



# **Ekspertyza**

**wykonana na rzecz Województwa Wielkopolskiego**  
(część 1)

**Warszawa 23.10.2020**



Polska



---

## Spis treści

Wstęp .....	3
1. Analiza technologii wodorowych oraz trendów rozwoju, popytu na produkty i usługi .....	4
1.1. Analiza technologii wodorowych .....	4
1.1.1. Produkcja i kondycjonowanie wodoru (poziom pierwszy) .....	4
1.1.2. Magazynowanie wodoru (poziom pierwszy) .....	15
1.1.3. Transport i dystrybucja wodoru (poziom pierwszy) .....	20
1.1.4. Wykorzystanie wodoru (poziom drugi) .....	22
1.1.5. Produkty i usługi powiązane i wspierające poziom pierwszy i drugi (poziom trzeci) .....	28
1.2. Rozwój rynku wodorowego z perspektywy europejskiej .....	28
1.2.1. Strategie wodorowe w Europie .....	28
1.2.2. Analiza europejskiego rynku wodorowego na kolejne lata pod kątem popytu i trendów ..	33
1.2.3. Zestawienie najważniejszych regulacji polskich i europejskich .....	38
Spis tabel, schematów i rysunków .....	39
Załącznik A: Zestawienie najważniejszych regulacji polskich i europejskich .....	40

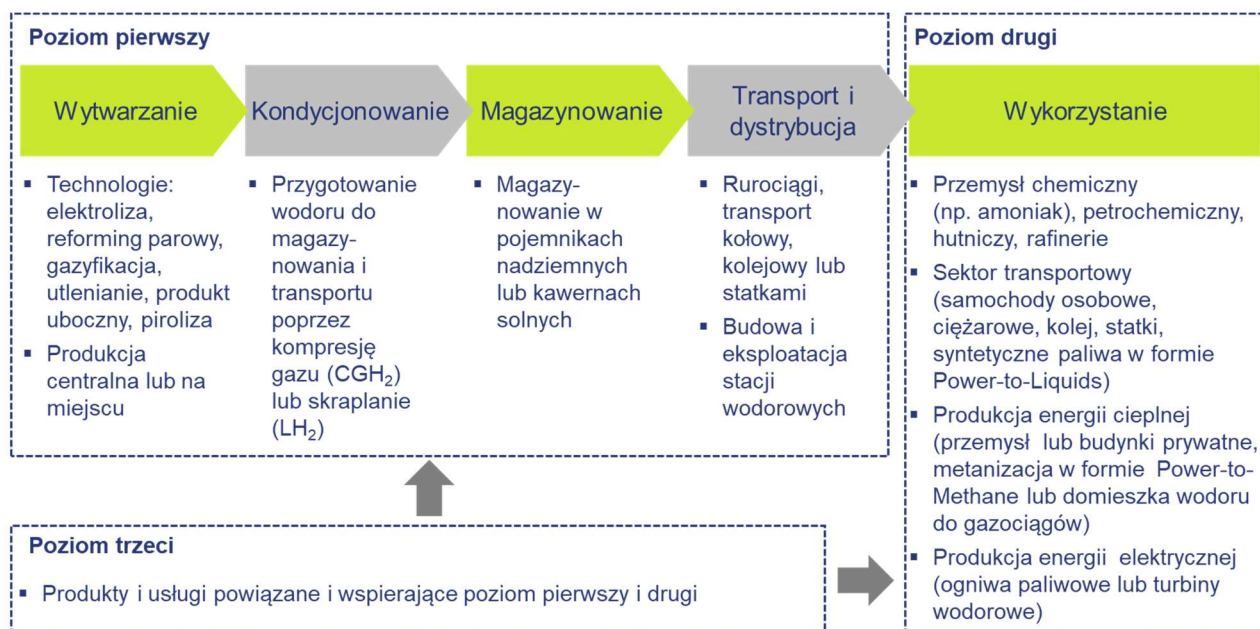
## Wstęp

Małe i średnie przedsiębiorstwa (MŚP) odgrywają istotną rolę w generowaniu wzrostu gospodarczego, tworzeniu miejsc pracy i zwiększaniu innowacyjności w Europie. MŚP stanowią ponad 90% wszystkich przedsiębiorstw i zatrudniają dwie trzecie ludności aktywnej zawodowo. Wodór, jako uniwersalny nośnik energii oraz jego różnorodne zastosowania nie tylko ułatwiają osiągnięcie celów klimatycznych pod kątem zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych i wprowadzaniu odnawialnych źródeł energii (OZE), ale także mają pozytywny wpływ na rozwój gospodarki i powstawanie nowych miejsc pracy. Pierwsze elementy gospodarki wodorowej powstają już dzisiaj na całym świecie w Europie, w tym w Polsce.

Ekspertyza zawiera podstawową analizę krytycznych technologii oraz rynków wodorowych pod kątem możliwości udziału wielkopolskich firm w danych rynkach. Zawarto tu również specjalizacje wszystkich trzech poziomów łańcucha dostaw w Gospodarce Wodorowej wraz z predykcją rozwoju tego rynku na tle strategii najbardziej rozwiniętych gospodarczo europejskich krajów. Opracowanie kończy zestawienie obowiązujących polskich i europejskich regulacji.

Łańcuch dostaw w gospodarce wodorowej – 3 poziomy:

- **Poziom pierwszy:** produkcja, kondycjonowanie, magazynowanie i transport wodoru,
- **Poziom drugi:** produkty i usługi wykorzystujące technologie wodorowe i/lub wodór,
- **Poziom trzeci:** produkty i usługi powiązane i wspierające punkt 1. i 2.



Schemat 1. Trzy poziomy wchodzące w skład łańcucha dostaw w gospodarce wodorowej

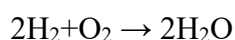
## 1. Analiza technologii wodorowych oraz trendów rozwoju, popytu na produkty i usługi

### 1.1. Analiza technologii wodorowych

Wodór jest najpowszechniejszym z pierwiastków we wszechświecie, ale rzadko występuje na ziemi w czystej i wolnej postaci, tzn. jako H<sub>2</sub>. Jego stężenie w powietrzu atmosferycznym wynosi 0,00005%. Najczęściej występuje jako składnik innych związków chemicznych, m.in. jako związek z tlenem w postaci H<sub>2</sub>O, czyli wody.

Tab.1 Właściwości fizyczne wodoru	
Stan skupienia	gazowy
Gęstość	0,0899 kg/m <sup>3</sup>
Barwa	bezbarwny
Zapach	bez zapachu
Temperatura topnienia	-259,13 st. Celsjusza
Temperatura wrzenia	-252,88 st. Celsjusza
Temperatura krytyczna	-239,9 st. Celsjusza
Ciśnienie krytyczne	1,3 MPa
Ciepło parowania	0,44936 kJ/mol
Ciepło topnienia	0,05868 kJ/mol
Ciśnienie pary nasyconej	209 Pa (23 K)
Prędkość dźwięku	1270 m/s (298,15 K)

W warunkach standardowych, wodór gazowy występuje w formie cząsteczkowej H<sub>2</sub> jako bezbarwny, bezwonny, bezsmakowy, nietoksyczny, łatwopalny gaz. Wartość opałowa wodoru jest wysoka i wynosi 120 MJ/kg (dla porównania wartość opałowa węgla wynosi ok. 25 MJ/kg, a gazu ziemnego ok. 36 MJ/kg). Taka postać nietoksycznego oraz łatwopalnego gazu umożliwia jego transport, magazynowanie oraz stosowanie jako np. paliwo. Co więcej, podczas reakcji wodoru z tlenem powstaje woda. Jest więc paliwem „czystym” niepowodującym zanieczyszczenia środowiska:



Wodór może łączyć się również z metalami, tworząc związki zwane wodorkami (Mg<sub>2</sub>FeH<sub>6</sub> i LaNi<sub>5</sub>H<sub>6</sub>) oraz z ciekłymi nośnikami organicznymi, ta forma zwana jest LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carrier).

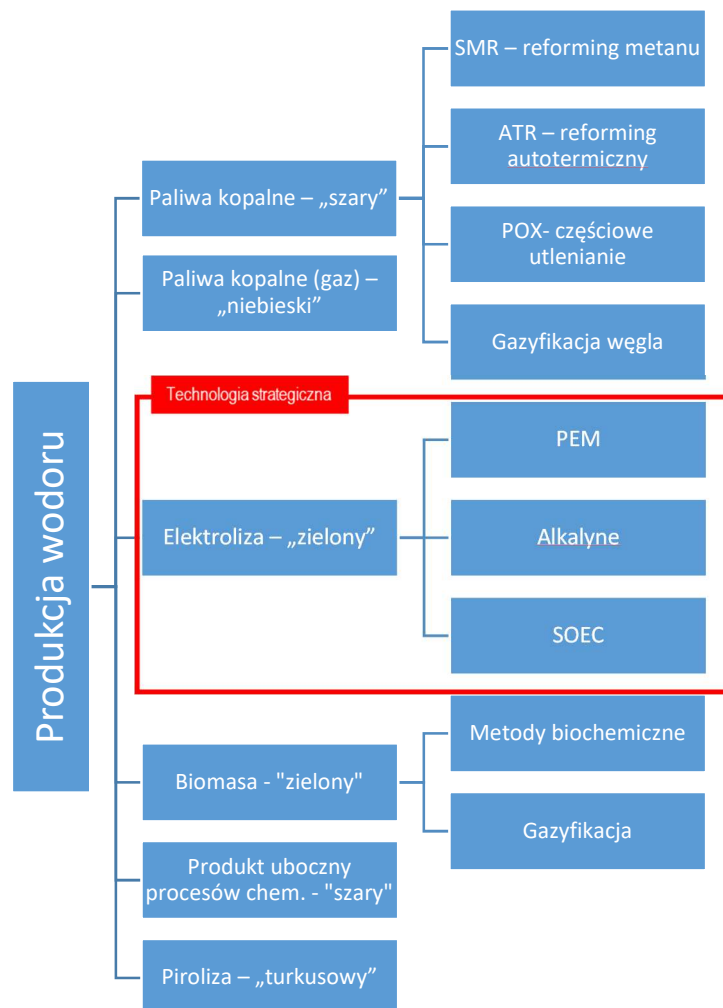
#### 1.1.1. Produkcja i kondycjonowanie wodoru (poziom pierwszy)

Ze względu na technologię wytwarzania wodoru produkowany wodór można oznaczyć umownie kolorami. Poniżej najpopularniejsze:

- **Wodór „szary”**: produkowany z paliw kopalnych poprzez np. reforming gazu ziemnego, reforming autotermiczny, gazyfikację węgla
- **Wodór „niebieski”**: pozyskiwany z paliwa kopalnego gazu ziemnego w połączeniu z magazynowaniem dwutlenku węgla

- **Wodór „turkusowy”**: wytwarzany poprzez pirolizę gazu ziemnego, obecnie nie odgrywa znaczącej roli
- **Wodór „zielony”**: wytwarzany poprzez elektrolizę, przy użyciu energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii lub z biomasy.

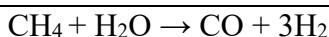
Schemat 2 Rodzaje wodoru ze względu na technologię produkcji



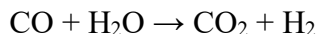
Na schemacie powyżej możemy zaobserwować jak wiele jest metod produkcji wodoru. Jedne są znane od dziesięcioleci, inne dopiero opracowywane i w fazie testowania. Unia Europejska zdecydowała w dbałości o klimat, że w długoterminowej perspektywie popierać będzie jedynie produkcję wodoru nazwanego „zielonym”. Aby zrozumieć właściwości i wyjątkowość tej metody produkcji, trzeba poznać inne, powszechnie stosowane również w naszym kraju.

### Wodór „szary”

Najpopularniejszą i najtańszą formą produkcji wodoru „szarego” jest: reforming parowy – proces produkcji wodoru z metanu i pary wodnej. W temperaturze 700–1100°C, w obecności katalizatora metalicznego, para wodna reaguje z metanem tworząc gaz syntezowy złożony z tlenku węgla i wodoru:



Następnie w wyniku reakcji tlenku węgla z parą wodną uzyskuje się dalszy wzrost ilości wyprodukowanego wodoru:

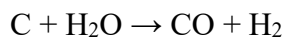


Reforming parowy gazu ziemnego to najpopularniejsza i najtańsza metoda produkcji wodoru. W porównaniu do np. elektrolizy wody, ilość otrzymanego wodoru na użytą jednostkę energii jest większa. Proces ten wymaga jednak paliw kopalnych oraz zmagazynowania produktu ubocznego, jakim jest dwutlenek węgla.

W procesie reformingu autotermicznego (ATR) jednocześnie prowadzone są etapy częściowego spalania metanu (uzyskiwane jest ciepło) i konwersji parowo-tlenowej. W celu otrzymania czystego wodoru uzyskany gaz syntezowy poddaje się dalszej obróbce. Aby usunąć CO, prowadzony jest proces konwersji CO do CO<sub>2</sub> w dwóch etapach: wysokotemperaturowym (400°C, katalizator Fe-Cr) i niskotemperaturowym (220°C, katalizator Cu). Następnie usuwa się pozostałości CO w procesie metanizacji. Ostatecznie czysty wodór uzyskuje się po absorpcji CO<sub>2</sub> w aktywowanym K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> roztworze KOH. Na wykorzystaniu wodoru otrzymanego z gazu syntezowego oparta jest prawie cała produkcja amoniaku, a w konsekwencji przemysł związków azotowych (NH<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub>, azotany, nawozy azotowe, mocznik i inne).

Kolejnym sposobem na pozyskanie wodoru z surowców węglowodorowych (ropa naftowa, gaz ziemny, węgiel) jest proces częściowego utleniania (POX – ang. Partial Oxidation). Polega on na częściowym spalaniu stechiometrycznej mieszaniny paliwa z powietrzem w reformerze, tworząc gaz syntezowy bogaty w wodór.

Inne możliwe sposoby produkcji to np. zgazowanie - gazyfikacja węgla – proces przemiany m.in. węgla kamiennego (np. w złożu) w gaz zawierający wodór. W procesie wykorzystywana jest silnie endotermiczna reakcja węgla z parą wodną, której produktami są: wodór i tlenek węgla, który jak w przypadku reformingu parowego reaguje z parą wodną. Finalnymi produktami są wodór i dwutlenek węgla. Cały proces wymaga dostarczenia znacznej ilości energii:



Podsumowując, metoda zgazowania polega głównie na podgrzaniu węgla do temperatury około 900°C i reakcjach w obecności pary wodnej.

Główną wadą przy produkcji wodoru poprzez reforming, czy zgazowanie, jest wykorzystanie paliw kopalnych (nieodnawialnych) oraz produkt uboczny tych procesów – dwutlenek węgla, co jest sprzeczne z celem dekarbonizacji przemysłu i transportu, jest więc sprzeczne ze strategią europejską.

Polska jest jednym z największych producentów wodoru w Europie. W drugim kwartale 2020 roku zajmowaliśmy 5 miejsce w produkcji wodoru szarego. Poniższa grafika przedstawia największych polskich interesariuszy w sektorze wodorowym.

Rys.1 Najwięksi polscy interesariusze w sektorze wodorowym (producenci)



Aby sprostać wymaganiom norm jakości wodoru (np. w transporcie) wymagane jest oczyszczenie gazu o ile nie został on wyprodukowany przez elektrolizery. Poniżej przedstawiono metody, jakie są dziś używane:

Tab.2 Metody oczyszczania wodoru

Metoda oczyszczania	Wprowadzona substancja	Czystość wodoru (w proc.)	Odzysk wodoru (w proc.)
Rozdzielenie kriogeniczne	Gazy odlotowe z przemysłu petrochemicznego oraz rafinerii	90-98	95
Dyfuzja membraną polimerową	Gazy odlotowe z rafinerii i oczyszczony amoniak w formie gazowej	92-98	>85
Separacja wodorkami metali	Oczyszczony amoniak w formie gazowej	99	75-95
Stałe polimerowe ogniwa elektrolitowe	Wodór z cykli termochemicznych	99,8	95
Adsorpcja zmiennociśnieniowa	Każdy gaz bogaty w wodór	99,999	70-85
Oczyszczanie katalityczne	Wodór zanieczyszczony tlenem	99,999	< 99
Dyfuzja membraną palladową	Każdy gaz zawierający wodór	>99,999	< 99

Źródło: Braxenholm (2016).

Wykorzystywanie wodoru w celu dekarbonizacji gospodarki wymaga pozyskiwania go w sposób niegenerujący emisji. Jednak dziś wodór używany jest głównie w przemyśle rafineryjnym i chemicznym i powstaje niemal wyłącznie w procesach reformingu parowego gazu ziemnego lub zgazowania węgla. Obie metody wiążą się z emisją CO<sub>2</sub>.

---

## **Wodór „niebieski”**

Ogniwem pośrednim, z punktu widzenia strategii europejskiej, pomiędzy wodorem „szarym”, a „zielonym” jest wodór „niebieski”. Jest on również brany pod uwagę w kontekście dekarbonizacji gospodarki. Pozyskiwany jest on z gazu ziemnego z wykorzystaniem technologii sekwestracji dwutlenku węgla (CCS, ang. carbon capture and storage). Wodór niebieski traktowany jest jednak jako rozwiązanie przejściowe. Ze względu na szeroką dostępność gazu ziemnego i niższe niż w przypadku zielonego wodoru koszty jest on rozważany poważnie, jako jeden z kluczowych elementów wielu strategii krajów europejskich. Wodór niebieski nie jest jednak produktem bezemisyjnym, bowiem podczas wydobycia i transportu gazu ziemnego do atmosfery dostaje się metan. Należy też pamiętać o problemie podziemnego składowania wychwyconego dwutlenku węgla.

## **Wodór „turkusowy”**

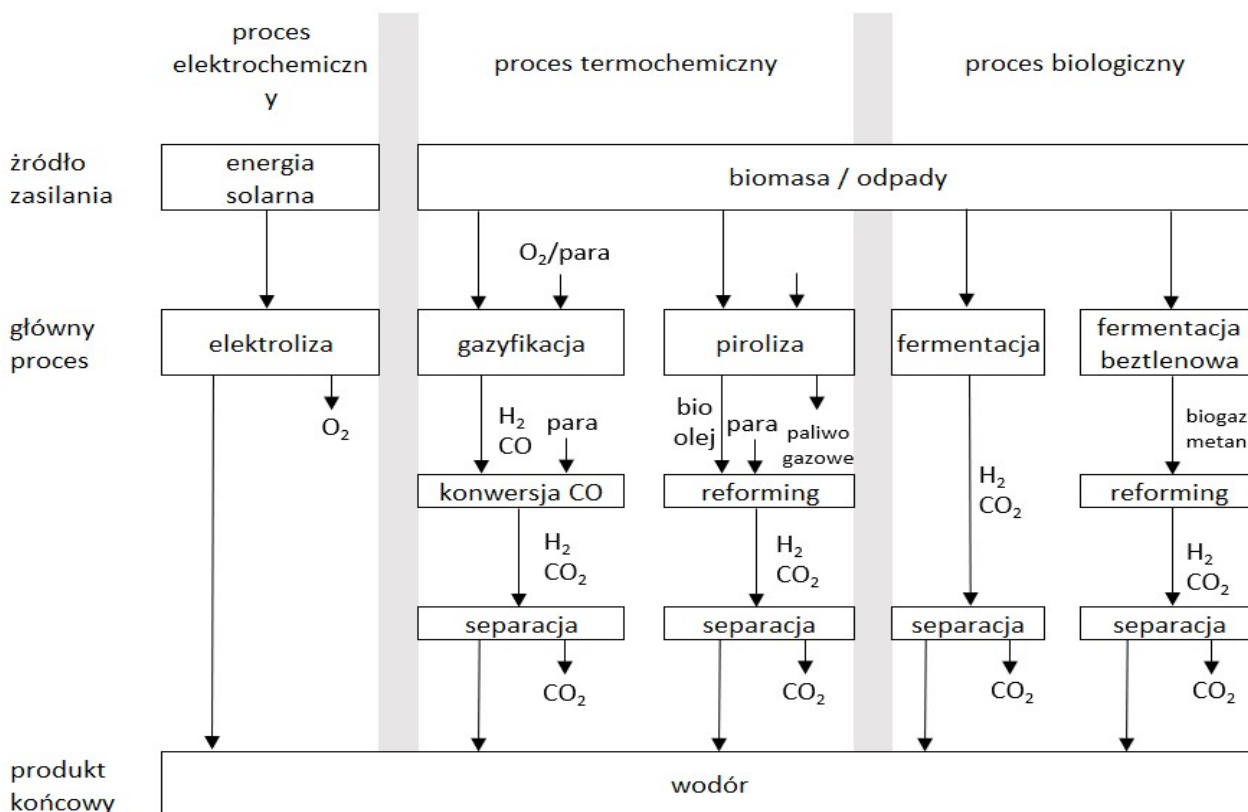
Należy również wspomnieć o mniej znanej metodzie pozyskiwania wodoru, a mianowicie o pirolizie metanu, której produkt to wodór turkusowy. W tym procesie gaz ziemny jest podgrzewany do wysokich temperatur w celu oddzielenia wodoru od węgla. Ta technika znana jest jako wychwytywanie i utylizacja dwutlenku węgla (CCU, carbon capture and utilisation). Metoda ta jest wciąż mało dopracowana i mało popularna.

## **Wodór „zielony”**

Ze względu na dekarbonizację najbardziej interesujące są procesy, w wyniku których produkowany jest wodór, które czerpią energię z Odnawialnych Źródeł Energii.



## Produkcja wodoru z OZE



Schemat 3. Produkcja wodoru z OZE

Najbardziej preferowaną w Europie metodą produkcji wodoru jest elektroliza H<sub>2</sub>, czyli szereg reakcji prowadzących do rozpadu związków chemicznych, a następnie rozdzielania produktów takiego rozkładu, na skutek działania napięcia elektrycznego przyłożonego do roztworu dzięki przemieszczaniu się jonów w kierunku podłączonych do układu elektrod. Metoda ta pozwala na otrzymanie wodoru najwyższej czystości, tzn. przekraczającej 99,999%.

Obecnie stosowane są najczęściej dwa typy najbardziej popularnych elektrolizerów różniące się przede wszystkim rodzajem elektrolitu:

- alkaliczne (elektrolitem jest np. wodny roztwór KOH lub NaOH, mogą pracować w zakresie temperatur od 20 do 120°C przy ciśnieniu 1-30 barów i sprawności 50-82%),
- PEM (Proton Exchange Membrane - polimerowa membrana wymiany protonów, gdzie elektrolitem jest stały polimer kwasu perfluorosulfonowego - PFSA, który równocześnie pełni rolę membrany wymiany protonów, a tego typu elektrolizery mogą pracować w zakresie temperatur od 20 do 80°C przy ciśnieniu 1-80 barów i sprawności 60-80%).

W poniższej tabeli zaprezentowano porównanie parametrów dwóch wspomnianych powyżej elektrolizerów: alkalicznego i z polimerową membraną wymiany protonów (PEM).

Tab.3 Porównanie parametrów elektrolizera alkalicznego i z PEM

Dane techniczne	Elektrolizer alkaliczny	Elektrolizer PEM
Elektrolit	25%-30% roztwór KOH lub NaOH	Stały polimer kwasu PFSA
Nośnik ładunku	OH-	H+
<b>Materiał katody</b>	<b>nikiel</b>	<b>platyna</b>
Materiał anody	nikiel/ kobalt / żelazo	iryd/ ruten
Zakres temperatur pracy [ $^{\circ}\text{C}$ ]	20-120	20-90
Zakres ciśnień [MPa]	0,1-20	0,1-5 (70)
Standardowe gęstości prądu [ $\text{A}/\text{cm}^2$ ]	0,2-0,5	0,6-3,0
Napięcie pojedynczej komórki elektrolitycznej [V]	1,8-2,4	1,8-2,2
<b>Sprawność [%]</b>	<b>50-82</b>	<b>65-90</b>
Zużycie energii komórek elektrolitycznych [ $\text{kWh}/\text{Nm}^3 \text{H}_2$ ]	4,2-5,9	4,2-5,6
Zużycie energii generatora wodoru [ $\text{kWh}/\text{Nm}^3 \text{H}_2$ ]	4,5-7,0	4,5-7,5
Wydajność produkcji wodoru [ $\text{Nm}^3/\text{h}$ ]	1-500	0,01-250
<b>Najniższe częściowe obciążenie [%]</b>	<b>20-40</b>	<b>0-0</b>
Trwałość komórki elektrolitycznej [h]	<100 000	10 000 - 50 000
<b>Żywotność generatora [lat]</b>	<b>20-30</b>	<b>10-20</b>
Właściwości wody zasilającej	W postaci ciekłej	Dejonizowana, opór właściwy $\rho > 1 \text{ M}\Omega\text{cm}$
<b>Koszt urządzenia [€/kW]</b>	<b>500-1000</b>	<b>1000-3200</b>

Małe elektrolizery są w stanie wyprodukować do ok. 10 – 20 kg wodoru dziennie. Duże zespoły elektrolizerów, np. 25 elektrolizerów o mocy 4 MW każdy, składających się na platformę elektrolizerów o sumarycznej mocy 100 MW, zajmujących powierzchnię 4500 m<sup>2</sup>, są w stanie wyprodukować do 20 000 Nm<sup>3</sup>/h, tj. 42 tony wodoru dziennie.

Obecnie na świecie prowadzone są prace w kierunku dalszego doskonalenia technologii elektrolizerów. Poniższa tabela (na podstawie: Technology 2015) szacowała ich rozwój pięć lat temu. Dziś cele nie zmieniły się, nadal trwa walka przede wszystkim o minimalizację kosztów produkcji zielonego wodoru, tak by były, choć porównywalne z kosztami produkcji wodoru szarego.

Tab.4 Plany rozwoju technologii elektrolizerów

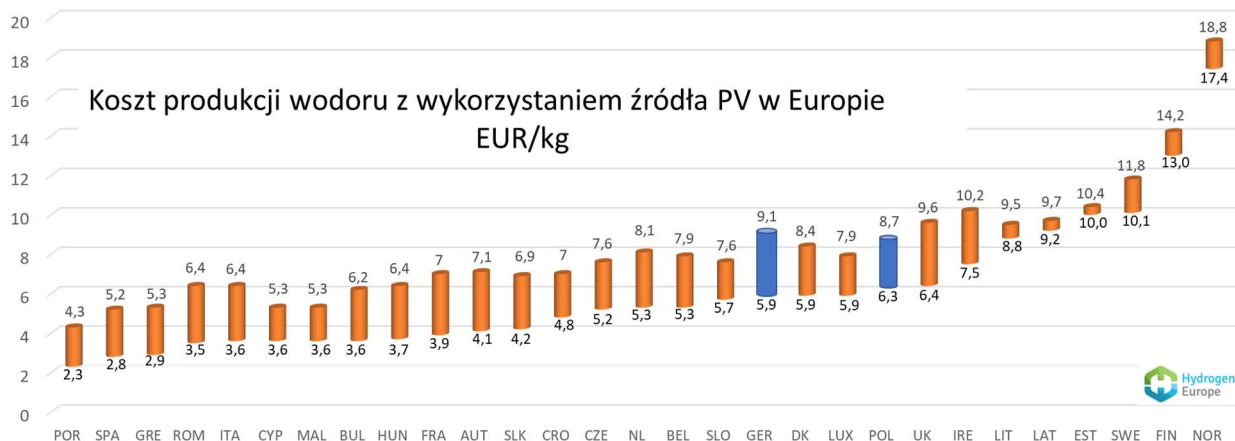
Urządzenie	Zakres prac	Spodziewany przełom
Wszystkie typy elektrolizerów	Optymalizacja technologii z naciskiem na redukcję kosztów. Poprawa szybkości uruchamiania oraz zmniejszenie zużycia energii.	2020-2030
Elektrolizery polimerowe	Redukcja kosztów do 670 EUR za 1 kW poprzez optymalizację produkcji membran polimerowych, bardziej odpornych i o obniżonej zawartości katalizatora. Zwiększenie sprawności do ponad 80%. Zwiększenie żywotności, do co najmniej 50 tys. h. Zwiększenie mocy stosu do kilku MW. Zwiększenie całkowitej mocy instalacji do skali 100 MW. Zwiększenie szybkości rozruchu w celu dostosowania się do wymogów rynku energii i regulacji pierwotnej.	2025-2030
Elektrolizery alkaliczne	Zmniejszenie nakładów inwestycyjnych do poziomu poniżej 670 EUR za 1 kW. Zwiększenie sprawności do ponad 75%. Zwiększenie gęstości prądu dzięki wyższej temperaturze i ciśnieniu roboczym. Zmniejszenie kosztów eksploatacji i konserwacji. Zwiększenie elastyczności operacyjnej poprzez obniżenie minimalnego obciążenia. Zmniejszenie ciśnienia roboczego w celu zminimalizowania konieczności sprężania wodoru.	2025-2030

Do przeprowadzenia procesu elektrolizy niezbędną jest energia elektryczna. W przypadku zastosowania do elektrolizy energii ze źródła odnawialnego (np. energii z elektrowni wiatrowej czy paneli fotowoltaicznych) powstający w ten sposób wodór kwalifikuje się jako „zielony wodór”.

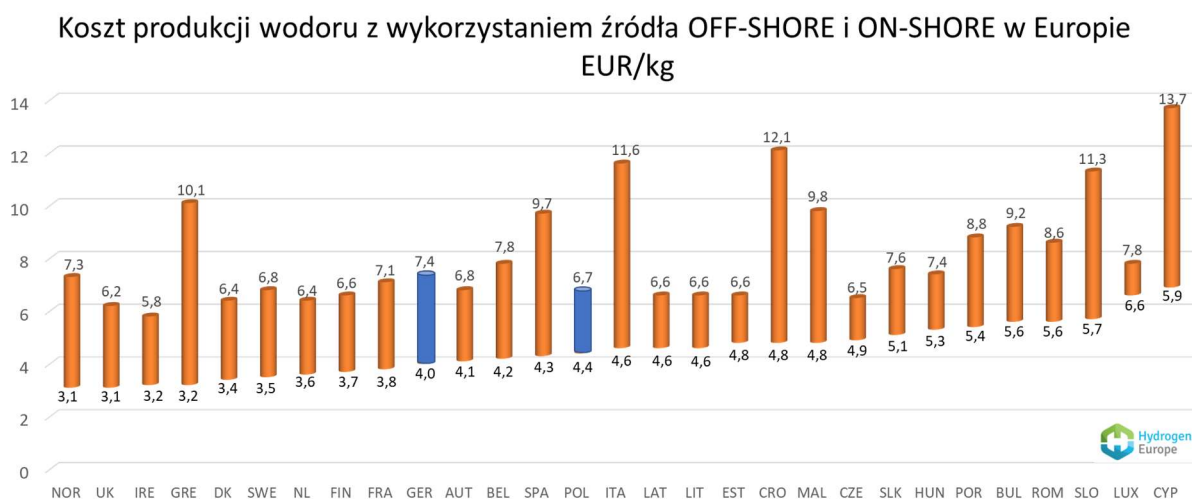
Jak dotąd największą instalacją na świecie produkującą zielony wodór jest japońska instalacja<sup>1</sup> o mocy 10 MW zasilana instalacją fotowoltaiczną o mocy 20 MW, która wytwarza ok. 100 kg wodoru na godzinę. Na terenie Unii Europejskiej największą instalacją jest instalacja w okolicach Linzu z elektrolizerem o mocy 6 MW zasilanym energią odnawialną<sup>2</sup>. Koszt instalacji wyniósł 3 mln € / 1 MWh. Obecnie szacuje się, że średni koszt produkcji 1 kg zielonego wodoru w Europie wynosi ok 5 EUR/ kg, natomiast wodoru z paliw kopalnych ok. 1,7 EUR / kg. Koszt zielonego wodoru jest więc średnio 3-krotnie większy. Zestawienia prezentowane poniżej analizują koszt produkcji zielonego wodoru w zależności od kraju i źródła OZE. Dane zbierane były w pierwszej połowie 2020 roku.

<sup>1</sup> Fukushima [<https://www.energy-storage.news/news/hydrogen-electrolysis-using-renewable-energy-begins-at-10mw-fukushima-plant>]

<sup>2</sup> Uruchomienie projektu odbyło się 2019 roku



Rys.2



Rys.3

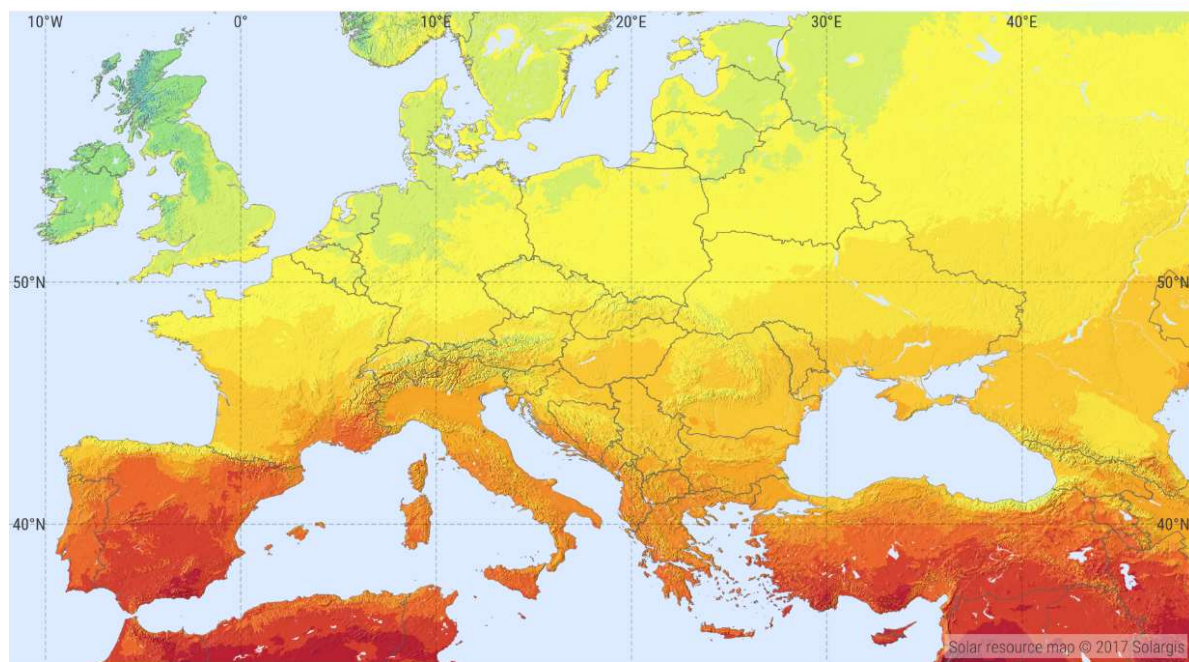
Legenda:

- PV – fotowoltaika, tu mowa o farmach z instalacjami fotowoltaicznymi
- OFF-SHORE – morskie farmy wiatrowe
- ON-SHORE – lądowe farmy wiatrowe

Różnice wynikają nie z używanych technologii, a z warunków klimatycznych poszczególnych krajów Europy. Ich usytuowanie geograficzne predysponuje ich do preferowania różnych źródeł OZE.

## EUROPE

SOLARGIS



Average annual sum of PVOUT, period 1994-2016

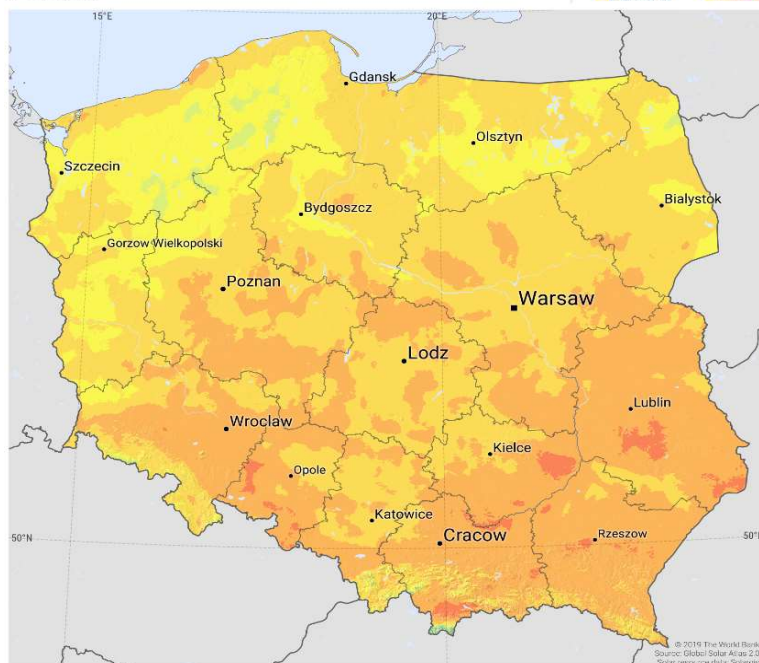


500 km

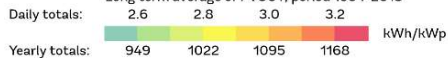
Rys.4 Potencjał OZE (PV) w Europie

## POLAND

ESMAP SOLARGIS

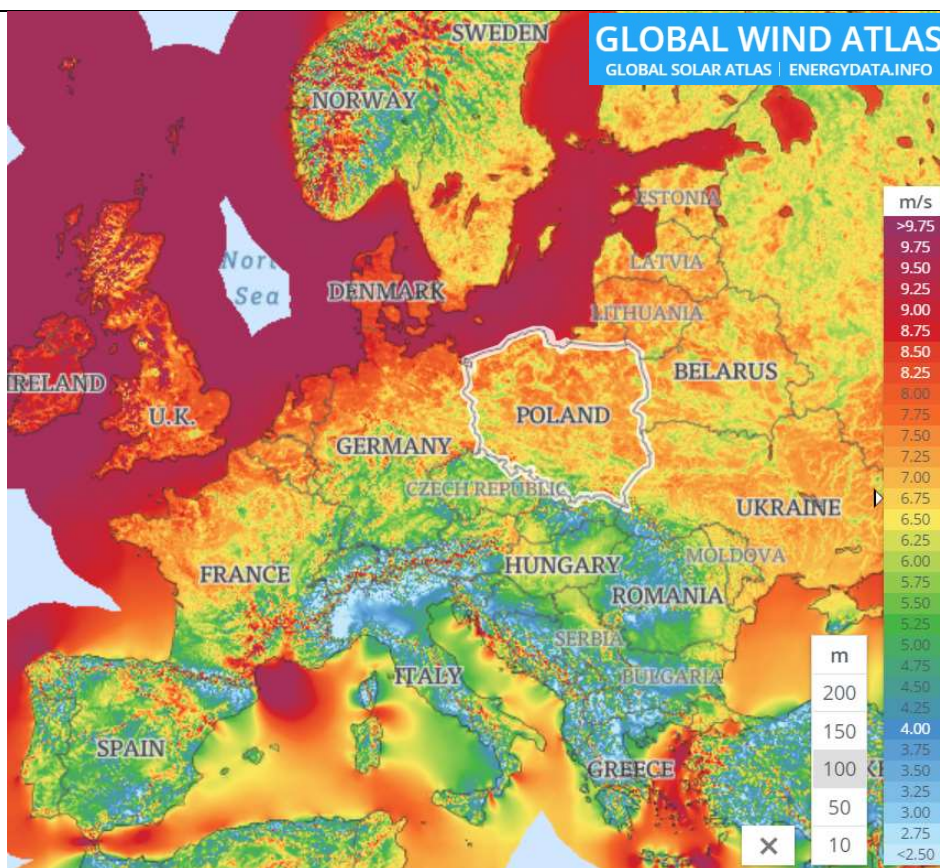


Long term average of PVOUT, period 1994-2018

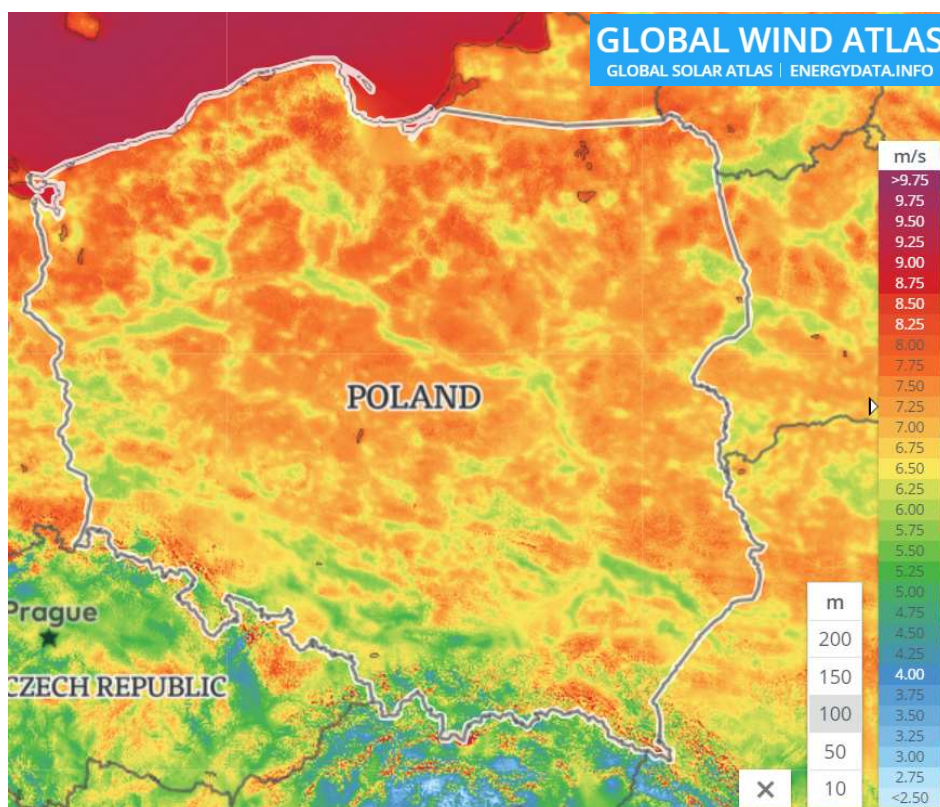


50 km

Rys.5 Potencjał OZE (PV) w Polsce



Rys.6 Potencjał OZE (farmy wiatrowe) w Europie



Rys.7 Potencjał OZE (farmy wiatrowe) w Polsce

Hydrogen Council podaje, że średni koszt pozyskiwania zielonego wodoru spadł przez ostatnie 10 lat o ponad połowę, a do 2030 r. możliwa jest redukcja o kolejne ok. 60%<sup>3</sup>. Międzynarodowa Agencja Energii Odnawialnej szacuje zaś, że wytwarzanie tego surowca z wykorzystywaniem prądu z OZE w najdogodniejszych lokalizacjach (np. wysoka wietrzność) może się stać konkurencyjne ekonomicznie nawet w ciągu trzech–pięciu lat.<sup>4</sup>

Podobnie jak piroliza, produkcja wodoru z biomasy jest wciąż mało dopracowaną i mało popularną metodą, która polega na wykorzystaniu biomasy jako surowca odnawialnego i produkcji z niej bioetanolu, a dalej jego reforming do wodoru. Możliwe sposoby otrzymywania wodoru z biomasy to również: ciemna fermentacja, fotofermentacja, biofotoliza, biokatalityczna elektroliza, piroliza biomasy i gazyfikacja biomasy. Jest to rozwiązanie przyjazne dla środowiska, gdyż pozwala ograniczyć emisję do atmosfery dwutlenku węgla.

### 1.1.2. Magazynowanie wodoru (poziom pierwszy)

Magazynowanie wodoru jest ważnym aspektem bezpieczeństwa energetycznego. Aby dobrze zrozumieć metody magazynowania, należy wziąć pod uwagę właściwości fizyczne i chemiczne wodoru.

Wodór możemy magazynować w różnych postaciach:

- sprężony gaz
- w postaci ciekłej
- w postaci fizycznych wodorków metali np. LaNi<sub>5</sub> i ZrCr<sub>2</sub>
- w postaci chemicznych wodorków metali np. CaH<sub>2</sub>, KH, LiH, NaH, LiBH<sub>4</sub>, NaBH<sub>4</sub>.

Dla przykładu 1 kg wodoru to:

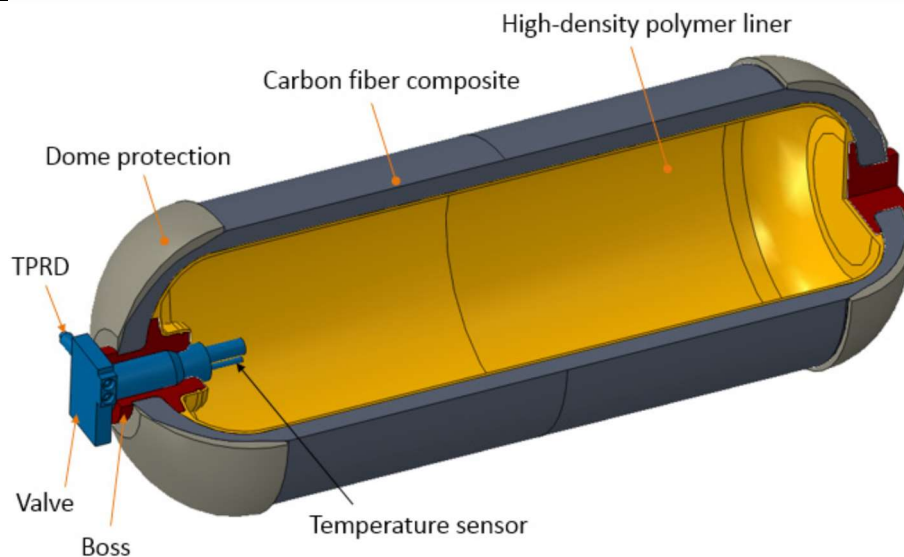
- 27,5 litra gazu sprężonego do 200 bar
- 14,25 litra ciekłego wodoru
- 8,25 litra wodorku LaNi<sub>5</sub>H<sub>6</sub>
- 6,5 litra wodorku Mg<sub>2</sub>Feh<sub>6</sub>.

Istnieje jeszcze metaliczna postać wodoru, która jest nadprzewodnikiem i w przyszłości odegra wielką rolę w magazynowaniu i przesyłaniu energii. Dziś jednak jest to najrzadszy metal na Ziemi wytworzony nakładem olbrzymiej energii (wysokie ciśnienie i niska temperatura) w laboratorium.

Magazyny wodoru można podzielić na małe, mobilne, wielkoskalowe naziemne oraz podziemne kawerny solne. Zbiorniki wodoru muszą przejść dość skomplikowaną procedurę testową. W tym zakresie jest kilka różnych norm narodowych oraz jedna międzynarodowa ISO 15869. Procedura testowa poddaje zbiornik różnym niekorzystnym oddziaływaniom środowiska, np. poddanie oddziaływaniu płomienia i wysokiej temperatury, statyczne ścisnienie zbiornika, pęknięcie (rozsadzenie) hydrostatyczne przy ciśnieniu większym niż 225% ciśnienia roboczego. Wszystko to ze względu na bezpieczeństwo.

<sup>3</sup> Path to Hydrogen competitiveness A cost perspective, Hydrogen Council, styczeń 2020, [www.hydrogencouncil.com](http://www.hydrogencouncil.com)

<sup>4</sup> Hydrogen: A renewable Energy perspective, International Renewable Energy Agency, wrzesień 2019, [www.irena.org](http://www.irena.org)



*(Credit: Process Modelling Group, Nuclear Engineering Division, Argonne National Lab (ANL))*

Rys.8 Mały zbiornik na wodór

Małe zbiorniki wykonane są najczęściej ze:

- stali (wytrzymującej ciśnienie 200 bar),
- aluminium zbrojonym włóknem szklanym/aramidowym lub włóknami węglowymi (maksymalne bezpieczne ciśnienie wynosi tutaj 299 bar),
- kompozytów: włókno szklane/aramid lub włókno węglowe z wkładem metalowym. (maksymalne bezpieczne ciśnienie wynosi tutaj 438 bar),
- włókna węglowego pokrytego warstwą polimerową (maksymalne bezpieczne ciśnienie wynosi tutaj 661 bar, a w przypadku hybryd 900 bar).



© compositesmanufacturingmagazine.com

Rys.9 Zbiornik kompozytowy na wodór



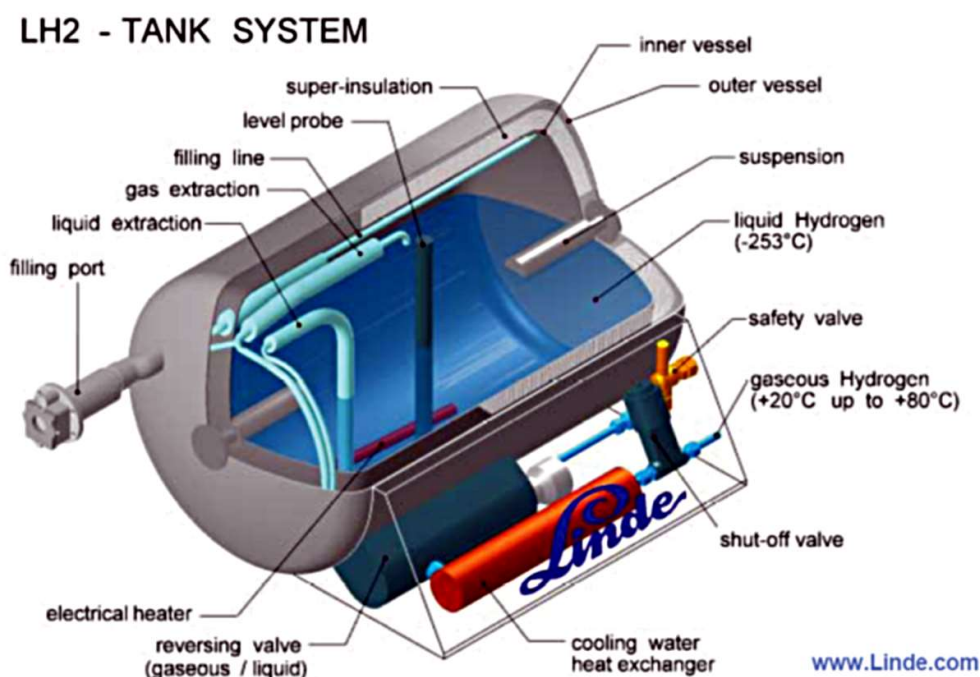
Poniżej porównanie grubości zbiornika na wodór o sprężeniu 200 bar i 700 bar.



Wonga J., Gamboneb L., 70 MPa Fueling Station for Hydrogen Vehicles, Materiały Konferencyjne WHEC 16 / 13-16 June 2006 – Lyon France.

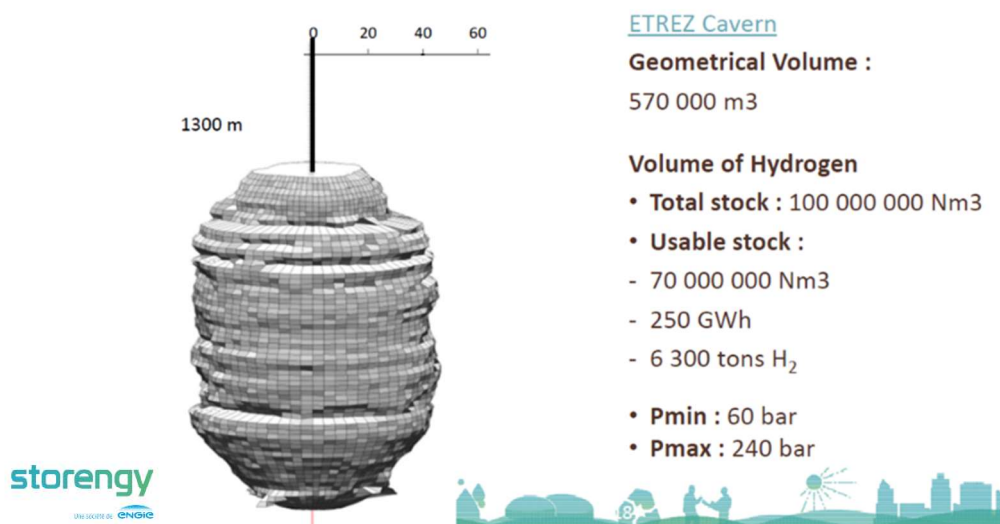
Rys.10 Ścianki zbiorników dostosowane do różnych ciśnień

Dziś istnieje duże zapotrzebowanie na różne wielkości, objętości i kształty zbiorników mobilnych, głównie pod kątem sektora transportowego (kołowy, morski, lotniczy, szynowy). Zbiorniki z ciekłym wodorem są w stanie przechowywać ponad dwa razy więcej wodoru niż porównywalne objętościowo ze sprężonym wodorem. Jest to jednak okupione dużym kosztem skroplenia gazu i utrzymania go w stanie ciekłym, czyli stworzeniu całej instalacji kriogenicznej. Poniżej mamy schemat przekroju takiego zbiornika ciekłego wodoru.



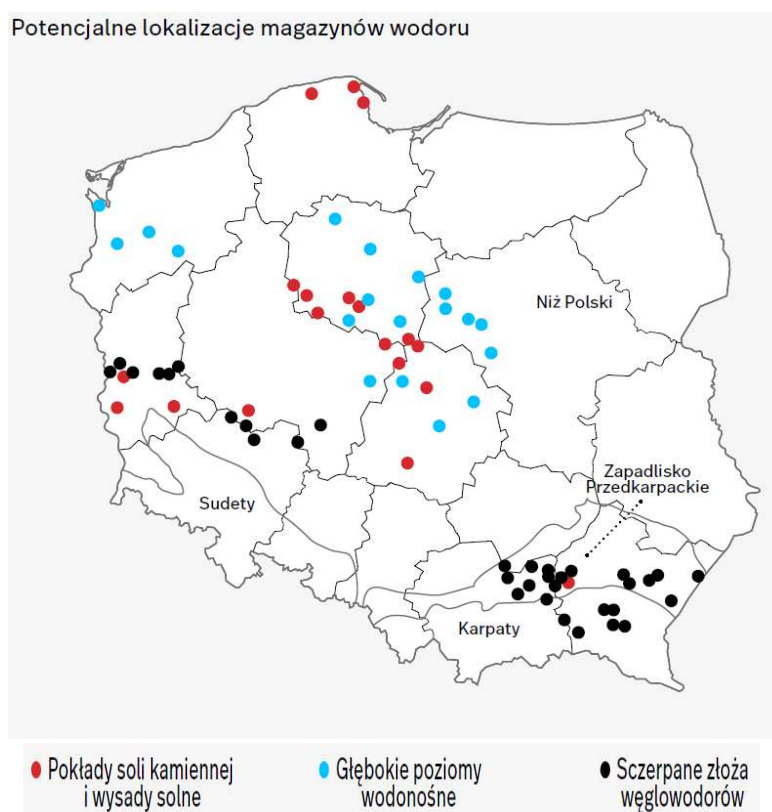
Rys.11 Przekrój zbiornika na ciekły wodór

Magazyny wielkoskalowe naziemne przypominają te, w których magazynowany jest gaz ziemny. Na dużą skalę wodór magazynuje się również w kawernach solnych. Parametry takiego typu podziemnego magazynu pokazuje poniższy przykład. Jest to najtańsza forma magazynowania wodoru w dużej skali. Należy jednak pamiętać, że magazyn wodoru to nie tylko sam zasobnik, ale również przyłącza, zawory, kompresory, czujniki, a w przypadku stanu ciekłego wodoru - również cała instalacja kriogeniczna.



Rys.12 Parametry przykładowej kawerny solnej

Polska ma dość duży potencjał do wykorzystania naszych zasobów kawern do magazynowania wodoru.



Rys.13 Potencjalne lokalizacje podziemnych magazynów wodoru w Polsce





Source: GIEStorage Map 2018 / data as of 1 July 2018

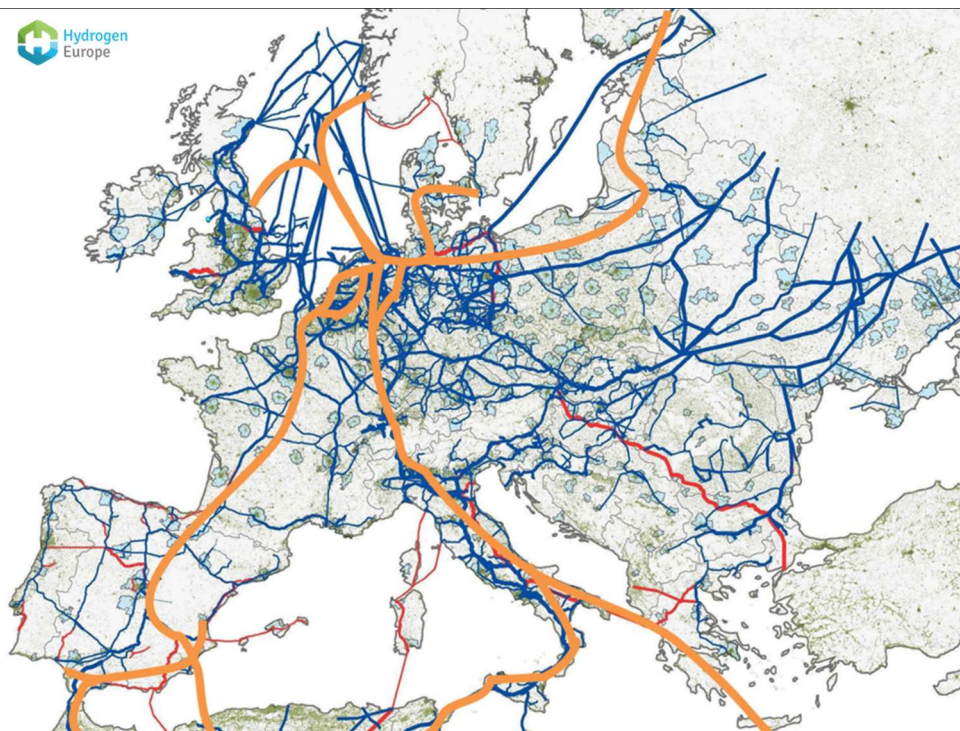
Rys.15 Magazyny podziemne porównanie wykorzystania

### 1.1.3. Transport i dystrybucja wodoru (poziom pierwszy)

Dziś wodor najczęściej jest konsumowany przez przemysł w pobliżu swojej produkcji. Transport na dłuższe odległości nastęrcza bowiem problemów. Przesył wodoru rurociągiem to najtańszy sposób jego transferu, jednak nie każdy rurociąg spełnia wymagania jakie stawia wodor.

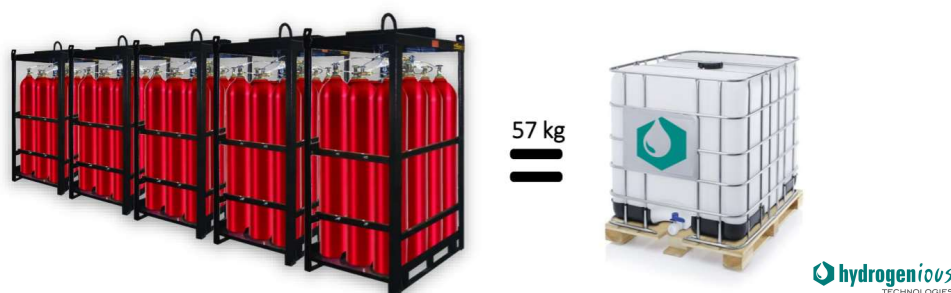
Przewody rurowe muszą być wykonane ze stali nierdzewnej wysokiej jakości lub z kompozytów. Jest to efekt właściwości fizycznych i chemicznych wodoru, który ma dużą dyfuzyjność i powoduje fizyczną korozję materiałów. Trwają również prace nad mieszaniem wodoru z gazem ziemnym i przesyłanie go w formie mieszanek do 20%. W długoterminowej perspektywie wydaje się słuszne inwestowanie w dedykowane wodorowi gazociągi. Dziś mamy w Europie około 2.200 km wodorowych gazociągów. W 2030 roku według Hydrogen Europe możemy się spodziewać 6.800 km a w 2040 roku aż 22.900 km. Wzrost popytu na wodor wśród najbardziej rozwiniętych krajów Europy powoduje potrzebę importu wodoru z innych krajów ościennych, a najtańszym źródłem zielonego wodoru mogą się stać kraje północnej Afryki i kraje arabskie.

Poniżej przedstawiony został europejski schemat gazociągów gazu ziemnego (niebieskie i czerwone linie) oraz sieć szkieletową gazociągów dedykowanych wodorowi (pomarańczowe linie).



Rys.16 Europejskie plany gazociągów wodorowych

Transport kołowy, czy szynowy jest zdecydowanie mniej opłacalny w dużej skali i służy wyłącznie do zaopatrywania małego przemysłu, czy stacji tankowania dla pojazdów. Istnieją również inne formy magazynowania i transportu wodoru. Są jednak na etapie testów i badań. Przykładem może być technologia LOHC – Liquid Organic Hydrogen Carrier. Technologia LOHC opiera się na chemicznym wiązaniu wodoru z ciekłymi nośnikami organicznymi, którymi są głównie węglowodory aromatyczne.



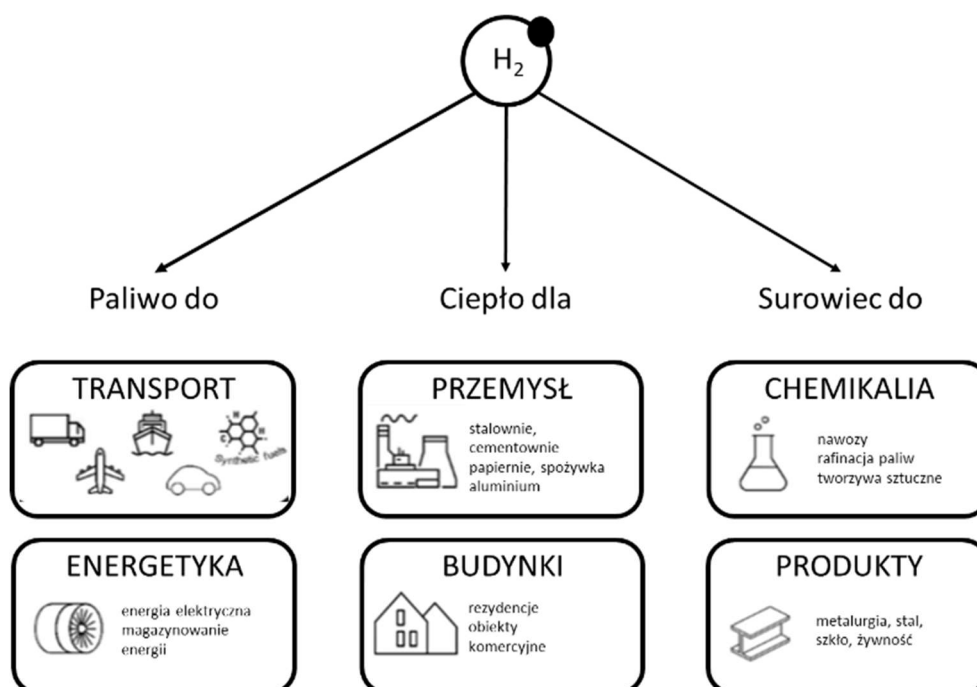
Rys.17 Porównanie objętości wodoru sprężonego i LOHC

Przewagą tej technologii w przyszłości może być koszt transportu prawie dwa razy mniejszy niż wodoru sprężonego. Należy również zwrócić uwagę, że LOHC jest bezpieczny, nie jest wybuchowy i można go przewozić w standardowych kontenerach. Minusem tej technologii na dzień dzisiejszy jest fakt konieczności łączenia i separacji wodoru i nośnika organicznego, co może podnieść cenę.

#### 1.1.4. Wykorzystanie wodoru (poziom drugi)

Dostępność oraz właściwości chemiczne i fizyczne sprawiają, że wodór ma bardzo szerokie zastosowanie w wielu segmentach gospodarki. Od ponad 100 lat z powodzeniem wykorzystuje go przemysł, a dziś może odegrać kluczową rolę w procesie dekarbonizacji w wielu innych zastosowaniach:

- przemysł (chemiczny np. amoniak lub metanol, petrochemiczny, hutniczy, rafinerie oraz w mniejszym stopniu przemysł szklarski i spożywczy),
- sektor transportowy (samochody osobowe, ciężarowe, kolej lub statki, syntetyczne paliwa w formie Power-to-Liquids),
- dostarczanie energii ciepłej (przemysł lub budynki prywatne, ewentualnie metanizacja w formie Power-to-Methane lub domieszka wodoru do gazociągów) oraz produkcja energii elektrycznej (ogniwa paliwowe lub turbiny wodorowe).



Schemat 4. Zastosowanie wodoru

W **przemśle** chemicznym stosuje się go między innymi do syntezy amoniaku, a w dalszym etapie do produkcji nawozów sztucznych. Jest istotny również przy produkcji tworzyw sztucznych. W rafineriach wodór jest zużywany w procesie hydrokrakingu oraz procesach odsiarczania, izomeryzacji, hydorafinacji węglowodorów pochodzących z ropy naftowej, a w przemyśle spożywczym stosowany jest na przykład do utwardzania tłuszczów ciekłych (np. produkcja margaryny i mydła). W metalurgii wodór stosowany jest do redukcji niektórych rud metali (np. german, molibden wolfram). Mimo od dawna znanych technologii i ich masowym wykorzystaniu w przemyśle podlegają one ciągłej ewolucji. Jednym z przykładów może być technologia i proces produkcji stali. **W 2020 roku w miejscowości Lulea w północnej Szwecji uruchomiono testową instalację huty stali. Przy użyciu odnawialnych źródeł energii oraz wodoru prowadzona jest produkcja surówki. W procesie wytopu stali węgiel koksujący (wysokoemisyjny) został**

**zastąpiony wodorem (bezemisyjnym). Celem tej inwestycji jest produkcja stali bez emisji CO<sub>2</sub>, co może zrewolucjonizować produkcję stali<sup>6</sup>.**

Szacuje się, że w 2030 roku tylko niewielką część popytu wodorowego będzie stanowił **transport** (7%). Transport szeroko rozumiany to szynowy, kołowy, morski i lotniczy. Jednak to właśnie on będzie marketingowym motorem napędowym rozwoju Gospodarki Wodorowej.

Tak jak do produkcji wodoru zielonego wykorzystujemy technologie Power-to-Gas, czyli elektrolizery, tak technologia Gas-to-Power to przede wszystkim ogniwa paliwowe. Rozróżniamy podstawowe typy ogniw:

- Ogniwa paliwowe z membraną wymiany protonów (ang. Proton exchange membrane fuel cells - PEMFCs) nazywane też ogniwami paliwowymi z elektrolitem polimerowym, PEFCs (ang. Polymer Electrolyte Fuel Cells). Ogniwo paliwowe z elektrolitem polimerowym (nazywane również ogniwem paliwowym z membraną do wymiany protonów) charakteryzuje się, w porównaniu z innymi ogniwami, wysoką gęstością prądu, niską temperaturą pracy, krótkim czasem rozruchu, niewielką masą i gabarytami.
- Alkaliczne ogniwa paliwowe (ang. Alkaline fuel cells – AFCs). Alkaliczne ogniwa paliwowe wykorzystane były przez NASA w wyprawach kosmicznych. Ich sprawność waha się w granicach 70%. Temperatura pracy zależna jest od stężenia elektrolitu i wynosi od 100 do 250°C. Najczęściej jako elektrolit stosuje się wodne roztwory wodorotlenku potasu.
- Ogniwa paliwowe z kwasem fosforowym (ang. Phosphoric-acid fuel cells – PAFCs). Ogniwo paliwowe z kwasem fosforowym PAFC jest jednym z kilku dostępnych w sprzedaży ogniw paliwowych. Na całym świecie istnieje wiele instalacji tych ogniw. Większość systemów PAFC pracuje w zakresie mocy od 50 do 200 kW, ale istnieją także instalacje o dużej mocy (1 i 5 MW). Największa na świecie instalacja produkuje 11 MW prądu zmiennego AC. PAFC są ogniwami wydajnymi, o sprawności około 40%. Temperatura robocza ogniwa zawarta jest w granicach od 150 do 200°C.
- Ogniwa paliwowe z zestalonym elektrolitem tlenkowym (ang. Solid-oxide fuel cells – SOFCs). Ogniwa paliwowe z zestalonym elektrolitem tlenkowym (SOFC) mają szerokie zastosowanie w elektrowniach o dużej mocy, wykorzystywanych w przemyśle. Zamiast ciekłego elektrolitu zastosowana została warstwa ceramiczna z tlenku cyrkonu ZrO<sub>2</sub> stabilizowanego niewielkim dodatkiem tlenku itru Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Temperatura robocza tych ogniw to około 1000°C, a sprawność zawarta jest w granicach od 60 do 80% przy wydajności 100 kW.
- Ogniwa paliwowe ze stopionym węglanem (ang. Molten-carbonate fuel cells – MCFCs). Wadą tych ogniw jest to, iż w wysokich temperaturach występuje duża agresywność i korozyjność elektrolitu, która powoduje rozkład elektrod. Elektrolitem w ogniwach węglanowych są stopione w wysokich temperaturach mieszaniny węglanów litu oraz sodu lub potasu, umieszczone w spieku ceramicznym. Ogniwa MCFC pracują w temperaturze około 650°C oraz posiadają wysoką efektywność konwersji paliwa na energię, w zakresie od 60 do 80 procent w kogeneracji.
- Bezpośrednie ogniwa metanolowe (ang. Direct-methanol fuel cells – DMFCs). Na świecie produkuje się coraz więcej urządzeń przenośnych, co spowodowało zwiększenie

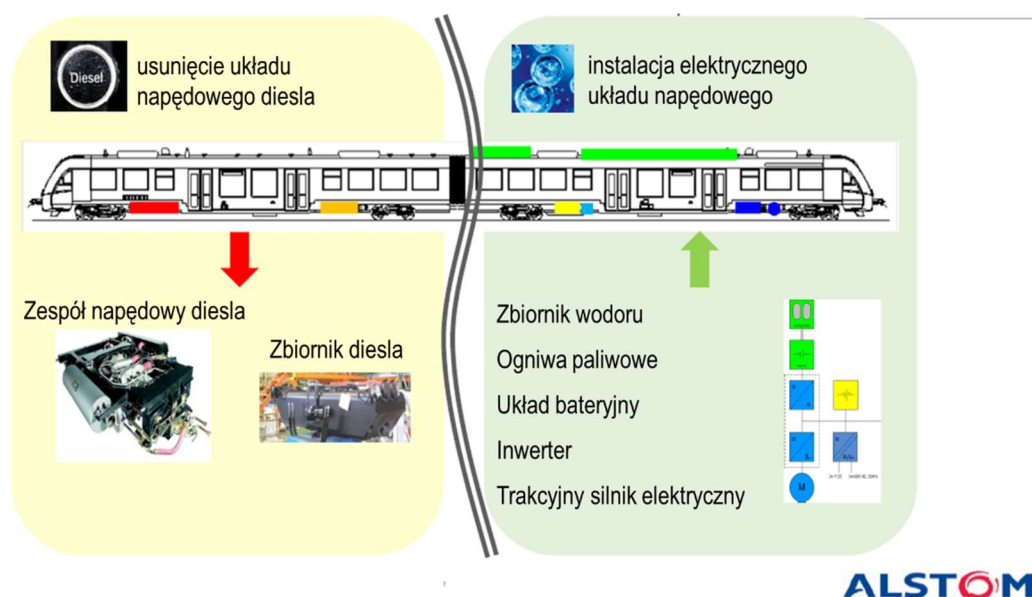
<sup>6</sup> [<https://next.gazeta.pl/next/7,172392,26273855,wielkie-piece-bez-wegla-w-szwecji-uruchomiono-wyjatkowa-instalacje.html>] [<https://www.hybritdevelopment.com/>]

zainteresowania ogniwami paliwowymi, w których możliwe jest bezpośrednie zasilenie paliwem metanolem. Ogniwo paliwowe bezpośrednio zasilane metanolem wykorzystuje, jako elektrolit, identyczny polimer jak stosowany w ogniwach PEM, jednak paliwem jest tu metanol, a nie wodór.

Pojazdy z ogniwami paliwowymi to nadal pojazdy elektryczne. Mają one jednak dwie niezwykle cechy odróżniające je od standardowych pojazdów z magazynami energii w postaci ogniw litowych:

- zasięg analogiczny jak w pojazdach na paliwo ciekłe (benzyna, ropa),
- czas tankowania liczony w minutach podobny jak przy tankowaniu paliwa płynnego.

Wszędzie tam, gdzie zespół bateryjny byłby przeszkodą ze względu na wagę i wielkość, ogniwa wodorowe ze zbiornikami wodoru są idealnym rozwiązaniem. Z tego powodu **transport publiczny i ciężarowy będą w pierwszym rzędzie atrakcyjne dla technologii wodorowych.**



Rys.18 Modernizacja taboru kolejowego

Podstawowym wyzwaniem dla pojazdów na wodór jest infrastruktura, bez której pojazdy z ogniwami paliwowymi nie mają racji bytu. W Polsce nie ma ani jednej stacji tankowania wodorem. Dla porównania w Niemczech stacji do końca 2020 roku ma być już 100.

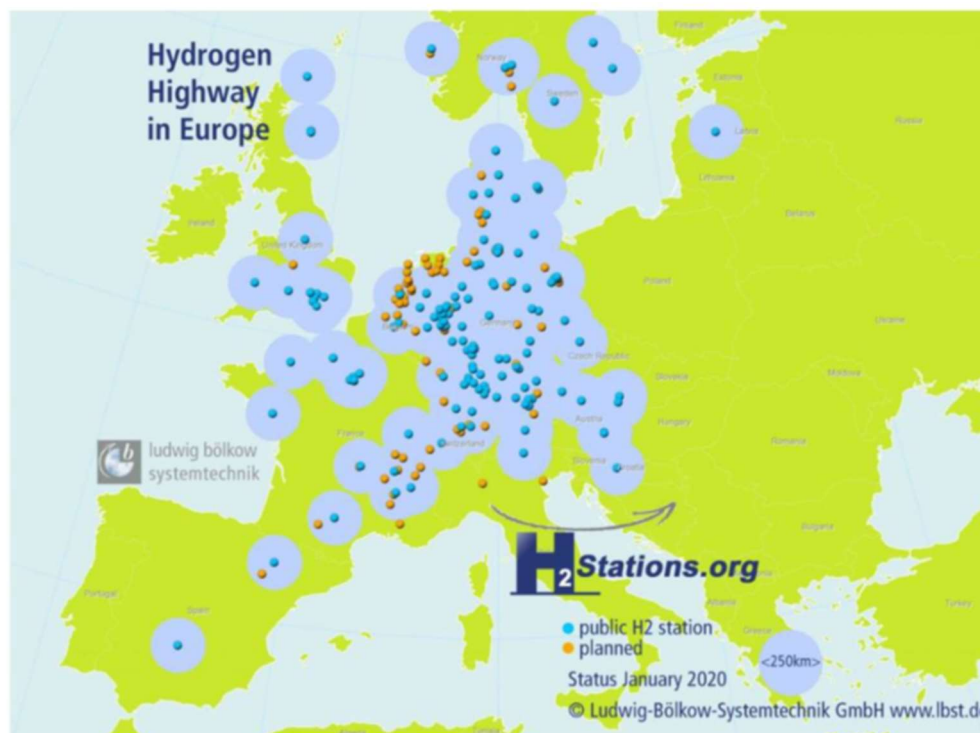
Wkrótce jednak pojawią się pierwsze takie instalacje również w Polsce. Doskonałym przykładem może być tu być aktywność Zespołu Elektrowni Pątnów - Adamów - Konin SA (ZE PAK), który przechodzi transformację energetyczną wygaszając produkcję węgla na rzecz energii zielonej<sup>7</sup>. ZE PAK nie tylko inwestuje w duży zespół elektrolizerów (2,5-5 MW)<sup>8</sup> ale również w dwie stacje

<sup>7</sup> <https://zepak.com.pl/pl/o-firmie/biuro-prasowe/aktualnosci/11610-zielone-kierunki-strategii-ze-pak-sa.html>

<sup>8</sup> <https://www.zepak.com.pl/pl/elektrownie/elektrownia-patnow-konin/elektrownia-konin/produkcja-wodoru-w-ze-pak-sa.html>



tankowania wodorem<sup>9</sup> samochodów osobowych i autobusów, które uruchomione będą w 2021 roku w Koninie i w Warszawie. Trwa również proces budowy stacji tankowania wodoru na zlecenie PGNIG<sup>10</sup> w Warszawie, a Grupa Lotos ogłosiła przetarg na budowę dwóch stacji. Grupa Orlen posiada takie instalacje już w Niemczech (dwa takie punkty w Niemczech na stacjach Star) i na razie inwestuje w sieć stacji tankowania wodorem w Czechach<sup>11</sup>, jednak ma plany również co do Polski.



<https://fuelcellworks.com/news/in-2019-83-new-hydrogen-refuelling-stations-worldwide/>

Rys.19 Mapa lokalizacji stacji tankowania wodoru w Europie

Stacje tankowania ze względu na charakter źródła wodoru możemy podzielić na te z magazynem wodoru, do którego jest on dostarczany z zewnątrz i te z własnym elektrolizerem i produkcją wodoru na miejscu. Stacje tankowania muszą spełniać surowe normy związane z bezpieczeństwem i samą technologią. Regulują to odpowiednie dyrektywy i normy, na przykład:

- Standard pistoletów tankujących: ISO 17268EN/ISO 17268
- Standard jakości wodoru: ISO 14687 + ISO 19880-8EN 17124
- Standard protokołu tankowania: SAE J2601(-1) JPEC-S 0003

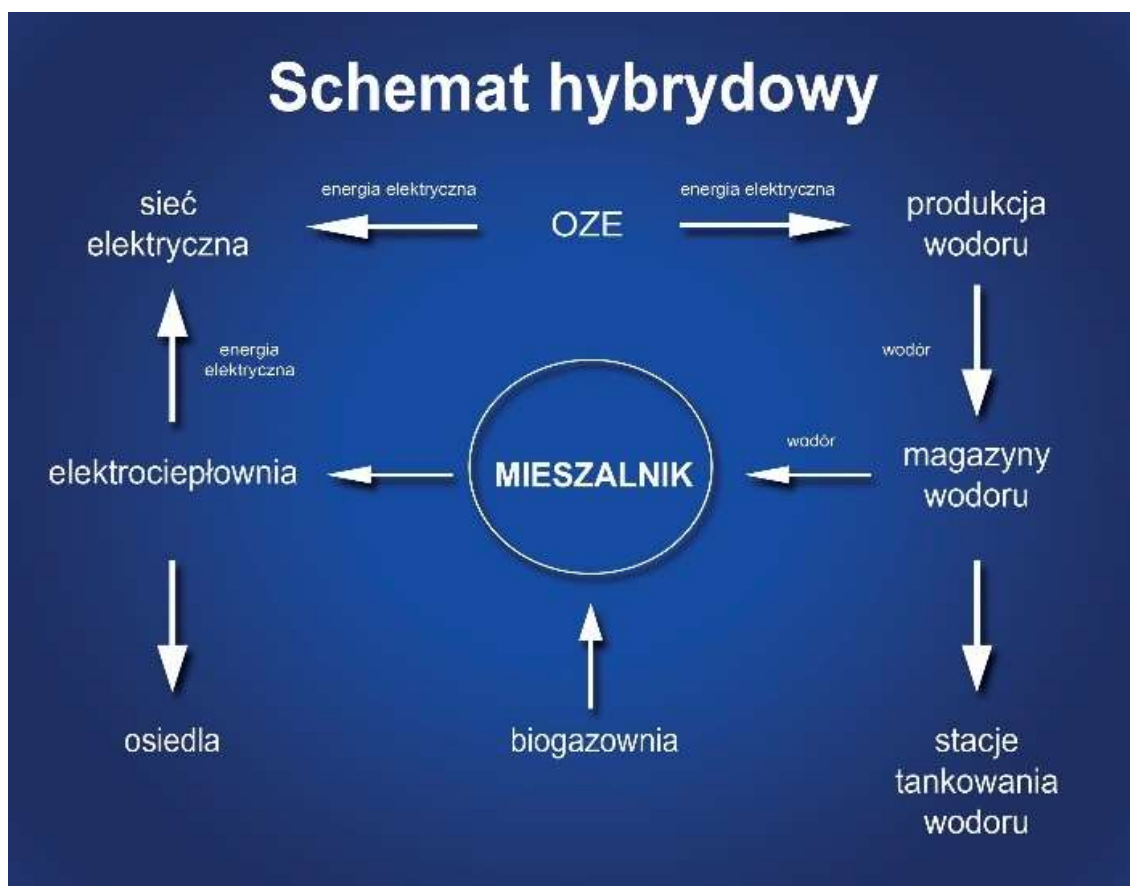
Istnieje kilka wiodących firm oferujących rozwiązania kompletne, „pod klucz”, ale powstają wciąż nowe projekty, firmy, próbujące przebić się w tym sektorze gospodarki.

<sup>9</sup> [<https://zepak.com.pl/pl/o-firmie/biuro-prasowe/aktualnosci/11641-ze-pak-kupuje-pierwsze-stacje-tankowania-wodorem-samochodow-osobowych-i-autobusow.html>]

<sup>10</sup> [<http://pgnig.pl/aktualnosci/-/news-list/id/startuje-nowy-program-wodorowy-pgnig/newsGroupId/10184>]

<sup>11</sup> [<https://www.energetyka24.com/grupa-ornen-z-sieciami-tankowania-aut-wodorem-w-czechach>]

Innym sektorem gospodarki, który chętnie będzie wykorzystywał wodór będą mikrosystemy tworzone przez klastry. Pierwszy model to schemat rozwiązania hybrydowego z wykorzystaniem biogazowni.



Schemat 5. Mikrosystem

Drugi projekt ma stanowić wartość dodaną wykorzystującą duże nadwyżki produkowanej energii elektrycznej przez farmę PV.



Schemat 6. Rozbudowany mikrosystem

Oba schematy są w trakcie realizacji, przy czym pierwszy już działa i sprawnie funkcjonuje, drugi jest jeszcze na etapie projektowania. W obu przypadkach technologie wodorowe doskonale wpisują się w mikrosystem i lokalną gospodarkę.

W skali mikro gospodarstwa domowe mogą stosować ogniwa paliwowych do budowy jednostek CHHP (Combined Hydrogen, Heat and Power, czyli skojarzonej produkcji energii elektrycznej, ciepła i wodoru). W odróżnieniu od CHP (combined heat&power), czyli jednoczesnego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła do zasilania budynków mieszkalnych i zakładów przemysłowych w oparciu o dowolne paliwo (węgiel kamienny, gaz ziemny, biogaz z wysypisk, oczyszczalni ścieków czy biogazowi) jednostki CHHP to jednoczesne wytwarzanie energii elektrycznej, ciepła i wodoru. Paliwem w takim przypadku może być np. biogaz (jako paliwo odnawialne, pozyskany z biogazowni rolniczej, oczyszczalni ścieków czy wysypiska śmieci), który w ogniwie paliwowym zużywającym paliwo węglowodorowe produkuje energię elektryczną oraz wodór, a odzyskiwane ciepło ze spalin zużywane jest do produkcji ciepła użytkowego. Powstająca w ten sposób energia elektryczna i ciepło może zostać zużyta na potrzeby własne zakładu lub przesłana do znajdujących się w pobliżu gospodarstw domowych czy obiektów użyteczności publicznej. Wodór może zostać sprzedany lub wykorzystany na miejscu. Działania w tym kierunku wspierane są przez Unię Europejską, która w ramach przeciwdziałania zmianom klimatu ustanowiła program Europejskiego Zielonego Ładu<sup>12</sup> zawierający plan działań umożliwiających:

- bardziej efektywne wykorzystanie zasobów dzięki przejściu na czystą gospodarkę o obiegu zamkniętym,
- przeciwdziałanie utracie różnorodności biologicznej i zmniejszenie poziomu zanieczyszczeń.

W ramach tych działań prowadzone są i wspierane badania w kierunku dekarbonizacji. Jednym z takich działań są badania w kierunku instalacji mikro-CHP<sup>13</sup>, gdzie wodór może zastąpić paliwo konwencjonalne. Zgodnie z badaniami przeprowadzonymi w projekcie COGEN Europe, instalacje mikro-CHP posiadają wiele zalet, które spowodują, że będą odgrywać znaczącą rolę w europejskim mikście energetycznym: wzmocnią pozycję konsumentów energii, zbilansują źródła odnawialne, zdekarbonizują produkcję ciepła i energii elektrycznej, dodatkowo zapewniając bezpieczeństwo dostaw i spowodują rozwój gospodarki europejskiej. W ramach projektu zainstalowano ok. 1.000 ogniw paliwowych w 12 krajach członkowskich w celu sprawdzenia ich działania. Główną barierą rozwoju instalacji mikro-CHP jest stopień złożoności ogniw paliwowych oraz wysokie koszty komponentów do ich budowy, co powoduje, że ilość ogniw paliwowych dostępnych na rynku jest niska, a ich ceny bardzo wysokie.

Mikro-CHP pozwala gospodarstwom domowym na częściowe pokrycie własnego zapotrzebowania na energię elektryczną oraz całkowite pokrycie ciepła. Nadwyżka energii elektrycznej jest wprowadzana do sieci, co pozwala na odciążenie energetyki zawodowej. W mikro-CHP można również stosować ogniwa paliwowe typu SOFC (stałotlenkowe ogniwa paliwowe), które nie wymagają drogich metali szlachetnych - np. platyny jako katalizatora i mogą stanowić alternatywę do ogniw typu PEFC.

<sup>12</sup> [[https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_pl](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pl)]

<sup>13</sup> [<http://enfield.eu/category/about/>], [<https://setis.ec.europa.eu/publications/setis-magazine/fuel-cells-and-hydrogen/preparing-way-fuel-cell-micro-chp-roll-out>]

Niebagatelną rolę wodoru zaczyna odgrywać w **energetyce**. Magazyny wodoru doskonale się tu odnajdują jako uzupełnienie do technologii opartych na licie, czy wanadowych maszyn przepływowych. Alternatywną metodą przetwarzania wodoru na energię elektryczną (i/lub ciepło) są turbiny gazowe<sup>14</sup> używane dzisiaj do produkcji energii elektrycznej z gazu ziemnego. Są to tzw. Turbiny Gazowego Otwartego Cyklu (ang. Open Cycle Gas Turbines). Już dziś turbiny tego typu są w większości w stanie używać paliwa złożonego z mieszanki gazu ziemnego i wodoru, a w przyszłości, po dokonaniu odpowiednich dostosowań, możliwe będzie spalanie w nich wyłącznie wodoru.

### 1.1.5. Produkty i usługi powiązane i wspierające poziom pierwszy i drugi (poziom trzeci)

Każda z wyżej wymienionych technologii składa się z mniejszych modułów i podzespołów, na każdy produkt, proces składają się wyspecjalizowane usługi. Każdy z tych elementów może być wartością w łańcuchu dostaw nie tylko na poziomie regionalnym, ale również krajowym i europejskim. Przy czym w sektorze poziomu trzeciego mogą się znaleźć przedsiębiorstwa, takie jak kancelarie prawne specjalizujące się w regulacjach związanych z technologiami wodorowymi, firmy programistyczne, czy consultingowe, ale również dostawcy surowców i podzespołów. Generalnie każde przedsiębiorstwo współpracujące i wspierające producentów i usługodawców znajdujących się na pierwszych dwóch poziomach. Mając to na uwadze można zidentyfikować i opisać Łańcuch Dostaw i Wartości dla poziomu trzeciego:

- Projektowanie i produkcja komponentów OZE (dostawcy energii do produkcji wodoru zielonego): gondole, korpusy, tarcze hamulcowe, sprzęgła, ogniwa słoneczne, inwertery, zasobniki bateryjne i baterie,
- Projektowania instalacji przemysłowych,
- Projektowanie i produkcja zbiorników do transportu wodoru,
- Zarządzanie, serwis i modernizacji i remontów instalacji,
- Automatyka przemysłowa (IT, instalacje elektryczne, sterowniki, systemy komunikacyjne),
- Systemy zabezpieczeń,
- Urządzenia pomiarowe i kontrolne (liczniki, urządzenia pomiaru jakości),
- Transport wyspecjalizowany (transport substancji niebezpiecznych, transport wielkogabarytowy),
- Systemy UPS (prostowniki, falowniki, baterie, przewody, akumulatory),
- Oprogramowanie (oprogramowanie dla operatorów infrastruktury krytycznej, oprogramowanie zarządcze, aplikacje do monitorowania pracy podsystemów).

## 1.2. Rozwój rynku wodorowego z perspektywy europejskiej

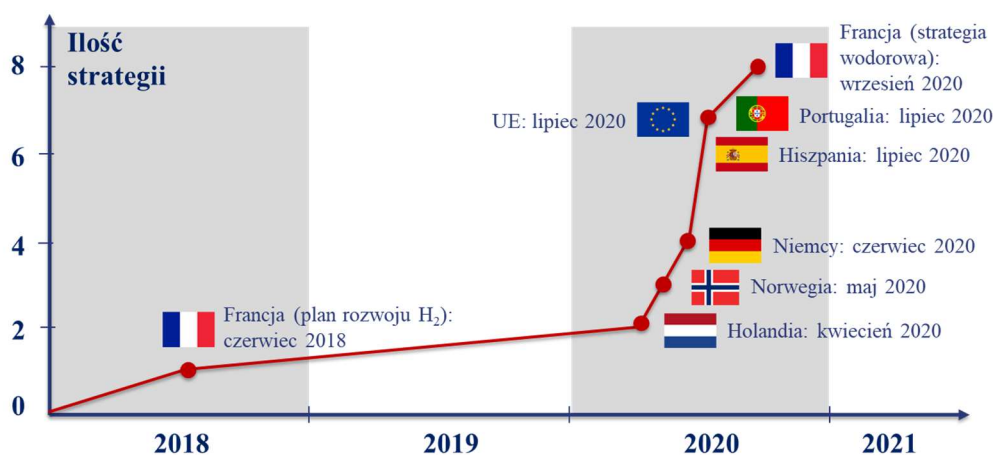
### 1.2.1. Strategie wodorowe w Europie

Plany inwestycyjne oraz eksportowe powinny być zgodne z unijną i narodowymi strategiami wodorowymi. Ekspertyza, zatem zawiera dodatkowo wgląd w oficjalne strategie wodorowe wybranych kluczowych państw europejskich na podstawie wyników projektu przeprowadzanego

<sup>14</sup> [wodorowa alternatywa; Warszawa, kwiecień 2019 r.; Autorzy: Michał Dorociak, Maciej Tomecki; Redakcja: 300GOSPODARKA]

przez firmę Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH dla Word Energy Council Germany pod tytułem „International hydrogen strategies”<sup>15</sup>.

Światowy oraz europejski rynek wodorowy rozwija się bardzo dynamicznie i coraz więcej państw publikuje własne strategie wodorowe. Na skalę europejską jednym z pierwszych dokumentów strategicznych był francuski plan rozwoju wodoru z czerwca 2018.



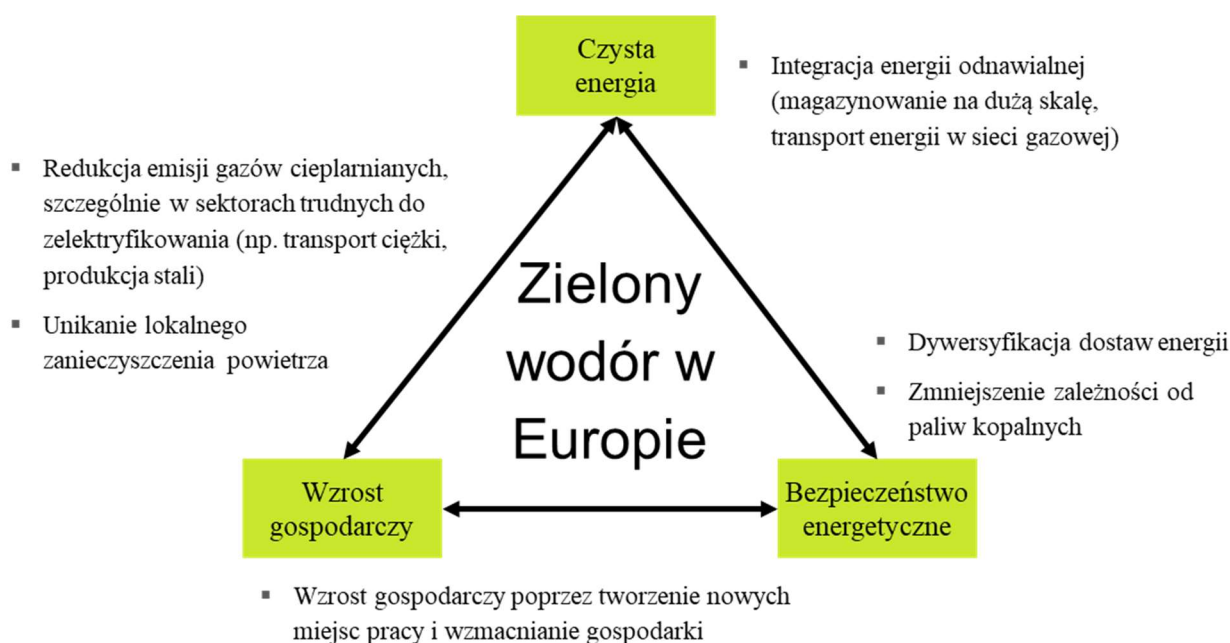
Rys.20 Okres powstawania pierwszych strategii wodorowych w Europie

Większość strategii powstała w ciągu ostatnich dwunastu miesięcy, między innymi w Holandii, Norwegii, Niemczech, Hiszpanii i Portugalii. We wrześniu 2020 roku Francja przedstawiła zaktualizowaną strategię wodorową, która zastąpiła wcześniejszy plan rozwoju H<sub>2</sub>. Ponadto w lipcu 2020 roku Unia Europejska opublikowała własną strategię wpisującą się w ramy Europejskiego Zielonego Ładu. Strategie wodorowe są przygotowywane również przez inne państwa europejskie, w tym także przez Polskę. Biorąc pod uwagę szybki rozwój technologii wodorowych na całym świecie szacuje się, że do 2020-2025 powstanie w sumie co najmniej 20 strategii wodorowych, reprezentujących ok. 44% światowego PKB.

Wodór, jako uniwersalny nośnik energii odgrywa kluczową rolę w transformacji systemu energetycznego w Europie w myśl Europejskiego Zielonego Ładu. Tzw. zielony wodór wyprodukowany poprzez elektrolizę z odnawialnych źródeł energii (OZE) przynosi wiele zróżnicowanych korzyści:

- **Czysta energia:** Redukcja emisji gazów cieplarnianych, szczególnie w sektorach trudnych do zelektryfikowania (np. transport ciężki, produkcja stali), unikanie lokalnego zanieczyszczenia powietrza oraz integracja energii odnawialnej (magazynowanie na dużą skalę, transport energii w sieci gazowej);
- **Bezpieczeństwo energetyczne** realizowane poprzez dywersyfikację dostaw energii oraz zmniejszenie zależności od paliw kopalnych;
- **Wzrost gospodarczy** poprzez tworzenie nowych miejsc pracy i wzmacnianie gospodarki.

<sup>15</sup> LBST (2020). International Hydrogen Strategies. Badanie zlecone przez i we współpracy z World Energy Council Germany. Wrzesień 2020. [www.weltenergieat.de/international-hydrogen-strategies](http://www.weltenergieat.de/international-hydrogen-strategies)



Schemat 7. Zróżnicowane korzyści zielonego wodoru

Pomimo że poszczególne strategie wodorowe różnią się szczegółami odzwierciedlającymi interesy danych krajów, to jednak wszystkie strategie uznają wyżej wymienione korzyści zielonego wodoru jako główny powód dla dalszego rozwoju gospodarki wodorowej. Oczekiwany rozwój rynku zielonego wodoru można podzielić na trzy fazy. W obecnym dziesięcioleciu ma nastąpić aktywacja rynku, która ma mieć za zadanie przekształcenie pojedynczych projektów demonstracyjnych na wczesny rynek wodorowy. W drugiej fazie oczekiwany jest trwały wzrost rynkowy poprzez kolejną dekadę, aż do powstania dużego i dobrze ugruntowanego rynku do 2050 r. w trzeciej fazie.

Większość strategii przedstawia następujące działania jako kluczowe instrumenty dla rozwoju rynku wodorowego:

- Całościowe wsparcie dla kompleksowych łańcuchów wartości od produkcji do użytkowania wodoru,
- Stymulacja popytu poprzez obowiązkowe kontyngenty sektorowe na zielone surowce i paliwa w przemyśle i transporcie,
- Przejście od dopłat do wydatków inwestycyjnych do wsparcia finansowego związanego z utrzymaniem produktu lub systemu wodorowego,
- Stymulacja rynku poprzez wyższe ceny CO<sub>2</sub>,
- Bezpieczeństwo inwestycji poprzez długoterminowe podejście strategiczne,
- Wdrażanie systemów do certyfikacji wodoru w kontekście jego wpływu na środowisko,
- Kompleksowy rozwój infrastruktury poprzez dofinansowanie, centrale i skoordynowane planowanie oraz harmonizację odpowiednich przepisów i regulacji,
- Poszerzanie akceptacji społecznej poprzez kampanie edukacyjne oraz programy szkoleniowe.

---

## Francuska strategia wodorowa

W czerwcu 2018 r. francuski rząd ogłosił tzw. plan rozwoju H<sub>2</sub>, którego celem jest uczynienie z Francji światowego lidera w dziedzinie wodorowej. Te plany zostały potwierdzone w nowej strategii wodorowej z 2020 roku, równocześnie uznając wdrażanie technologii i zastosowań wodorowych jako instrument do zwalczania kryzysu gospodarczego spowodowanego pandemią COVID-19. Francuska strategia wodorowa opiera się na trzech filarach. Po pierwsze głównym celem produkcji wodoru jest dekarbonizacja procesów przemysłowych. Po drugie wodór ma przyczynić się do dekarbonizacji transportu, zwłaszcza tam, gdzie pojazdy na baterie nie mają zastosowania. Po trzecie dzięki magazynowaniu energii odnawialnej wodór ma pomóc w stabilizacji sieci energetycznych w perspektywie średnio- i długoterminowej. Strategia zakłada moc elektrolizy na poziomie 6,5 GW do 2030 r.

## Holenderska strategia wodorowa

Na podstawie tzw. „Krajowego Porozumienia Klimatycznego” rząd holenderski w kwietniu 2020 roku opracował narodową strategię wodorową. Sektor transportu jest jednym z głównych zastosowań wodorowych w Holandii. Strategia przewiduje nie tylko dużą liczbę samochodów na ogniwa paliwowe, ale także zdecydowanie popiera obowiązkowy kontyngent na zielone paliwo z użyciem wodoru w sektorze lotnictwa (14% w 2030 r. i 100% do 2050 r.). Stymulowane będzie również wykorzystanie wodoru w przemyśle żegludowym (porty, drogi morskie i śródlądowe). Zużycie wodoru w przemyśle jest wymienione jako jeden z aspektów rynkowych. Jednak konkretne zastosowania są niejasne. Strategia wspomina jedynie ciepłownictwo wysokotemperaturowe w różnych gałęziach przemysłu i zastosowanie czystego wodoru w rafineriach. W sektorze mieszkaniowym nie przewiduje się stosowania wodoru na dużą skalę ze względu na niepewne koszty i dostępne ilości wodoru przed 2030 r. Holenderska strategia wodorowa nie zawiera żadnych dalszych planów w zakresie użycia wodoru w energetyce. Holandia zamierza zwiększyć produkcję zielonego wodoru poprzez elektrolizę do około 500 MW do 2025 r. i do 3-4 GW do 2030 r. Niebieski wodór (reforming parowy gazu ziemnego oraz magazynowanie CO<sub>2</sub>) jest uważany za formę przejściową w drodze do późniejszego wykorzystania zielonego wodoru.

## Norweska strategia wodorowa

W maju 2020 r. norweski parlament przyjął narodową strategię wodorową, która kładzie nacisk na badania i rozwój w zakresie energii wodorowej w ramach pakietu klimatycznego związanego ze zwalczaniem kryzysu gospodarczego spowodowanego przez pandemię COVID-19. W norweskim przemyśle wodór może mieć zastosowanie w rafineriach oraz w przemyśle chemicznym i hutniczym. Mimo dużego potencjału na zastosowanie zielonego wodoru w tych gałęziach przemysłowych strategia ocenia, że dalsze krótkoterminowe działania w tym sektorze będą trudne i związane z dużą niepewnością i dlatego nie przewiduje dalszego wsparcia dla wodoru w tych zastosowaniach. Strategia skupia się przede wszystkim na zrównoważonych technologiach energetycznych w transporcie morskim, odgrywającym w Norwegii ważną rolę, przy wykorzystaniu wodoru i amoniaku oraz ogniwiw paliwowych, które są szczególnie uwzględnione w strategii. W odniesieniu do transportu drogowego strategia opiera się na celach klimatycznych, które przewidują całkowitą redukcję emisji CO<sub>2</sub> związanych z transportem dostawczym i autobusowym do roku 2030 oraz w całym transporcie kołowym do roku 2050. W sektorze energetycznym przewiduje się niewielkie wykorzystanie wodoru do stabilizacji produkcji energii elektrycznej ze względu na wysoki udział stabilnej energii wodnej. Norweska strategia wodorowa nie przewiduje eksportu wodoru do innych państw w najbliższym okresie.

## Niemiecka strategia wodorowa

W czerwcu 2020 r. niemiecki rząd federalny opublikował pierwszą narodową strategię wodorową, która obejmuje pełen zakres różnych sektorów i zastosowań wodorowych. Przemysł jest jednym z pierwszych i największych sektorów do wykorzystania wodoru w Niemczech (w szczególności przemysł chemiczny, petrochemiczny i hutniczy) na poziomie ponad 100 TWh w skali roku do 2050r. Sektor transportowy to kolejny obszar, który perspektywicznie będzie miał duże zapotrzebowanie na wodór, głównie stanowiąc alternatywę dla zastosowań, które są trudne do zelektryfikowania. Obejmują one samoloty, statki, autobusy, pociągi, ciężarówki, a także wózki widłowe i pojazdy budowlane oraz wojskowe. Dalsze zastosowania to ciepłownictwo oraz w dłuższej perspektywie magazynowanie nadmiaru odnawialnej energii elektrycznej. Strategia formułuje cel w zakresie krajowej produkcji wodoru ze źródeł odnawialnych poprzez elektrolizę na poziomie od 5 GW (do 2030 r.) do 10 GW (do 2035–2040 r.), co odpowiada ok. 14–28 TWh w skali roku. Większość popytu ma być jednak zaspokojona poprzez import zielonego wodoru z innych części świata. Z tego względu strategia jest otwarta dla różnych nośników wodoru i rozwoju infrastruktury takich jak gazociągi, transport skroplonego wodoru lub LOHC, a także inne nośniki na bazie wodorowej, takie jak amoniak i metanol.

## Strategia wodorowa Unii Europejskiej

Strategia wodorowa Komisji Europejskiej została opublikowana wraz ze „Strategią UE na rzecz integracji systemu energetycznego<sup>16</sup>” w lipcu 2020 r. Kładzie ona nacisk na dwóch zastosowaniach wodorowych, w transporcie i w przemyśle, a także na produkcji wodoru w oparciu o elektrolizę. W transporcie wodór ma być wykorzystywany przede wszystkim w aplikacjach, takich jak autobusy, ciężarówki, pociągi, statki i lotnictwo, zarówno na podstawie paliw syntetycznych (statki i lotnictwo), jak i długoterminowo na podstawie ogniw paliwowych. Samochody osobowe na ogniwa paliwowe są wymieniane głównie w kontekście flot komercyjnych, takich jak np. taksówki. W sektorze przemysłowym wodór ma mieć szczególne zastosowanie w rafineriach oraz przy produkcji amoniaku i metanolu, a w dalszej perspektywie w przemyśle hutniczym przy produkcji stali. W mniejszym stopniu w strategii uwzględniono również wykorzystanie wodoru do ogrzewania budynków, a także do sezonowego magazynowania energii. W perspektywie krótko- (2024) i średnioterminowej (2030) cele w zakresie produkcji wodoru z elektrolizy to 6 GW i 1 milion ton zielonego wodoru w 2024 r. oraz 40 GW i 10 milionów ton zielonego wodoru w 2030 r.

## Hiszpańska strategia wodorowa

Proces konsultacji publicznych nad hiszpańską strategią wodorową rozpoczął się w kwietniu 2020 r. Następnie hiszpańska „Mapa drogowa dla odnawialnych źródeł wodoru” została opublikowana w lipcu 2020, określając rolę zielonego wodoru oraz wyzwania i możliwości jego rozwoju w Hiszpanii. W tym zakresie strategia wyróżnia sektor transportu jako jedno z głównych zastosowań dla wodoru - w szczególności w aplikacjach, w których inne rozwiązania elektryczne są niemożliwe lub nieopłacalne (np. transport publiczny lub spedycja). Dotyczy to zarówno transportu drogowego, jak i kolejowego, morskiego oraz lotnictwa, a wodór jest określony jako kluczowa technologia potrzebna do osiągnięcia celów klimatycznych w tym sektorze. W przemyśle strategia przewiduje, że co najmniej 25% wodoru zużywanego w tym sektorze będzie pochodziło ze źródeł odnawialnych

<sup>16</sup> Komisja Europejska (2020). Powering a climate-neutral economy - An EU Strategy for Energy System Integration. COM(2020) 299 final. Bruksela, 8.7.2020



do roku 2030. W tym samym okresie planuje się instalację elektrolizy o łącznej mocy na poziomie co najmniej 4 GW w celu wykorzystania taniej energii słonecznej.

## Portugalska strategia wodorowa

Portugalia uwzględniła w swojej strategii z lipca 2020 r. szeroki zakres korzyści z wdrażania technologii wodorowej na drodze ku neutralności klimatycznej, w tym przede wszystkim korzyści ekonomiczne. W szczególności strategia przewiduje do roku 2030 ok. 8.500-12.000 nowych miejsc pracy i zmniejszenie wydatków na import gazu ziemnego oraz amoniaku o ok. 560-920 milionów euro. Portugalia koncentruje się na produkcji i wprowadzaniu tzw. gazów odnawialnych, w tym zielonego wodoru głównie w sektorach, w których elektryfikacja jest trudna lub nie jest opłacalna. Ponadto zielony wodór ma być eksportowany do innych krajów, zgodnie z rosnącym globalnym popytem. W oparciu o różne scenariusze portugalska strategia spodziewa się ok. 2-3 GW elektrolizy do 2030 r.

### 1.2.2. Analiza europejskiego rynku wodorowego na kolejne lata pod kątem popytu i trendów

Analiza rozwoju rynku wodorowego w tym rozdziale bazuje na wynikach opracowania firmy Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH na zlecenie Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (FCH2 JU) pod tytułem „Opportunities for Hydrogen Energy Technologies considering the National Energy & Climate Plans”<sup>17</sup>. Przedstawia ona uzasadnioną predykcję rozwoju rynku wodorowego na kolejne lata pod kątem popytu i trendów rynkowych w podziale na produkty i usługi na poziomie pierwszym i drugim. Analiza opera się na dwóch scenariuszach:

- **Scenariusz A:** konserwatywna prognoza popytu zakładająca powolny rozwój zielonych technologii wodorowych i niewielki wzrost zużycia we wszystkich sektorach do roku 2030
- **Scenariusz B:** optymistyczna prognoza popytu przewidująca szersze rozpowszechnienie zielonych technologii wodorowych i szybki wzrost zapotrzebowania we wszystkich sektorach do roku 2030.

Zastosowana metoda badawcza składa się z trzech poszczególnych elementów. Pierwszy element obejmuje ogólną prognozę zapotrzebowania na poszczególne produkty w każdym sektorze oraz państwie członkowskim (np. zużycie i produkcja stali w danym państwie lub wykorzystanie pojazdów w osobokilometrach na rok). W kolejnym elemencie przewidywany jest udział technologii wodorowej w zaspakajaniu wyżej wymienionego zapotrzebowania (np. jako odsetek „zielonej stali wyprodukowanej na bazie wodoru lub odsetek samochodów wodorowych na rynku samochodowym). Wreszcie ostatni element analizy zawiera kalkulację zużycia wodoru na bazie wcześniej założonej penetracji danego rynku przez technologie wodorowe (np. poprzez pomnożenie ilości stali na bazie zielonego wodoru z właściwym zużyciem wodoru na jednostkę stali lub roczne zużycie paliwa samochodów wodorowych). Parametry wykorzystane w analizie bazują głównie na wynikach poszczególnych opracowań rynkowych. Zostały one udokumentowane w wyżej

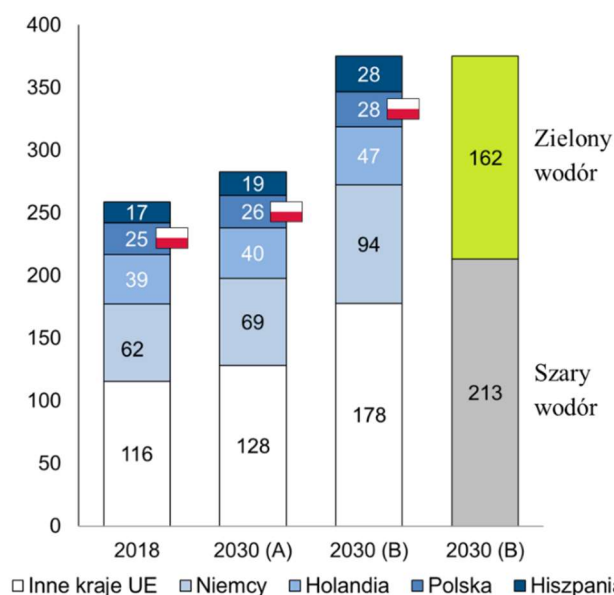
<sup>17</sup> Trinomics/LBST (2020). Opportunities for Hydrogen Energy Technologies considering the National Energy & Climate Plans. Sierpień 2020. [www.fch.europa.eu/publications/opportunities-hydrogen-energy-technologies-considering-national-energy-climate-plans](http://www.fch.europa.eu/publications/opportunities-hydrogen-energy-technologies-considering-national-energy-climate-plans)

wymienionej ekspertyzie pod tytułem „Opportunities for Hydrogen Energy Technologies considering the National Energy & Climate Plans”<sup>18</sup>.

Obecnie niektóre sektory przemysłowe, takie jak produkcja amoniaku lub procesy rafinacji już wykorzystują tzw. wodór szary z paliw kopalnych np. poprzez parowy reforming metanu lub jako produkt uboczny innych procesów chemicznych. W tym kontekście aktualne zapotrzebowanie i produkcja wodoru w Unii Europejskiej wynosi ok. 260 TWh rocznie.<sup>19</sup>

Największe rynki powstały w Niemczech (ok. 60 TWh/rok), Holandii (ok. 40 TWh/rok) oraz Polsce (ok. 25 TWh/rok). Dalszy rozwój rynków wodorowych przewiduje na podstawie wyżej opisanych analiz wzrost zapotrzebowania na wodór do roku 2030 w skali od 9% (ok. 280 TWh/rok) w scenariuszu A (konserwatywna predykcja) do 45% (ok. 375 TWh/rok) w scenariuszu B (optymistyczna predykcja). Znaczna część zapotrzebowania może być zaspokojona poprzez zielony wodór: ok. 13% (38 TWh/rok) w scenariuszu A oraz ok. 43% (162 TWh/rok) w scenariuszu B.

Prawie połowa zapotrzebowania na zielony wodór w Unii Europejskiej przypada na przemysł (21-79 TWh/rok), głównie w rafineriach i hutnictwie.



Rys.21 Popyt na wodór w Unii Europejskiej w scenariuszu A i B do roku 2030

Oczekuje się, że sektor rafineryjny będzie najbardziej ugruntowanym rynkiem dla zielonego wodoru, ponieważ zużywa on już dzisiaj znaczne ilości szarego wodoru, który z technicznego punktu widzenia można łatwo zastąpić innymi źródłami, a jego koszty mają niewielki wpływ na produkt końcowy (benzyna, oleje napędowe itd.).

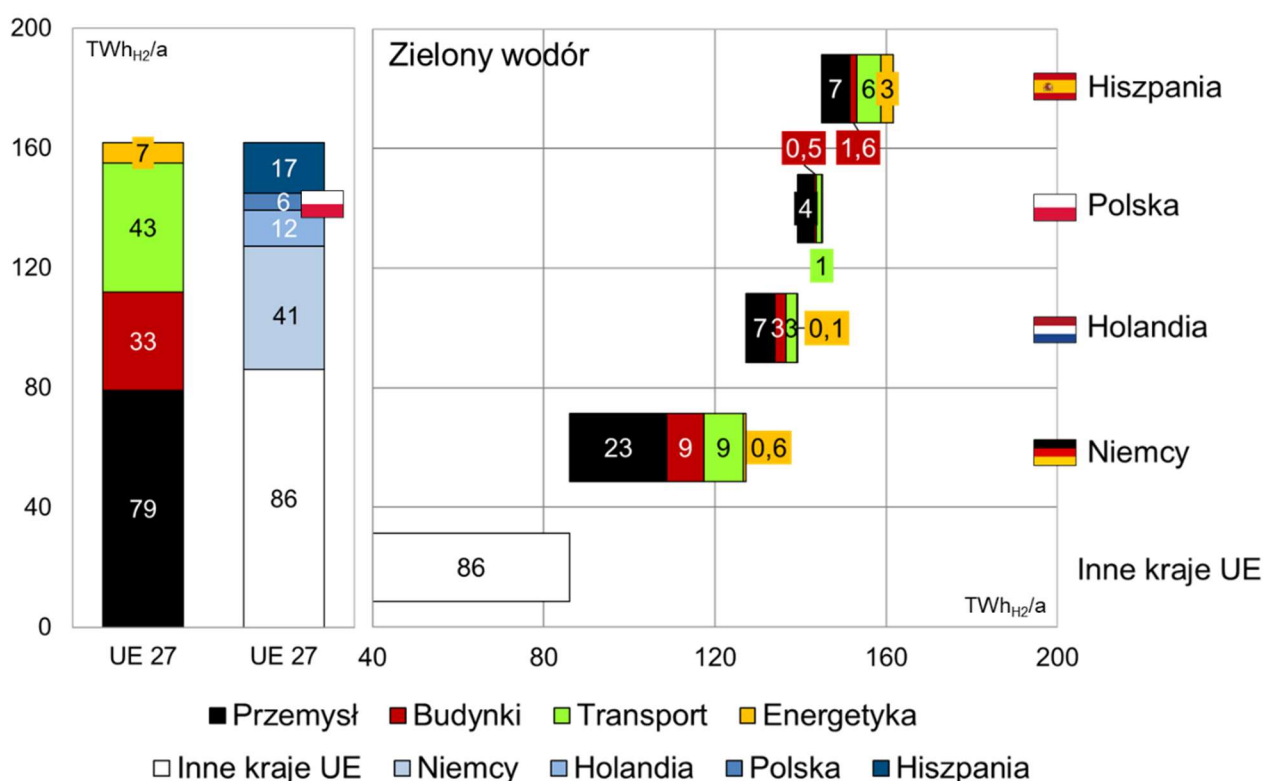
Zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych na rynku hutniczym wymaga natomiast znacznych zmian technicznych i tym samym nakładów inwestycyjnych. Produkcja stali w oparciu o technologie wodorowe jest jednak jedną z głównych opcji technicznych umożliwiających dekarbonizację tego sektora. Wielu europejskich graczy rynkowych uwzględniło to już w swoich strategiach lub rozpoczyna projekty pilotażowe w celu przetestowania technologii. Ponieważ europejski rynek

<sup>18</sup> Trinomics/LBST (2020). Opportunities for Hydrogen Energy Technologies considering the National Energy & Climate Plans. Sierpień 2020. [www.fch.europa.eu/publications/opportunities-hydrogen-energy-technologies-considering-national-energy-climate-plans](http://www.fch.europa.eu/publications/opportunities-hydrogen-energy-technologies-considering-national-energy-climate-plans)

<sup>19</sup> Na podstawie statystyki przedstawionej przez Fuel Cell and Hydrogen Observatory: [www.fchobservatory.eu](http://www.fchobservatory.eu)

hutniczy jest bardzo duży to już niewielki udział technologii wodorowych w produkcji czystej stali wymagałby znacznej ilości zielonego wodoru.

Wykorzystanie zielonego wodoru w przemyśle petrochemicznym (produkcja olefin i związków aromatycznych), a także do dostarczania ciepła (energia przemysłowa) jest niepewne i waha się znacznie pomiędzy obydwooma scenariuszami. W przypadku przemysłu petrochemicznego produkcja olefin i aromatów charakteryzuje się stosunkowo wysokim jednostkowym zużyciem wodoru i dlatego już niewielki udział zielonego wodoru w tym rynku może prowadzić do dużego ogólnego zapotrzebowania. W przypadku ciepłownictwa przemysłowego zapotrzebowanie na energię ze źródeł odnawialnych, w tym zielonego wodoru, będzie silnie zależało od podstawowych założeń dotyczących substytucji gazu ziemnego w sektorze gazowym.



Rys.22 Popyt na zielony wodór w Unii Europejskiej w optymistycznym scenariuszu B do roku 2030

Przemysł azotowy (tzn. produkcja amoniaku) jest obecnie jednym z największych konsumentów wodoru. Jednak, biorąc pod uwagę wrażliwość tego sektora na ceny wodoru ze względu na globalną konkurencję, zapotrzebowanie na zielony wodór pozostanie na niskim poziomie, nawet w optymistycznym scenariuszu B. Produkcja metanolu to stosunkowo mały rynek w Europie i zapotrzebowanie na zielony wodór w tym sektorze będzie nadal ograniczone.

Zużycie wodoru w sektorze transportowym w Unii Europejskiej może według przeprowadzonych analiz osiągnąć poziom 15-44 TWh/rok do 2030 roku. Głównym rynkiem zbytu jest w tym przypadku transport drogowy (osobowy i ciężarowy). Dalszy rozwój tego rynku znacznie zależy od cen pojazdów z ogniwami paliwowymi oraz rozbudowy sieci stacji paliw. Niemniej jednak niektóre zastosowania, takie jak duże samochody osobowe lub pojazdy ciężarowe o dużym zasięgu, z technicznego punktu widzenia nie mogą być całkowicie zelektryfikowane i stanowią doskonały rynek docelowy dla technologii wodorowych. Popyt na paliwa syntetyczne w oparciu o zielony

wodór w lotnictwie w dużym stopniu zależy od przyszłej strategii i konkretnych celów dekarbonizacji tego przemysłu (np. w kontekście obowiązkowych kontyngentów) i może mieć w przyszłości duże znaczenie. Pozostałe podsektory w tym autobusy, pociągi i żegluga śródlądowa mają mniejszy potencjał w zastosowaniu zielonego wodoru pod kątem całkowitej ilości wodoru w porównaniu z innymi aplikacjami. Jednak w przypadku autobusów i pociągów już dzisiaj dostępne są na rynku pojazdy oparte na ogniwach paliwowych, co wskazuje na ważną rolę technologii wodorowej w obydwu podsektorach.

Podobnie jak w przypadku ciepłownictwa w przemyśle, wykorzystanie zielonego wodoru do celów grzewczych w sektorze mieszkaniowym znacznie zależy od planowej substytucji gazu ziemnego innymi nośnikami energii i tym samym konkurencyjności sieci wodorowych. Ze względu na dużą niepewność co do faktycznego rozwoju odpowiedniej infrastruktury popyt w tym sektorze szacowany jest na 3-33 TWh/rok. Energetyka (produkcja prądu elektrycznego) to najmniejszy rynek wodorowy w 2030 roku o zapotrzebowaniu ok. 0,2-7 TWh/rok. Głównym zastosowaniem będzie kogeneracja ciepła i prądu w jednostkach o różnej wielkości. Będzie to jednak zależało od ich konkurencyjności i rozwoju odpowiedniej infrastruktury wodorowej. W dodatku, w niektórych krajach z dużą ilością OZE już w 2030 takich jak Hiszpania, dodatkowy popyt na zielony wodór może pochodzić z zapotrzebowania na wielkoskalowe magazynowanie energii odnawialnej (słonecznej i wiatrowej).

Wszystkie wyżej wymienione rynki dają ogromne nowe szanse biznesowe i eksportowe dla europejskich firm w tym także polskich MŚP, które należy wspierać poprzez lokalne oraz regionalne inicjatywy. Poniższa tabela przedstawia zapotrzebowanie na poszczególne wodorowe produkty i rozwiązania techniczne w Unii Europejskiej w scenariuszu A i B.

Tab.5 Zapotrzebowanie na wodorowe produkty i rozwiązania techniczne w Unii Europejskiej w scenariuszu A (prawdopodobnym) i B (optymistycznym) do 2030 r.

Kraj		UE		Niemcy		Holandia		Polska		Hiszpania	
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Elektroliza*	GW	11,9	50,4	3,0	13,7	0,8	3,6	0,7	1,7	1,0	4,1
Samochody osobowe	N°	2.139.800	4.279.700	477.000	954.000	105.400	210.700	70.200	140.500	270.100	540.300
Autobusy	N°	6.210	13.420	760	1.510	110	230	630	1.260	660	1.330
Małe ciężarówki	N°	163.200	334.400	18.400	36.700	5.400	10.900	10.900	21.800	30.300	60.700
Duże ciężarówki	N°	21.110	43.010	14.030	28.070	440	880	1.240	2.480	1.290	2.590
Pociągi	N°	293	939	113	340	12	37	10	42	8	30
Stacje wodorowe	N°	3.840	6.987	783	1.342	198	380	150	291	496	889
Zielone paliwa w lotnictwie	GWh/rok	1.049	9.970	219	2.083	83	789	21	195	162	1.538
Zielone paliwa w żegludze śródlądowej	GWh/rok	116	1.100	8	77	7	64	0	1	20	191
Małe jednostki kogeneracji ciepła i prądu	N°	142.140	624.430	39.670	165.660	11.480	47.940	2.190	9.140	7.460	31.160
Duże jednostki kogeneracji ciepła i prądu	N°	220	2.510	60	580	10	110	0	10	0	0
Produkcja paliw (rafineria)	TWh H2/rok	12,7	20,3	0,8	2,0	1,4	2,3	1,6	2,1	1,9	2,9
Produkcja amoniaku	kt/rok	0,0	720,4	0,0	140,9	0,0	118,8	0,0	113,7	0,0	20,9
Produkcja metanolu	kt/rok	12,1	97,1	0,0	59,1	12,1	37,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Produkcja stali	Mt/rok	3,2	11,5	1,9	5,7	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,3
Produkcja olefin	kt/rok	0,0	563,5	0,0	176,6	0,0	87,0	0,0	13,6	0,0	34,6
Produkcja związków aromat.	kt/rok	0,0	149,7	0,0	44,1	0,0	23,8	0,0	9,1	0,0	12,6

\* Zakładając całkowite zaspokojenie popytu na zielony wodór poprzez produkcję w danym kraju.

### 1.2.3. Zestawienie najważniejszych regulacji polskich i europejskich

Ważnym aspektem dotyczącym technologii wodorowych są polskie i europejskie akty prawne oraz odpowiednie normy. Wiedza na ten temat ułatwia poruszanie się szczególnie nowym podmiotom po rynku technologii wodorowych oraz w tematyce eksportu do krajów Unii. Niebagatelną rolę pełnią tu także regulacje związane z bezpieczeństwem (m.in. ATEX).

W Polsce prowadzone są prace związane z przygotowaniem Krajowej Strategii Wodorowej. Powołany został specjalny zespół ekspertów oraz prowadzone są międzyresortowe konsultacje. Według kalendarza projektu pierwsza propozycja ma zostać upubliczniona na przełomie października i listopada 2020 roku i ma zostać poddana ocenie. Ostateczna wersja ma zostać zatwierdzona w pierwszym kwartale 2021 roku. Strategia ma być drogowskazem rozwoju polskiej Gospodarki Wodorowej. Równolegle prowadzone są prace legislacyjne nad ustawą Prawo Wodorowe. Ustawa ta ma definiować i regulować wszystkie aspekty Gospodarki Wodorowej. Ustawa ma wejść w życie w trzecim kwartale 2021 roku.

Załącznik A zawiera szczegółowe zestawienie najważniejszych polskich i europejskich aktów prawnych oraz norm.

## Spis tabel, schematów i rysunków

### TABELE

- Tab.1 Właściwości fizyczne wodoru
- Tab.2 Metody oczyszczania wodoru
- Tab.3 Porównanie parametrów elektrolizera alkalicznego i PEM
- Tab.4 Plany rozwoju technologii elektrolizerów
- Tab.5 Zapotrzebowanie na wodorowe produkty i rozwiązania techniczne w Unii Europejskiej w scenariuszu A i B do 2030 r.

### SCHEMATY

- Schemat 1. Trzy poziomy łańcucha dostaw gospodarki wodorowej
- Schemat 2. Rodzaje wodoru ze względu na technologię produkcji
- Schemat 3. Produkcja wodoru z OZE
- Schemat 4. Zastosowanie wodoru
- Schemat 5. Mikrosystem
- Schemat 6. Rozbudowany mikrosystem
- Schemat 7. Zróżnicowane korzyści zielonego wodoru

### RYSUNKI

- Rys.1 Najwięksi polscy interesariusze w sektorze wodorowym (producenci)
- Rys.2 Koszt produkcji wodoru z wykorzystaniem PV w Europie
- Rys.3 Koszt produkcji wodoru z wykorzystaniem farm wiatrowych w Europie
- Rys.4 Potencjał OZE (PV) w Europie
- Rys.5 Potencjał OZE (PV) w Polsce
- Rys.6 Potencjał OZE (farmy wiatrowe) w Europie
- Rys.7 Potencjał OZE (farmy wiatrowe) w Polsce
- Rys.8 Mały zbiornik na wodór
- Rys.9 Zbiornik kompozytowy na wodór
- Rys.10 Ścianki zbiorników dostosowane do różnych ciśnień
- Rys.11 Przekrój zbiornika na ciekły wodór
- Rys.12 Parametry przykładowej kawerny solnej
- Rys.13 Potencjalne lokalizacje podziemnych magazynów wodoru w Polsce
- Rys.14 Potencjał geologiczny Europy w kontekście podziemnych magazynów
- Rys.15 Magazyny podziemne porównanie
- Rys.16 Europejskie plany gazociągów wodorowych
- Rys.17 Porównanie objętości wodoru sprężonego i LOHC
- Rys.18 Modernizacja taboru kolejowego
- Rys.19 Mapa lokalizacji stacji tankowania wodoru w Europie
- Rys.20 Okres powstawania pierwszych strategii wodorowych w Europie
- Rys.21 Popyt na wodór w Unii Europejskiej w scenariuszu A i B do roku 2030
- Rys.22 Popyt na zielony wodór w Unii Europejskiej w scenariuszu B do roku 2030

## Załącznik A: Zestawienie najważniejszych regulacji polskich i europejskich

Polskie regulacje pośrednie dotyczące technologii wodorowych<sup>20</sup> w kontekście wodoru postrzeganego jako gaz techniczny:

- Dz. U. 1994 Nr 89 poz. 414 Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane
- Dz. U. 2001 Nr 62 poz. 627 Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001r. Prawo ochrony środowiska
- Dz. U. 2003 Nr 80 poz. 717 Ustawa z dnia 27 marca 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym
- Dz. U. 2017 poz. 2126, z późn. zm. Prawo geologiczne i górnicze
- Oświadczenie rządowe z dnia 28 lutego 2017 r. w sprawie wejścia w życie zmian do załączników A i B do Umowy europejskiej dotyczącej międzynarodowego przewozu drogowego towarów niebezpiecznych (ADR),
- Dz. U. 2015 poz. 1223 Ustawa z dnia 12 czerwca 2015 r. o systemie handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych
- Dz. U. 1997 Nr 98 poz. 602 Ustawa z dnia 20 czerwca 1997 r. Prawo o ruchu drogowym
- Dz.U. 2007 nr 186 poz. 1322 Obwieszczenie Ministra Transportu z dnia 7 września 2007 r. w sprawie rejestracji i oznaczania pojazdów
- Dz.U. z 30 maja 2014 poz. 720, Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 13 maja 2014 r. w sprawie dopuszczania do eksploatacji określonych rodzajów budowli, urządzeń i pojazdów kolejowych
- Dz. U. z 2017 r., poz. 2117 z późn. zm. Ustawa o transporcie kolejowym
- Dz. U. z 2016 r., poz. 254 Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 25 lutego 2016 r. w sprawie interoperacyjności systemu kolei
- Dz. U. 1997 Nr 54 poz. 348 Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne
- Dz.U. 2000 nr 85 poz. 957 Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 25 września 2000 r. w sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznych, obrotu energią elektryczną, świadczenia usług przesyłowych, ruchu sieciowego i eksploatacji sieci oraz standardów jakościowych obsługi odbiorców.
- Dz.U. 2010 nr 133 poz. 891 Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 2 lipca 2010 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu gazowego
- Dz.U. 2014 poz. 490 z dnia 14 marca 2014 r. o zmianie ustawy Prawo Energetyczne oraz niektórych innych ustaw

Polskie regulacje bezpośrednio:

- Dz.U. 2018 poz. 317 Ustawa z dnia 11 stycznia 2018 r. o elektromobilności i paliwach alternatywnych

Polskie regulacje bezpośrednio po konsultacjach (przed głosowaniem i opublikowaniem w dzienniku ustaw):

- Zmiany do Ustawy z dnia 25 sierpnia 2006 r. o systemie monitorowania i kontrolowania jakości paliw (Dz. U. z 2019 r. poz. 660 i 1527 oraz z 2020 r. poz. 284)

<sup>20</sup> „Wytyczne branżowe dla magazynu gazów technicznych” przygotowane przez PFGT w 2015 roku



Poniżej zaprezentowane są te najważniejsze mające wpływ na technologie wodorowe i ich wykorzystanie w Europie. Nazwie regulacji towarzyszy krótkie wyjaśnienie, czego ono dotyczy:

- Dyrektywa 2006/42 / EC z dnia 17 maja 2006 r. W sprawie maszyn
- Dyrektywa niskonapięciowa 2014/35 / EU
- Dyrektywa w sprawie prostych zbiorników ciśnieniowych 2014/29 / EU
- ISO 19880-1:2020 Wodór gazowy - Stacje paliw - Część 1: Wymagania ogólne
- Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1303/2014/UE z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności w zakresie aspektu „Bezpieczeństwo w tunelach kolejowych” systemu kolei w Unii Europejskiej
- Zalecenie Komisji 2014/897/UE z dnia 5 grudnia 2014 r. w sprawie kwestii związanych z dopuszczaniem do eksploatacji i użytkowaniem podsystemów strukturalnych i pojazdów na podstawie dyrektyw Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/57/WE i 2004/49/WE
- Rozporządzenie dotyczące międzynarodowego przewozu kolejami towarów niebezpiecznych (RID) stanowi załącznik C do COTIF. Niniejsze rozporządzenie ma zastosowanie do ruchu międzynarodowego. Dyrektywa 2008/68 / WE transponuje RID do prawa wewnętrznego UE, w tym do transportu krajowego. OTIF i Komisja wprowadziły niezbędną koordynację.
- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (EU) 2016/426 z dnia 9 marca 2016 r. W sprawie urządzeń spalających paliwa gazowe
- Dyrektywa ATEX 2014/34 / EU - dotycząca sprzętu i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w przestrzeniach zagrożonych wybuchem
- Dyrektywa 2010/75 / EU w sprawie emisji przemysłowych (zintegrowane zapobieganie zanieczyszczeniom i ich kontrola (IED))
- Dyrektywa 2001/42 / CE w sprawie oceny wpływu niektórych planów i programów na środowisko (dyrektywa SEA)
- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (EU) 2016/426 z dnia 9 marca 2016 r. W sprawie urządzeń spalających paliwa gazowe
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/18 / UE z dnia 4 lipca 2012 r. W sprawie kontroli niebezpieczeństwa poważnych awarii związanych z substancjami niebezpiecznymi (tzw. Dyrektywa SEVESO)
- Dyrektywa ATEX 2014/34 / UE - dotycząca sprzętu i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w przestrzeniach zagrożonych wybuchem
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/52 / EU z dnia 16 kwietnia 2014 r. Zmieniająca dyrektywę 2011/92 / UE w sprawie oceny skutków wywieranych przez niektóre przedsięwzięcia publiczne i prywatne na środowisko).
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2011/92 / EU z dnia 13 grudnia 2011 r. W sprawie oceny wpływu niektórych przedsięwzięć publicznych i prywatnych na środowisko (dyrektywa EIA)
- Dyrektywa 1999/92 / EC Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 16 grudnia 1999 r. W sprawie minimalnych wymagań w celu poprawy bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników potencjalnie zagrożonych atmosferą wybuchową
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/68 / EU z dnia 15 maja 2014 r. W sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do udostępniania na rynku urządzeń ciśnieniowych.

- SAE J2600: Urządzenia do podłączania do tankowania pojazdów napędzanych wodorem
- SAE J2601: Protokoły tankowania lekkich pojazdów wodorem
- SAE J2799: Komunikacja pojazd - stacja tankowania
- ISO 22734-1: Generatory wodoru wykorzystujące proces elektrolizy wody
- SAE J2719 / ISO 14687-2: Jakość paliwa wodorowego w pojazdach z ogniwami paliwowymi

Z uwagi na fakt, iż wodór to gaz niebezpieczny mogący powodować atmosferę wybuchową istnieje szereg regulacji mających na celu zabezpieczenie środowiska pracy we wszystkich przejawach. Mówią o tym:

§37.1 Rozporządzenia ministra spraw wewnętrznych i administracji z dnia 7 czerwca 2010r. W sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów. (Dz.U.10.109.719)

*„ ...w obiektach i na terenach przyległych, gdzie są prowadzone procesy technologiczne z użyciem materiałów mogących wytworzyć mieszaniny wybuchowe, lub w których materiały takie są magazynowane, dokonuje się oceny zagrożenia wybuchem.”*

Normy:

- PN-EN 1127-1 „Atmosfery wybuchowe. Zapobieganie wybuchowi i ochrona przed wybuchem. Część 1: pojęcia podstawowe i metodyka”
- PN-EN 60079-10-1 Atmosfery wybuchowe – Część 10-1: Klasyfikacja przestrzeni – Gazowe atmosfery wybuchowe.
- PN-EN 60079-10-2 Atmosfery wybuchowe. Klasyfikacja przestrzeni. Atmosfery zawierające pył palny
- Standard techniczny ST-IIIG-0401 „Sieci Gazowe. Strefy Zagrożenia wybuchem Ocena i Wyznaczanie
- PN-EN 6079-10-14 „Atmosfery wybuchowe – Część 14: Projektowanie, dobór i montaż instalacji elektrycznych”
- PN-EN 60079-20-1 „Atmosfery wybuchowe – Część 20-1: Właściwości materiałowe dotyczące klasyfikacji gazów i par – Metody badań i dane tabelaryczne”

oraz ustawy będące implementacją dyrektyw europejskich ATEX:

- Dyrektywa ATEX 2014/34 / EU – dotyczy producentów – polski ATEX 137 - Dotyczy sprzętu i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w przestrzeniach zagrożonych wybuchem
- Dyrektywa ATEX 1999/92 / EG – dotyczy pracodawców - polski ATEX 137 - Dotyczy miejsca pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem

czyli:

- ATEX 114 – Dz. U. 2016 poz. 817 - ROZPORZĄDZENIE MINISTRA ROZWOJU z dnia 6 czerwca 2016 r. w sprawie wymagań dla urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w atmosferze potencjalnie wybuchowej)
- ATEX 137 – Dz.U.2010 nr 138 poz. 931 ROZPORZĄDZENIE MINISTRA GOSPODARKI z dnia 8 lipca 2010 r. w sprawie minimalnych wymagań, dotyczących

---

bezpieczeństwa i higieny pracy, związanych z możliwością wystąpienia w miejscu pracy atmosfery wybuchowej

- ATEX 95 – Dz.U. 2005 nr 263 poz. 2203 ROZPORZĄDZENIE MINISTRA GOSPODARKI
  1. z dnia 22 grudnia 2005 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w przestrzeniach zagrożonych wybuchem
  2. Na podstawie art.9 ustawy z dnia 30 sierpnia 2002r. o systemie oceny zgodności

Ponieważ mowa jest o ryzyku pracy w atmosferze wybuchowej, należy wziąć pod uwagę pewne przydatne schematy zarządzania tym ryzykiem. Chodzi o Zarządzanie Ryzykiem ISO 31000 oraz normie EN 31010, która zawiera wytyczne dotyczące wyboru i stosowania technik oceny ryzyka i pomaga wdrożyć zasady i wytyczne podane w ISO 31000.