wat eenvoudig en goedkoop kan
- Warmtepomp voor basislast; COP 5,2 ipv COP 3,4
- Aardgas/Waterstofketel voor pieklast in winter



Panasonic: Huis Brandstofcel systemen Japan

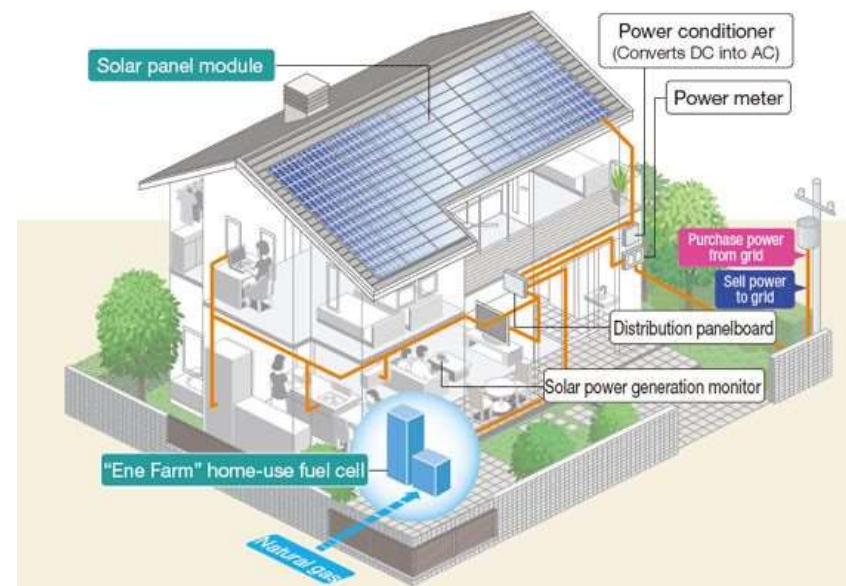
Japan 270.000 verkocht 2018
Doel 5.3 miljoen verkocht eind 2025

Reforming aardgas naar $H_2 + CO_2 +$ warmte
1 kW brandstofcel zet H_2 om in elektriciteit+warmte



Warm water vat

Brandstofcel





Vliegtuig op vloeibare waterstof, in ontwikkeling bij AIRBUS



Vliegtuig op vloeibare waterstof AeroDelft, studenten dreamteam TU Delft



24 uurs van Lemans in 2024 op Waterstof

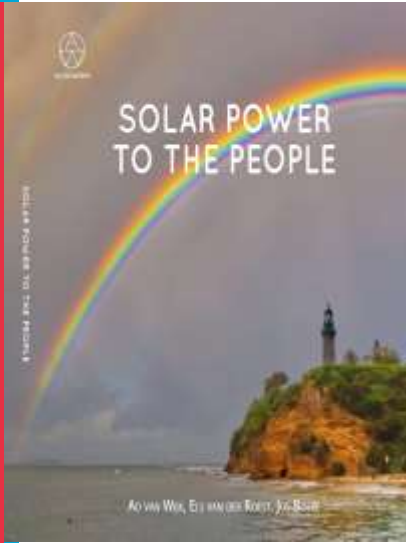


Further Reading

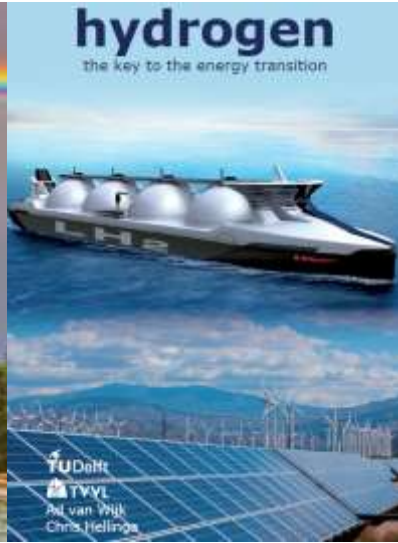
www.profadvanwijk.com



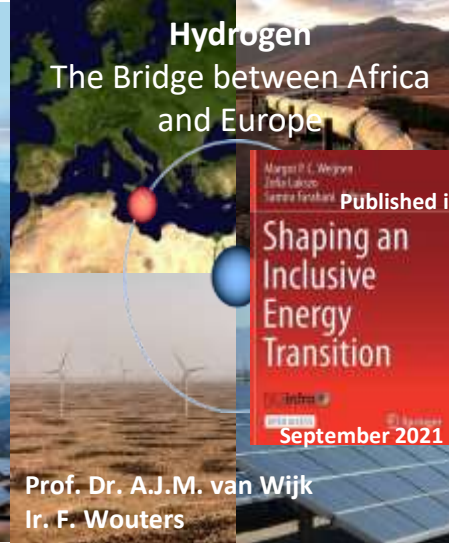
April 2017



November 2017



May 2018



September 2019



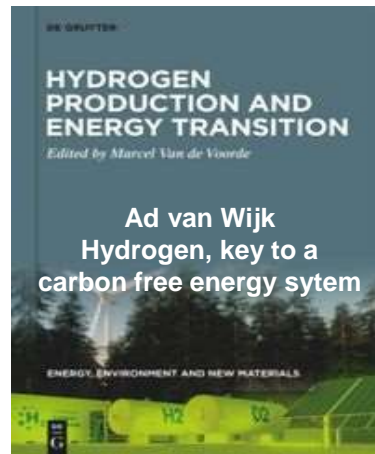
November 2019



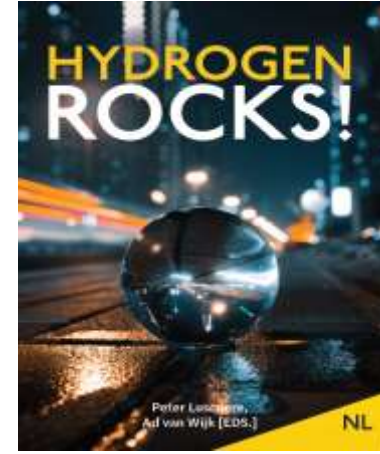
April 2020



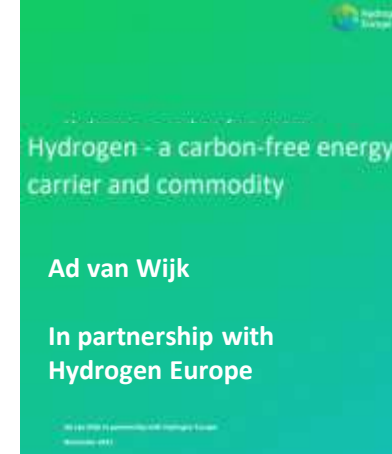
April 2021



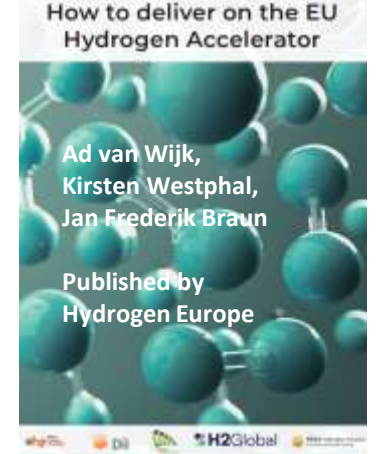
September 2021



October 2021

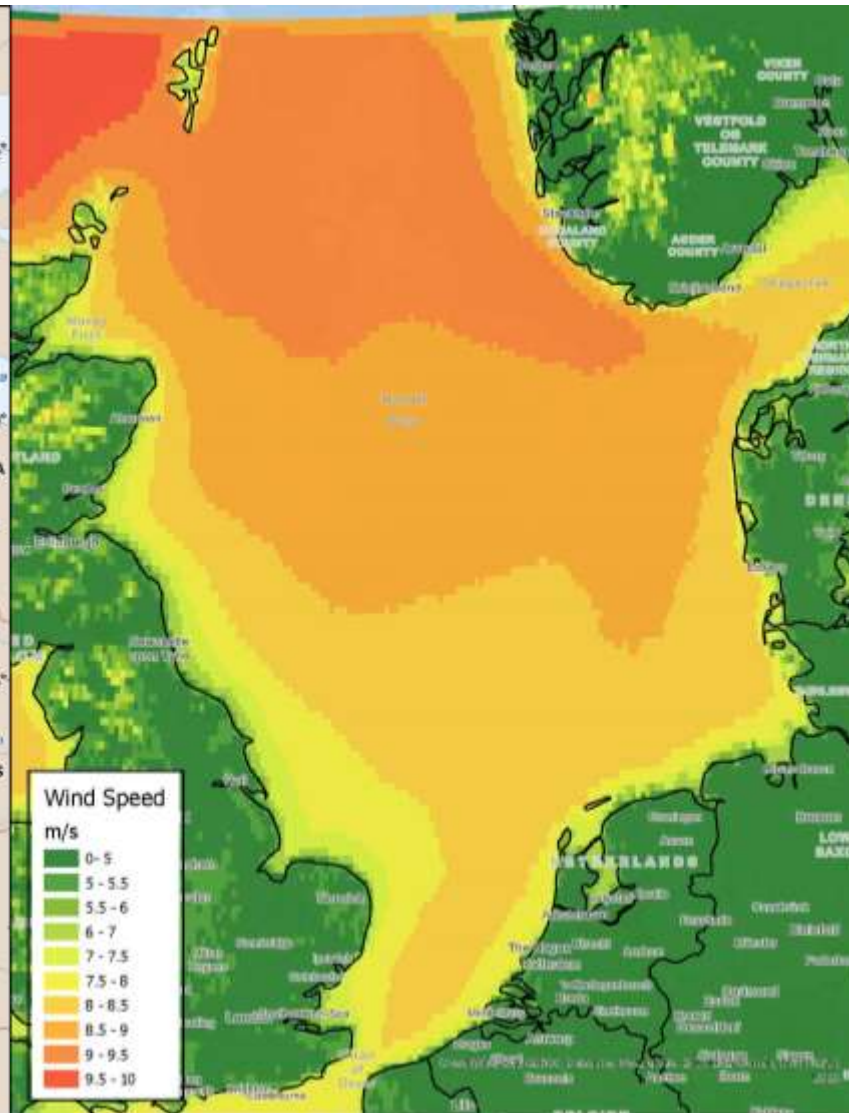


November 2021



May 2022

Water Depth, Wind speed, Gas pipelines North Sea



Floating wind turbine development



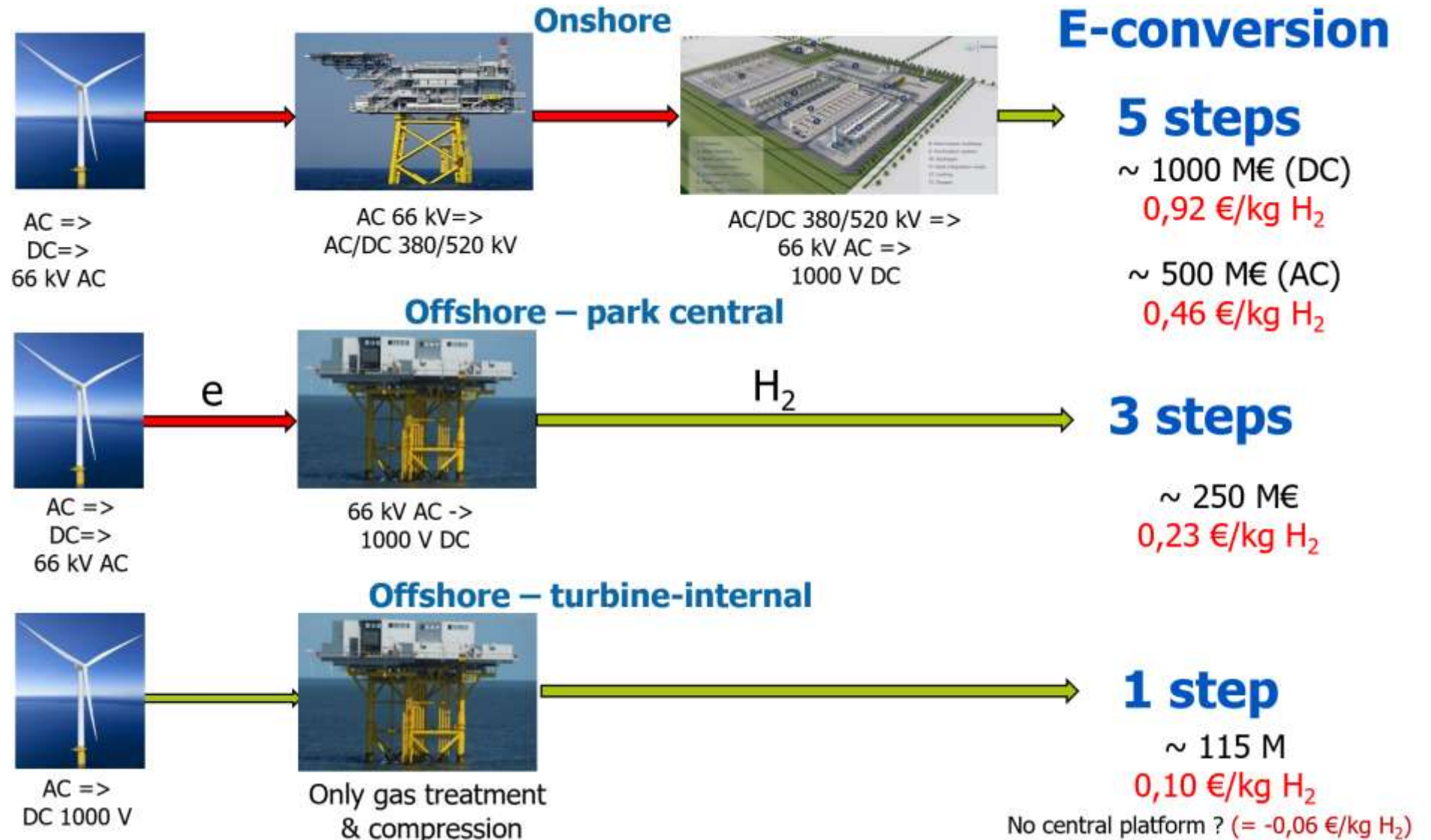
Equinor design floating wind, oct 2021



Vestas 9.5 MW floating wind, dec 2020

“ScotWind” seabed tender, March 2022 : Auction 8,600 km² of sea space which could host almost 25 GW of offshore wind. 17 projects won. With 15 GW floating offshore wind.

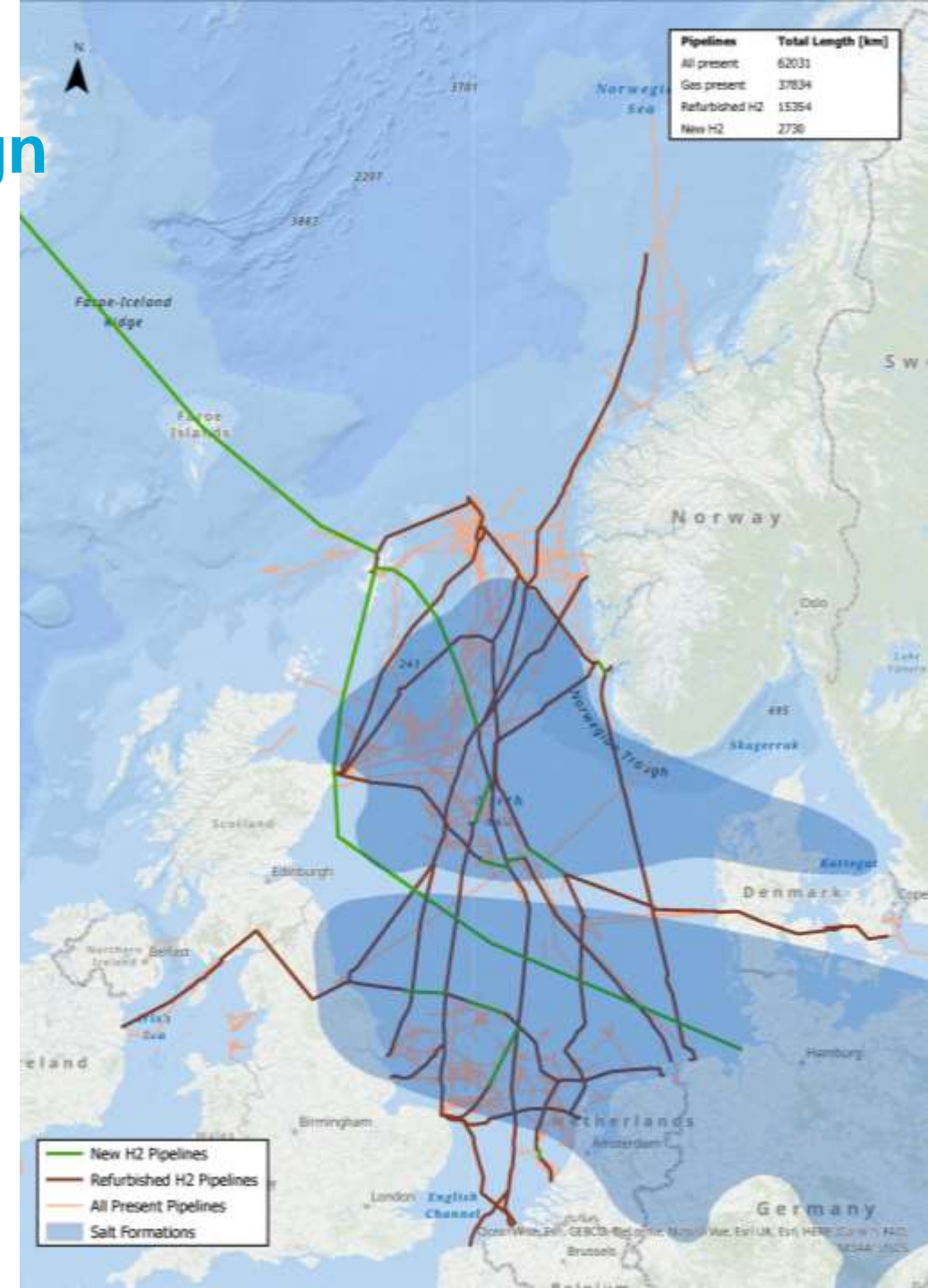
Integrating electrolyser in wind turbine reduces hydrogen production cost, due to savings on electricity conversions



Hydrogen Infrastructure Design

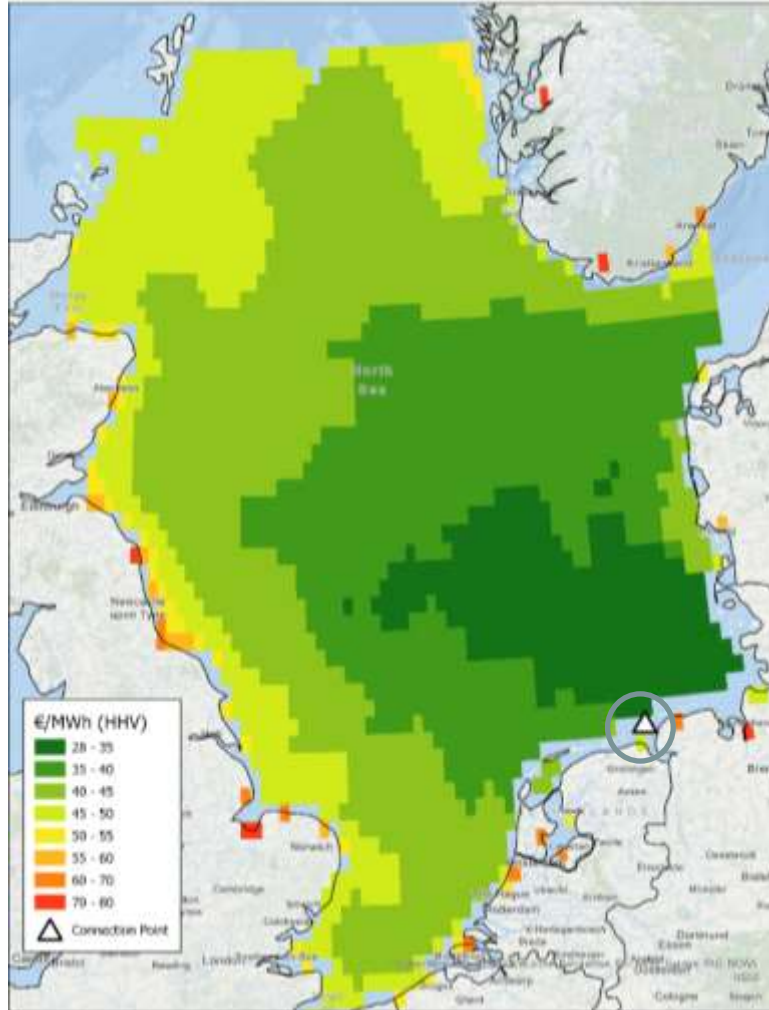
Design assumptions

- Able to transport similar energy volumes as today for gas
- Re-using as much as possible existing gas infrastructure
- Using same onshore landing points as for gas.
- Connecting to proposed European Hydrogen Backbone
- Connecting feasible renewable hydrogen production locations

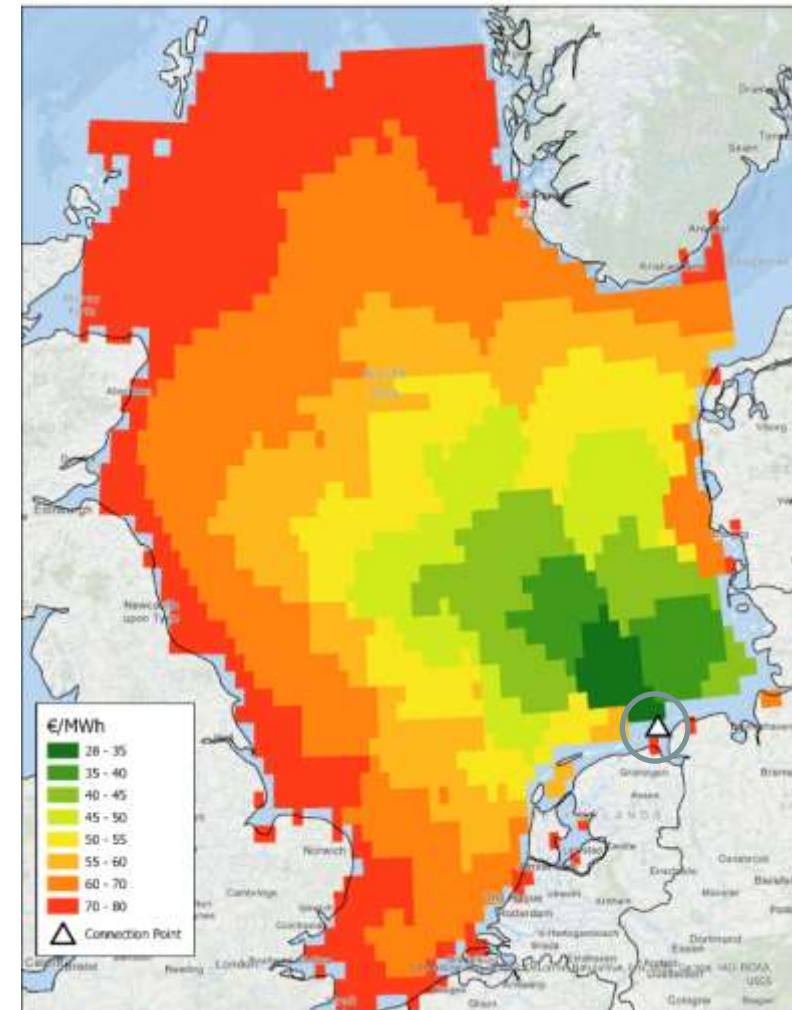


North Sea offshore wind energy shore landing cost in Eemshaven Netherlands for hydrogen and electricity

LCOH €/MWh

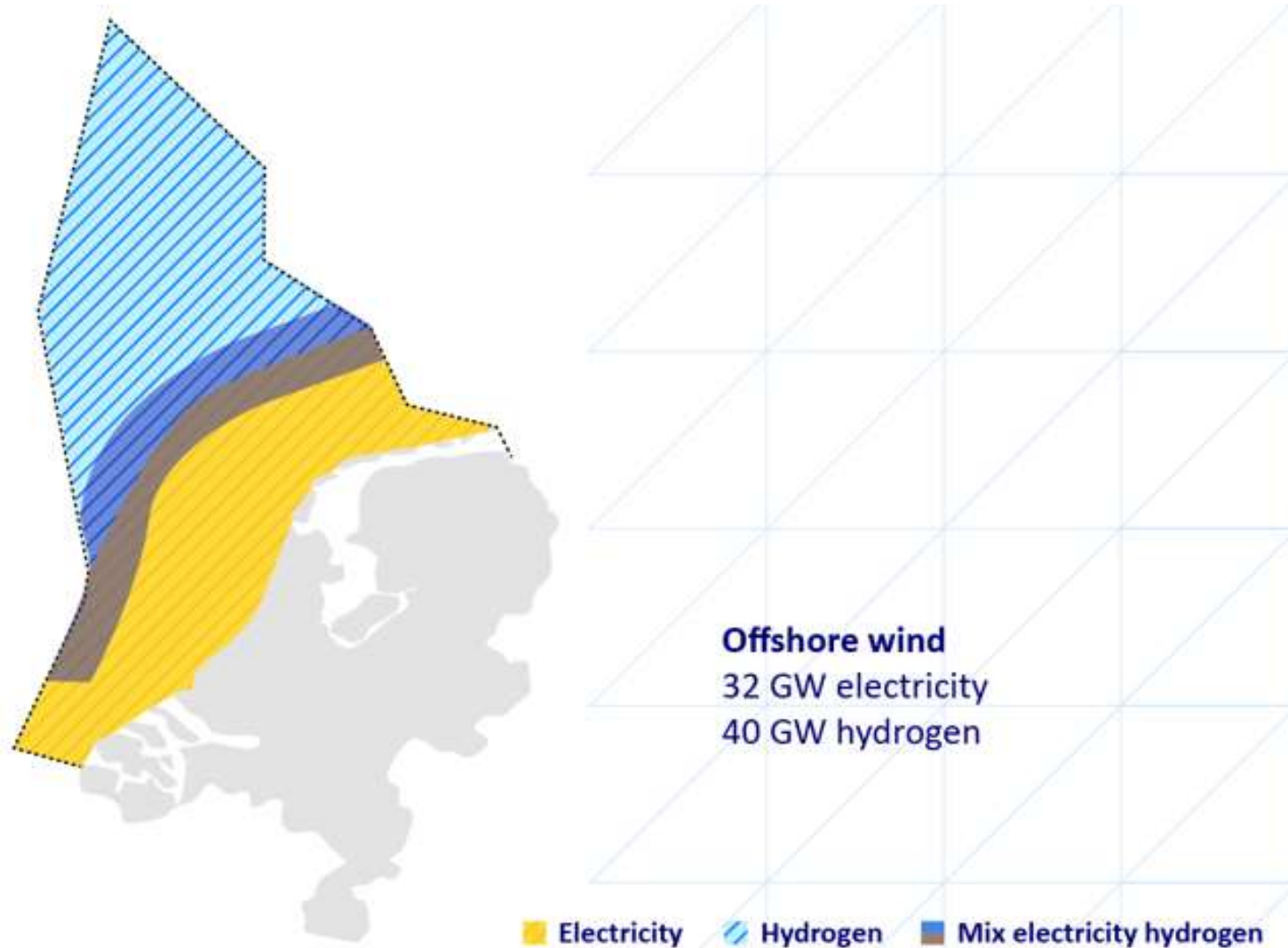


LCOE €/MWh

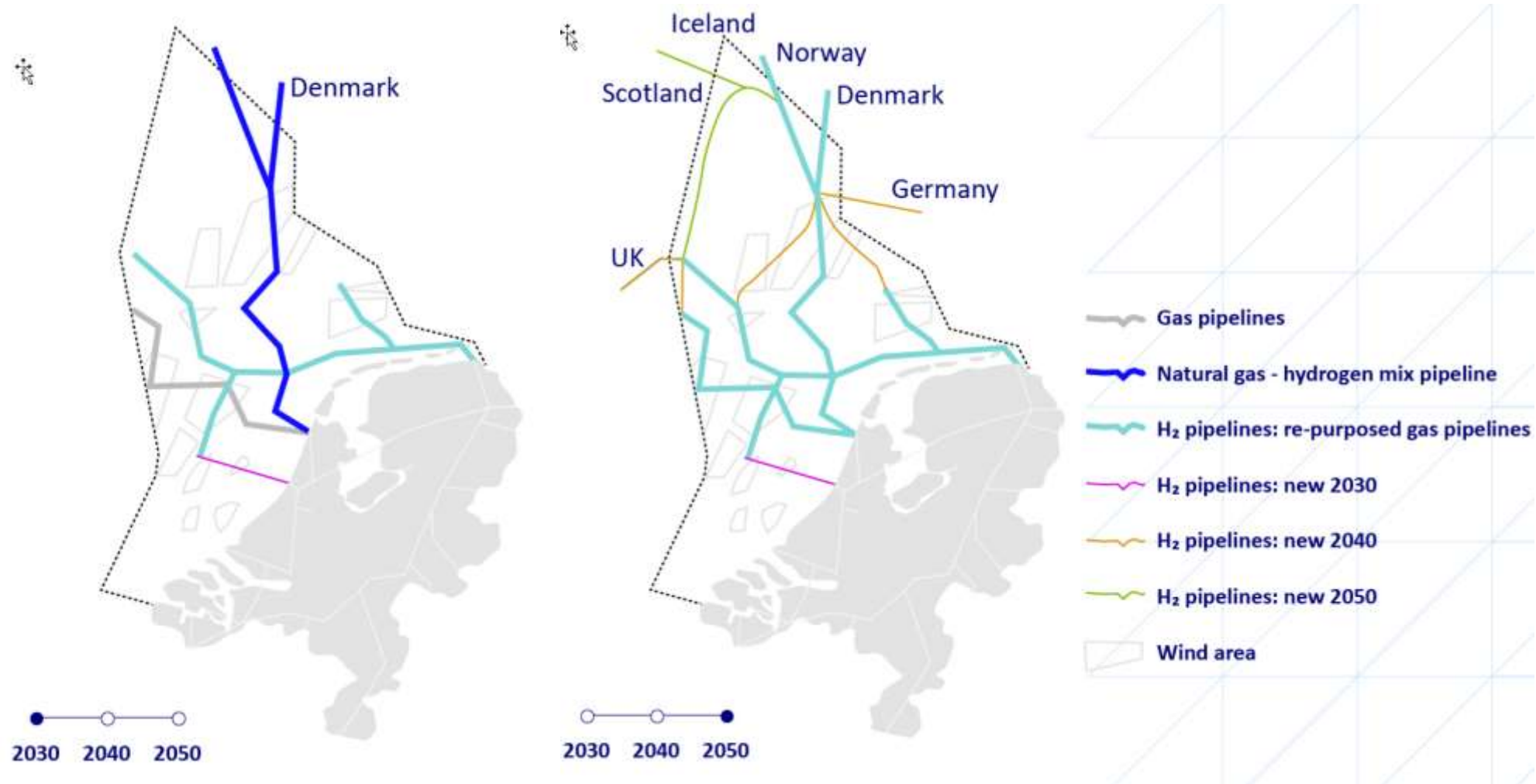


A cost effective offshore wind energy development scenario

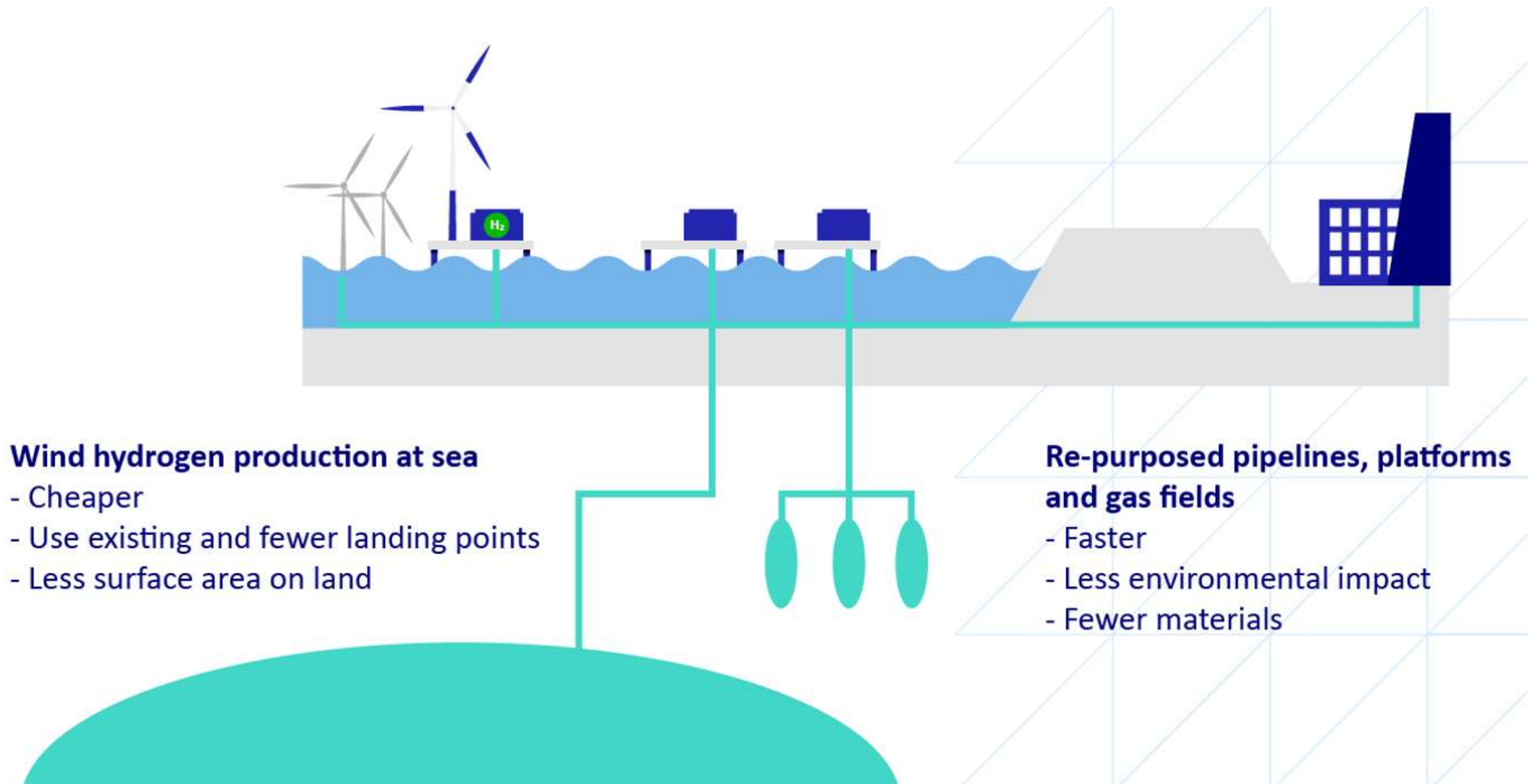
- Wind electricity production up to 75 km from shore
- Wind hydrogen production more than 100 km from shore
- Wind electricity and/or hydrogen production between 75-100 km from shore



Roadmap Dutch North Sea: re-purpose gas pipelines for hydrogen



Why now move to offshore wind hydrogen production at sea?



The Future for Steel Plant and site IJmuiden



Tata Steel IJmuiden
7 million ton steel per year
12,5 Million ton CO₂ emissions/year
7% of Dutch CO₂ emissions

DRI (Directed Reduced Iron) Plants on Natural Gas mature technology

Emirates Steel



Two Modules:

2.0 Mtpy each

Carbon 1.5-2.5%

Met. 94%-96%

Hot DRI feed to EAF

Startup 2009/2011

Suez Steel



One Module:

2.0 Mtpy

Carbon 3.0-4.0%

Met. 94%-96%

Hot DRI feed to EAF

Startup 2013

Nucor



One Module:

2.5 Mtpy

Carbon 3.0-4.5%

Met. 94%-96.5%

Cold DRI

Startup 2013

Ezz Steel



One Module:

1.95 Mtpy

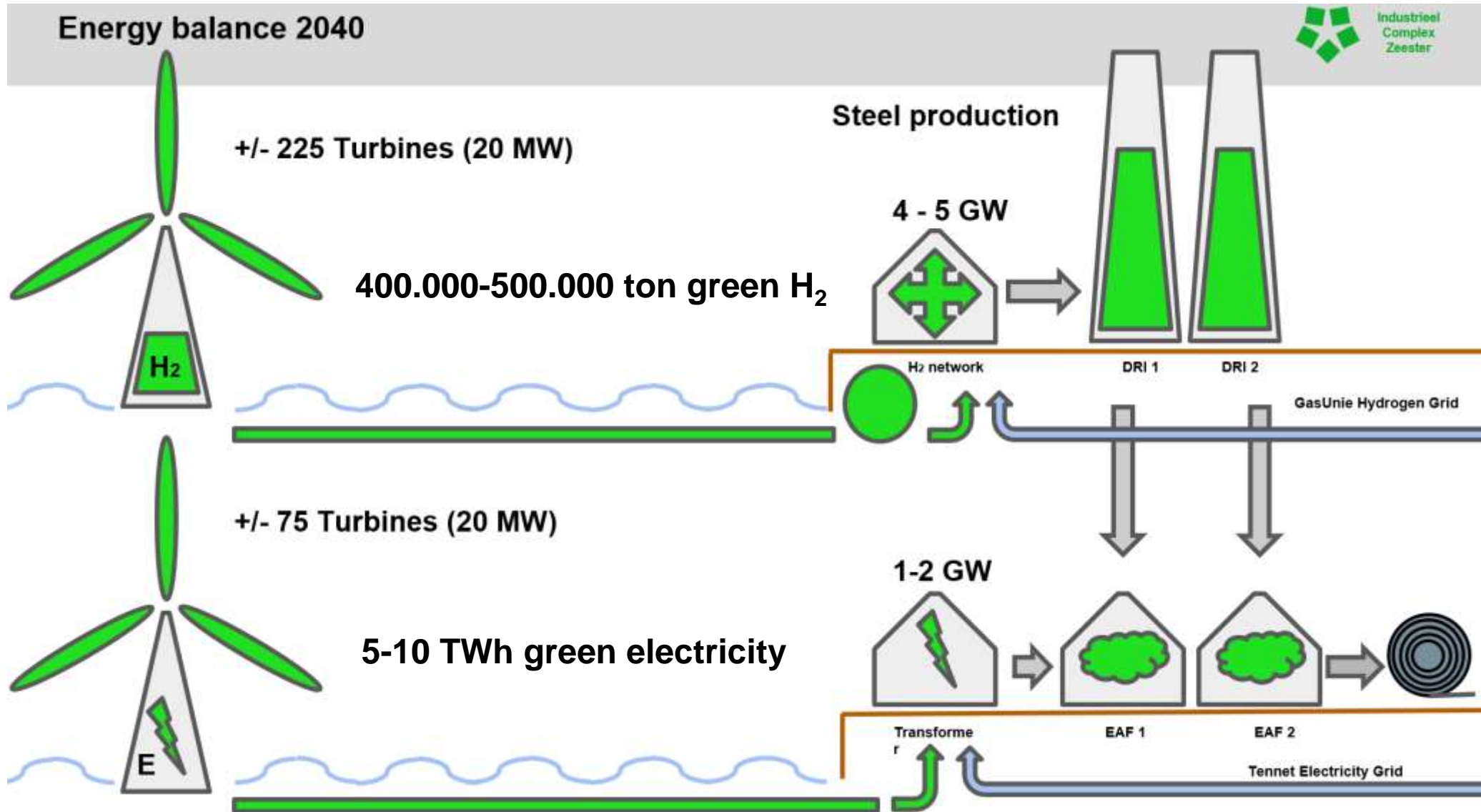
Carbon 1.5-2.5%

Met. 94%-96%

Cold DRI

Startup 2015

Tata Steel on 'base load' green hydrogen and electricity



Manufacturing Offshore Wind Turbine components only possible at the coast, because of Size and Weight

Offshore wind turbine
about 100 ton steel per MW

Foundations, Mast, Nacelle

15 MW wind turbine nacelle



IJmuiden location with deep sea harbor and space for

- Integrating steel and wind turbine component manufacturing
- Assembly and Repair floating wind turbines