

HYDROGEN 2040 +

An aerial photograph of a hydrogen production and storage facility. The facility is situated in a vast, green, agricultural landscape. It features several large, white, cylindrical storage tanks, a central processing unit with tall chimneys, and a large, rectangular industrial building. The entire complex is surrounded by a network of pipes and roads, and is enclosed by a fence. The background shows rolling green hills under a clear sky.

Przyszłość
magazynowania
wodoru

Raport
HYDROGEN 2040+
Przyszłość magazynowania wodoru

Indywidualny projekt foresightowy

Kierunek: Gospodarka przestrzenna
Specjalność: Foresight terytorialny
Wydział Geografii i Studiów Regionalnych
Uniwersytet Warszawski

Opracowanie: Michał Kalka
Opieka naukowa: Prof. dr hab. Piotr Werner

Warszawa, 30 czerwca 2023 r.

Przedmowa.....	3
Wprowadzenie	4
Czym jest foresight?.....	4
O projekcie.....	5
Metodyka	7
Wywiady eksperckie	8
Ekspertki	8
Zakres terytorialny	9
Polityka i strategie wykorzystania wodoru	10
Skala globalna.....	10
Skala europejska	11
Skala krajowa	11
Wodór-właściwości	13
Produkcja wodoru.....	14
Trendy wodorowe	16
Magazyny wodoru	20
Sieć przesyłowa.....	24
Bezpieczeństwo i zagrożenia	26
Wizja Hydrogen 2040+	29
Śląsko-małopolska przystań wodorowa	30
Sól ziemi czarnej.....	32
Wodorki metali	35
Kolejne kroki	37
Rekomendacje.....	40
Cele.....	40
Strategiczne działania.....	40
Zakończenie.....	43
Spis literatury	45
Spis tabel	47
Spis rysunków.....	48

Przedmowa

Obecne trendy w energetyce oraz sytuacja geopolityczna na świecie powodują, że temat sposobu i możliwości magazynowania energii, jest jednym z najbardziej kluczowych wyzwań przed którymi stoją światowe gospodarki. Możliwość uniezależnienia systemu energetycznego od zewnętrznych dostaw czy zagwarantowanie dopływów energii w przypadkach skrajnych poprzez jej odpowiednie bilansowanie, składa się na bardzo ogólny termin bezpieczeństwa energetycznego. Działania prowadzone w tym zakresie zróżnicowane są dla potrzeb danego obszaru. W przypadku Polski wyróżnić można poprawę efektywności energetycznej, wzrost bezpieczeństwa dostaw paliw i energii czy dywersyfikację struktury wytwarzania energii elektrycznej poprzez wprowadzanie nowych technologii jej produkcji. Jako szansa dla wyżej uwzględnionych obszarów strategicznych pojawił się temat możliwości rozwoju i implementacji technologii wodorowych w gospodarce. Między innymi z tego powodu sporządzona została Polska Strategia Wodorowa do roku 2030. Zawarto w niej nie tylko status naukowy technologii wodorowych, ale również określono konieczne do wykonania, cele o różnym zakresie czasowym. Wśród nich postulat o zawiązanie i stworzenie pięciu dolin wodorowych na terenie kraju. Jedną z nich, obejmuje obszar województw Śląskiego i Małopolskiego. Dolina ta zrzesza jedne z najlepszych uczelni krajowych, które będą miały możliwość realizacji obopólnej współpracy i dzielenia się doświadczeniem nie tylko w obrębie badawczym, ale także pomiędzy sektorem prywatnym i publicznym. Po analizie wszystkich czynników i dostrzeżeniu wielkiego potencjału tego przemysłowego regionu, który przez lata definiował termin – bezpieczeństwo energetyczne Polski, narodził się pomysł na realizację projektu foresightowego, Hydrogen 2040+ - Przyszłość magazynowania wodoru.

Można wyróżnić wiele ambitnych stwierdzeń na temat znaczącej roli, jaką wódór mógłby odegrać przy transformacji energetycznej jednak tempo wprowadzania zmian i podejmowania decyzji doprowadza do jego realnie znikomej roli w tym procesie. Wysoce prawdopodobna jest ostatecznie zmiana tego nastawienia jednak pytanie brzmi, kiedy i na jaką skalę? Dzisiejsze prognozy wskazują, że wódór w 2050 roku zaspokoi zaledwie 5% światowego zapotrzebowania na energię. W przypadku miksu energetycznego Unii Europejskiej prognoza jest nieco lepsza, wskazując na 11% w 2050 roku. W przypadku prognoz na taką skalę, często nie sposób zrozumieć, jak bardzo systemy poszczególnych krajów, mogą różnić się ze względu na kapitał, położenie geograficzne czy możliwości dostosowania danej technologii do panujących warunków gospodarczych. Wobec tego, szczególnie istotna jest analiza dla wybranych regionów i dostrzeżenie na jej podstawie, gdzie istnieje największy potencjał i możliwości wdrażania wybranych nowych rozwiązań. Poniższy raport bada sytuację magazynów wodoru. Celem było sformułowanie wizji oraz strategicznych rekomendacji, które pomogą w formułowaniu polityki wodorowej w oparciu o kolejne etapy pozyskiwania wiedzy na temat doliny wodorowej i jej potencjału.

Wprowadzenie

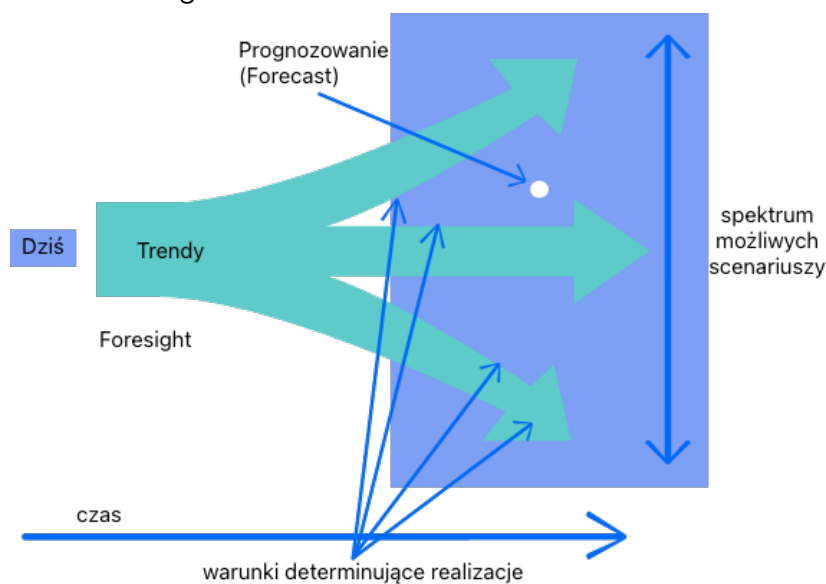
Raport Hydrogen 2040+ — Przyszłość Magazynowania Wodoru, przygotowany został w ramach programu Indywidualny Projekt Foresightowy na kierunku studiów gospodarka przestrzenna o specjalności Foresight Terytorialny na Wydziale Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego.

Problematyka raportu dotyczy analizy obecnego stanu oraz potencjału rozwojowego technologii magazynowania wodoru. Identyfikacja kluczowych trendów technologicznych, ekonomicznych i społecznych oraz barier akceptacji i wdrażania technologii magazynowania wodoru pozwoliła na rozpoznanie potencjalnych strategicznych rozwiązań oraz wizji rozwoju dla tego zagadnienia. Opracowanie powstało we współpracy z Śląsko-Małopolską Doliną Wodorową, co umożliwiło udział ekspertów środowisk akademickich, biznesu oraz innych klastrów tej branży – dolin wodorowych, a wynikiem dzielenia się wiedzą i doświadczeniem jest poniższy raport foresightowy.

Czym jest foresight?

Próby przewidywania przyszłości, zwłaszcza technologii, absorbują zarówno specjalistów, naukowców i przedsiębiorców, jak i humanistów i filozofów oraz opinię publiczną. Prawdopodobieństwo trafnej dedukcji dotyczącej dominującej w przyszłości technologii

jest zagadnieniem trudnym i złożonym. Jednocześnie jest to kwestia, która może stale angażować ludzkie umysły, kreując różne supozycje i wywierając przemożny wpływ i chęć, a nawet pożądanie poznania przyszłości. Myślenie o przyszłości motywuje do działania. Pozwala przygotować się na efekty wywoływane przez szybko zmieniający się świat. Foresight, w kontekście badań zorientowanych na przyszłość, to systematyczne i ustrukturyzowane podejście mające na celu, między innymi analizę, przewidywanie i zrozumienie potencjalnego rozwoju badanego zagadnienia w długiej perspektywie czasowej. Zamiast podejścia prostoliniowego obrazującego jedną wizję danego zjawiska (jak ma to miejsce w przypadku metod prognostycznych), metody foresightowe pozwalają na szerszy wgląd w obserwowane zjawiska i ich otoczenie. Obejmują one, między innymi, analizę trendów, czynników i niepewności w celu rozpoznania prawdopodobnych przyszłych scenariuszy, umożliwiając proaktywne podejmowanie decyzji i planowanie strategiczne.



Rysunek 1. Foresight graficznie

Źródło: Opracowanie własne

Foresight wykorzystuje szereg metod, w tym: wywiady z ekspertami, analizę porównawczą i analizę trendów, aby naświetlić ścieżki postępu. Łącząc gromadzenie danych, oceny jakościowe i modelowanie ilościowe, foresight zapewnia wgląd w potencjalne trajektorie rozwoju lub zmian obserwowanych zjawisk, umożliwiając interesariuszom identyfikację szans, łagodzenie ryzyka i dostosowanie się do przyszłych wyzwań.

W erze szybkich zmian technologicznych foresight służy jako cenne narzędzie do zdystansowanej oceny złożoności dynamicznego i wzajemnie połączonego świata, dostarczając informacji do formułowania polityki, decyzji inwestycyjnych i strategii innowacyjnych na rzecz zrównoważonej polityki działania w przyszłości.

O projekcie

Wodór jako surowiec posiada bogatą ponad wiekową historię. Początkowo był wykorzystywany głównie jako surowiec chemiczny, do produkcji nawozów. Współczesne ambicje wykorzystania wodoru jako nośnika energii napotykają jednak pewne ograniczenia. Kluczowym wyzwaniem jest dekarbonizacja aktualnie wykorzystywanych procesów produkcji wodoru albo wykreowanie nowych, czystych technologii jego pozyskiwania, które obecnie wiążą się ze znacznymi kosztami oraz stratami energii, utrudniając jego powszechne stosowanie w dążeniu do dekarbonizacji systemów energetycznych. Pomimo tej poważnej bariery, branża energetyczna nadal wykazuje duże zainteresowanie wodorem. Wciąż niewielka

skala przedsięwzięć wodorowych nie warunkuje jeszcze opłacalności wdrażania szeregu innowacji na masową skalę, począwszy od uznanych dostawców technologii kończąc na rozwijających się firmach Startup, dążących do opracowania bardziej wydajnych i skalowalnych koncepcji produkcji, magazynowania i ogólnie rzecz ujmując, wykorzystania wodoru. Głównym celem projektu jest odpowiedź na pytanie co czeka wodór w przyszłości w kontekście systemów energetyki. Kluczowe znaczenie ma ich przypadku zdolność masowego pozyskiwania nośnika energii (pierwotnej lub wtórnej) oraz jego zmagazynowanie w dłuższym okresie. Czy magazyny wodorowe mogą odegrać znaczącą rolę w stale zmieniających się politykach energetycznych? W indywidualnym projekcie foresightowym sformułowano cele, które pomogły ukierunkować dalsze badanie.

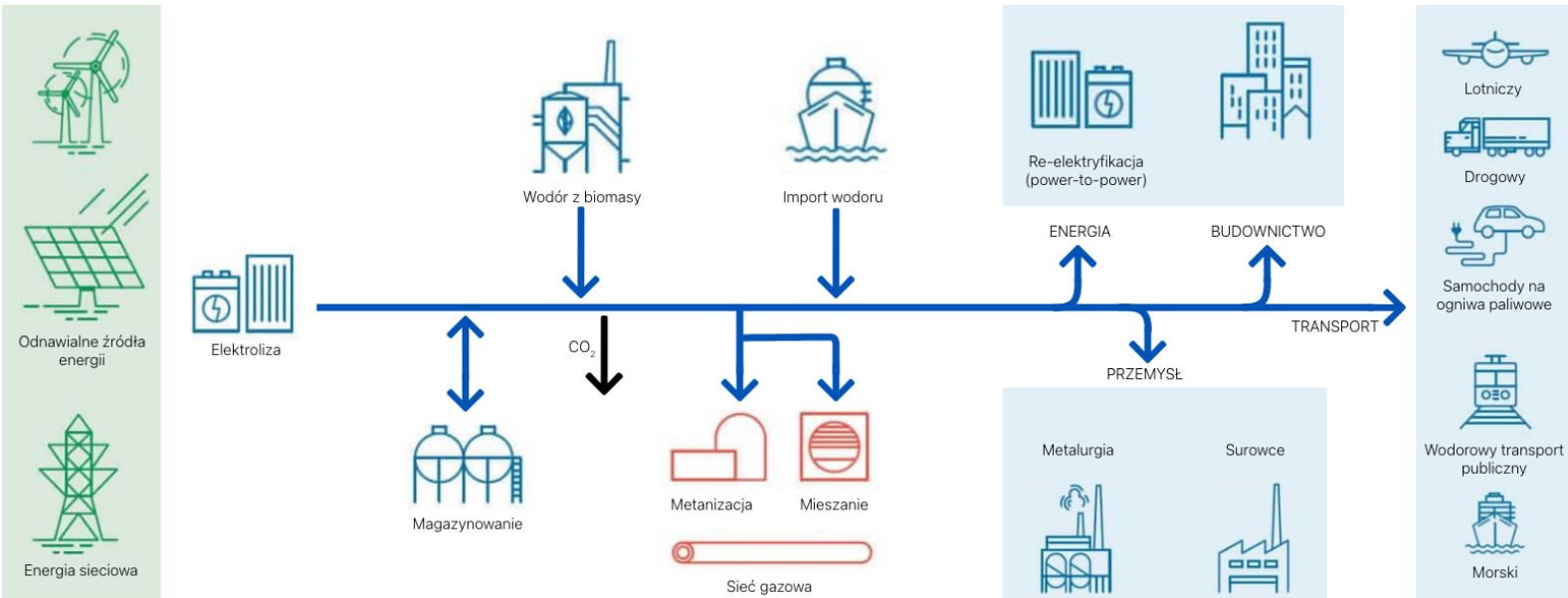
Cele projektu:

1. *Identyfikacja i analiza potencjału wdrażania technologii magazynowania wodoru.*
2. *Ewaluacja obecnego stanu technologii magazynowania wodoru oraz jej potencjału do skalowalności i efektywności w ciągu najbliższych 20 + lat.*
3. *Identyfikacja kluczowych czynników (trendów) i barier akceptacji i wdrażania technologii magazynowania wodoru, opracowanie strategicznych wniosków i rekomendacji dla tych problemów.*
4. *Współpraca z zainteresowanymi stronami biznesu, środowisk*

akademickich oraz dołin wodorowych przy budowaniu konsensusu w sprawie polityki wodorowej.

Sformułowane cele i problematyka projektu stały się punktem wyjścia dla kolejnych etapów pracy badawczej. Wy-

korzystane metody jakościowe i ilościowe pozwoliły na przygotowanie rekomendacji, bazy wiedzy oraz strategicznych wniosków dotyczących magazynowania wodoru, które stanowią istotne wsparcie dla osób zaangażowanych w przyszłą strukturę energetyki

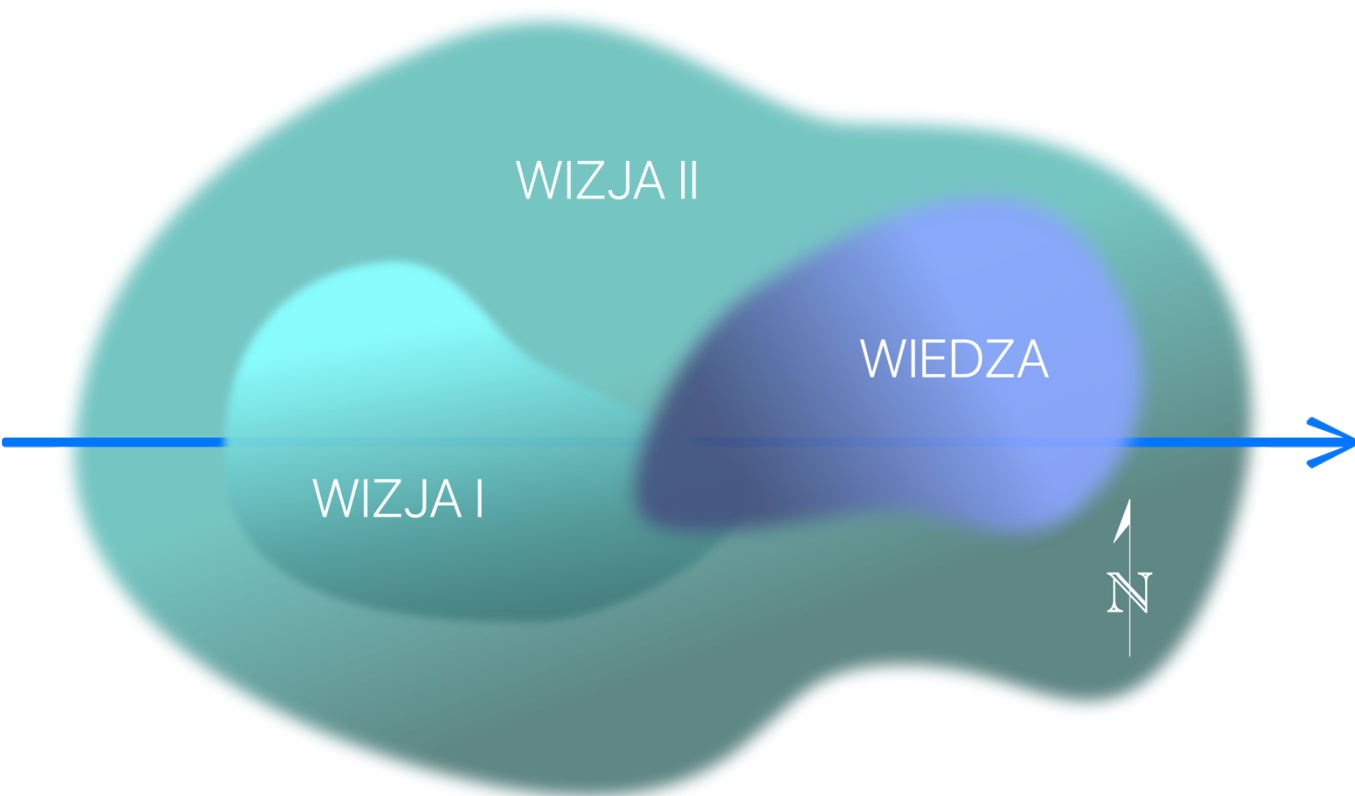


Rysunek 2. Modelowa wizja gospodarki opartej na wodorze

Źródło: Opracowanie własne

Metodyka

Jednym z najistotniejszych momentów w projekcie foresightowym jest etap podjęcia decyzji co do wyboru odpowiednich metod badawczych. W przypadku Hydrogen 2040 projekt opiera się na metodzie 3xW – Wizja I, Wiedza, Wizja II [1]. Pierwszy etap dotyczący zidentyfikowania wizji I polegał na przeprowadzeniu 10 wywiadów z ekspertami dziedzin dotyczących polityki energetycznej, technologii wodorowych, sektora energetycznego, ekonomii, gospodarki przestrzennej czy futurologii. Głównym celem paneli eksperckich była identyfikacja kluczowych czynników wpływających na technologię magazynowania wodoru. Ponadto wskazane zostały główne trendy technologiczne oraz zarysowana została wizja przyszłości. Dodatkowym efektem było sformułowanie głównych wyzwań i problemów związanych z technologią magazynowania wodoru zarówno w perspektywie krótko, jak i długoterminowej. Kolejny etap (Wiedza) stanowi połączenie metod ilościowych i jakościowych. Począwszy od analizy danych zastanych (desk research), dokumentów strategicznych oraz trendów, a kończąc na analizie patentowej oraz analizach statystycznych wybranych danych sektora energetycznego. Etap ten stanowi kluczowy element pod względem wiedzy kontekstowej i horyzontalnej badania, ponieważ agreguje dostępne informacje na temat technologii magazynowania wodoru, potrzebne do finalizacji raportu. Powyższe elementy 3xW zostały podsumowane w trakcie ostatniego segmentu (Wizja II). Na tym etapie należało zestawić wszystkie zebrane we wcześniejszych częściach informacje i dane. Umożliwiło to sformułowanie strategicznych wniosków i rekomendacji oraz pozwoliło nakreślić przyszłą wizję technologii magazynowania wodoru.



Rysunek 3. Modelowa wizja metody 3xW

Źródło: Opracowanie własne na podstawie raportu InFuture Institute „Gdańsk Przyszłości”

Wywiady eksperckie

Przeprowadzono łącznie 10 wywiadów eksperckich. Celem rozmów było zdefiniowanie obecnie najważniejszych trendów w technologii magazynowania wodoru. Ponadto, w trakcie dyskusji, udało się wyznaczyć główne czynniki wpływające na gospodarkę wodorową w skali globalnej, krajowej oraz lokalnej (dla Śląsko-Małopolskiej Doliny Wodorowej). Postrzegając magazyny energii jako istotny element łańcucha wartości gospodarki wodorowej, omówione zostały również elementy łańcucha produkcji wodoru jako nośnika energii i oceny stanu gotowości istniejącej już infrastruktury do implementacji tych technologii. Informacje te w szczególności pomogły przy definiowaniu przyszłej wizji oraz opracowaniu strategicznych rekomendacji wykorzystania wodoru jako nośnika energii.

Eksperci

Piotr Olczak – dr inż., Profesor Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk

Paweł Gajda – dr inż., Profesor Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie

Mikołaj Nowak – mgr inż., doktorant Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie

Piotr Micek – dr inż. Piotr Micek, Profesor Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie

Grzegorz Tchorek – dr hab., Profesor Uniwersytetu Warszawskiego

Piotr Werner – dr hab., Profesor Uniwersytetu Warszawskiego

Anonimowy Ekspert – ekspert z zakresu sektora energetycznego

Maciej Kalka – mgr inż., doktorant Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie

Anonimowy Ekspert – ekspert z zakresu sektora energetycznego

Mirosław Skibski – prezes Śląsko-Małopolskiej Doliny Wodorowej

Andrzej Węgrzyn – dr inż., członek zarządu Dolnośląskiej Doliny Wodorowej



Rysunek 4. Mapa dolin wodorowych w Polsce

Źródło: Opracowanie własne na podstawie <https://h2poland.com.pl/pl/aktualnosci/stowarzyszenie-slasko-malopolska-dolina-wodorowa-zarejestrowana-w-krajowym-rejestrze-sadowym>

Zakres terytorialny

Istotą foresightu terytorialnego jest określenie dla jakiego obszaru prowadzone jest dane badanie. W projekcie Hydrogen 2040 + głównym interesariuszem pozostaje Śląsko-Małopolska Dolina Wodorowa obejmująca swoim zasięgiem tereny Górnego Śląska oraz województwa małopolskiego. Obszar ten w Polsce dla sektora energetycznego posiada wyjątkowo strategiczne znaczenie. Współcześnie prowadzona polityka energetyczna wymaga wprowadzania takich innowacyjnych projektów, które pozwolą na sprawiedliwą i zrównoważoną transformację tej gałęzi przemysłu w tym

regionie, w myśl idei dekarbonizacji polskiego systemu energetycznego oraz wywiązania się z porozumień zawartych z Unią Europejską czy globalnego Porozumienia Paryskiego dotyczącego neutralności klimatycznej do 2050 roku. Jednak specyfika technologii gospodarki i magazynów wodorowych sprawia, że wnioski zawarte w raporcie stanowią istotny punkt wyjścia nie tylko dla Śląsko-Małopolskiej Doliny Wodorowej. Często prezentowane dane czy rekomendacje mogą znaleźć odzwierciedlenie także w skali całego kraju czy nawet Unii Europejskiej.

Wspólny system energetyczny UE, w którym potencjalnie znajdzie się miejsce dla magazynów wodoru jako magazynów energii, powinien być zintegrowany funkcjonalnie i technologicznie

oraz realizować w ramach tego systemu ideę wspólnej polityki energetycznej, w której mimo zdecentralizowanego systemu dostarczania, produkcji czy magazynowania energii wciąż celem nadrzędnym pozostanie bezpieczeństwo energetyczne oraz zrównoważony rozwój regionów UE.

Polityka i strategie wykorzystania wodoru

Wykorzystywanie wodoru w gospodarce w systemach energetycznych napotyka szereg kompleksowych wyzwań, takich jak dostępność, koszty, akceptowalność (społeczna), bezpieczeństwo, efektywność i czystość. Mimo powszechnego uznania pilnej potrzeby skalowania globalnego wykorzystania wodoru w energetyce, w celu osiągnięcia celów Porozumienia Paryskiego, obecne tempo rozwoju jest wyraźnie zbyt powolne i nie dorównuje rozwojowi obserwowanemu w dziedzinie instalacji odnawialnych źródeł energii, rozbudowy sieci elektroenergetycznych oraz systemów magazynowania energii w bateriach.

"Internationally, hydrogen storage capacities are insufficient to achieve the goals set out in global decarbonization scenarios. Although various promising technologies are currently being tested in pilot projects worldwide¹"

¹ Ekspert podczas wywiadów.

Wśród różnych interesariuszy istnieje znaczące zainteresowanie potencjałem wodoru jako nośnikiem energii, wciąż jednak niewielką uwagę przykładła się do dokładniejszego wglądu w przyszłość wykorzystywania technologii wodorowych.

Rola wodoru jako nośnika energii w kontekście przejścia do bardziej zrównoważonego systemu energetycznego staje się coraz bardziej istotna szczególnie w ostatnich latach. W dążeniu do dekarbonizacji wybranych sektorów, ekologiczny potencjał wodoru stanowi kluczowy fundament, równocześnie zapewniając dostępność, przystępność cenową oraz bezpieczeństwo. W miarę postępującego rozwoju pozyskiwania ze źródeł odnawialnych niskoemisyjnego wodoru, coraz większą rolę będzie on pełnił jako strategiczny nośnik energii, zapewniając bezpieczną przyszłość systemom energetycznym. Wizja wodoru jako elementu przyszłych struktur energetycznych, wymaga włączenie go w strategię oraz plany rozwojowe różnego szczebla. W przypadku Śląsko-Małopolskiej Doliny Wodorowej, można rozróżnić 3 skale oddziałujące na rozwój technologii wodorowych tego obszaru: globalną, europejską i krajową.

Skala globalna

Polska angażując się w globalne inicjatywy podejmowane na rzecz ochrony klimatu, zobowiązuje się realizować umowy w dziedzinie polityki klimatycznej zawarte w ramach Organizacji Narodów Zjednoczonych, takie jak Konwencja Ramowa ONZ w sprawie Zmian Klimatu (UNFCCC) z 1992 roku,

Protokół z Kioto z 1997 roku czy Porozumienie paryskie (2015).

Kluczowym celem Porozumienia paryskiego, jeśli chodzi o globalną reakcję na zagrożenia związane ze zmianami klimatu, jest ograniczenie wzrostu średniej globalnej temperatury do poziomu znacznie poniżej 2°C, dążąc jednocześnie do podjęcia wysiłków mających na celu ograniczenie wzrostu temperatury do 1,5°C. Natomiast Organizacja Narodów Zjednoczonych ds. Rozwoju Przemysłu (UNIDO) w swoim raporcie (2019 rok) wskazuje na wysokie znaczenie technologii wodorowych w procesach transformacji i dekarbonizacji gospodarki, przemysłu czy sektora energetycznego.

Skala europejska

W Europie, kraje UE i stowarzyszone są liderami w procesie transformacji energetycznej w skali globalnej, w szczególności dzięki założeniom Zielonego Ładu – gospodarki zrównoważonej i niskoemisyjnej, której celem jest osiągnięcie neutralności klimatycznej do roku 2050. Strategia wodorowa Unii Europejskiej (2020) zakłada instalację co najmniej 40 GW elektrolizerów do roku 2030 (6 GW do roku 2024). Inicjatywa REPower EU (2022) podnosi poprzeczkę, dążąc do produkcji krajowego odnawialnego wodoru na poziomie 10 Mt oraz importu 10 Mt wodoru do roku 2030. W ramach inicjatywy REPowerEU, przegląd Dyrektywy dotyczącej Energii Odnawialnej UE proponuje, aby do roku 2030 udział energii odnawialnej w całkowitym miksie energetycznym w Europie wynosił 45%, co przyczyniłoby się do

osiągnięcia pojemności generacji energii odnawialnej na poziomie 1 236 GW, w porównaniu do 1 067 GW przewidywanych w ramach programu UE: Fit for 55. Dlatego duże znaczenie przywiązuje się do skalowania produkcji odnawialnego wodoru w UE, gdzie niskoemisyjny wodór traktowany jest jako etap przejściowy.

Główne obszary do roku 2030 obejmują zwiększanie pojemności elektrolizerów, dekarbonizację istniejącego wykorzystania wodoru w sektorze przemysłowym, promowanie wodoru dla nowych zastosowań oraz rozwój infrastruktury dystrybucyjnej, w tym udogodnień magazynowania.

Skala krajowa

Krajowe polityki i strategie przyjmowane przez państwa na świecie niejednokrotnie wskazują na wysoki potencjał technologii wodorowych w przypadku przechodzenia na nisko- i zeroemisyjną gospodarkę. W Polsce można zaobserwować plany na integrację rozwiązań wodorowych w przyszłym miksie energetycznym. Tabela 1 prezentuje główne dokumenty, ich cele i założenia, które wytyczają kierunek rozwoju nie tylko gospodarki wodorowej, ale i innych technologii wpływających na kompozycję struktury energetycznej.

Gospodarka oparta o wodór lub wykorzystująca go w mniejszym stopniu i tak wymaga stworzenia nowych łańcuchów wartości (value chains) – sekwencji nowych działań. Oznacza to nacisk na rozwój całego systemu elektroenergetycznego od podstaw, a m.in. budowy nowych mocy na bazie odnawialnych

źródeł energii, tworzenia instalacji do produkcji i magazynowania wodoru czy dostosowywaniu istniejącej już infrastruktury do nowych potrzeb. Wymaga to nie tylko środków finansowych, ale również niezbędnej koordynacji działań.

Tym samym strategię powinny zawierać w sobie konkretnie ustalone cele realne do osiągnięcia, a równocześnie – zestaw narzędzi do egzekwowania kolejnych zaplanowanych kamieni milowych.

Tabela 1. Wodór a krajowe polityki i działania

Strategia na rzecz odpowiedzialnego rozwoju (SOR)	Polityka energetyczna Polski do 2040 r. (PEP 2040)	Krajowy plan na rzecz energii i klimatu (KPEIK)	Polska Strategia Wodorowa (PSW)
Projekt flagowy elektromobilność.	1.5. Zapewnienie możliwości pokrycia zapotrzebowania na gaz ziemny przez: [...] wykorzystanie krajowego potencjału w zakresie produkcji biogazu, biometanu, gazów syntetycznych, gazu syntetycznego, wodoru.	-7% redukcji emisji gazów cieplarnianych w sektorach nieobjętych systemem ETS w porównaniu do poziomu w roku 2005.	Wdrożenie technologii wodorowych w energetyce i ciepłownictwie.
Projekt strategiczny Program Rozwoju Elektromobilności.	2A.8. Zapewnienie warunków wykorzystania gazu ziemnego i innych paliw gazowych, w szczególności dla potrzeb regulacyjnych KSE.	21-23% udziału OZE w końcowym zużyciu energii brutto (cel 23% będzie możliwy do osiągnięcia w sytuacji przyznania Polsce dodatkowych środków unijnych, w tym przeznaczonych na sprawiedliwą transformację), uwzględniając: 14% udziału OZE w transporcie, roczny wzrost udziału OZE w ciepłownictwie i chłodnictwie o 1,1 pkt. proc. średniorocznie.	Wykorzystanie wodoru jako paliwa alternatywnego w transporcie.
Program polskiej energetyki jądrowej.	4B.5. Prowadzenie działań badawczo-rozwojowych w zakresie transportu i magazynowania gazów syntetycznych, biogazu, biometanu i wodoru za pomocą infrastruktury gazu ziemnego.	Wzrost efektywności energetycznej o 23% w porównaniu z prognozą PRIMES2007.	Wsparcie dekarbonizacji przemysłu.
	4C.7. Zapewnienie warunków funkcjonowania i instrumentarium wsparcia rynku paliw alternatywnych, w szczególności: elektromobilności, CNG i LNG, paliw syntetycznych w transporcie oraz wodoru.	redukcję do 56-60% udziału węgla w produkcji energii elektrycznej.	Produkcja wodoru w nowych instalacjach.
	6.4. Zapewnienie warunków bilansowania OZE.		Sprawny i bezpieczny przesył, dystrybucja i magazynowanie wodoru. Stworzenie stabilnego otoczenia regulacyjnego.

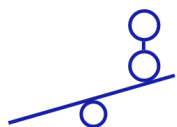
Źródło: Opracowanie własne



Łatwo dostępny jednak drogi w produkcji jako nisko-emisyjny nośnik energii



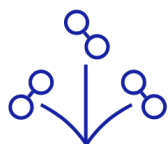
Łatwopalny jednak inaczej niż inne gazy



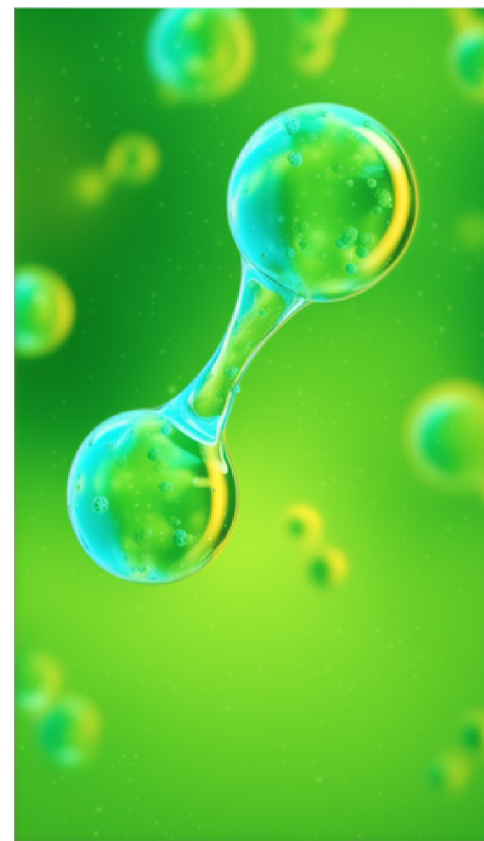
Lekki, ale jego gęstość energetyczna Jest problematyczna



Magazynowanie ma duży potencjał niestety często jest nieefektywne



Ogromny potencjał oraz duże wyzwania



Rysunek 5. Właściwości wodoru

Źródło: Opracowanie własne

Wodór–właściwości

Wodór posiada bardzo zróżnicowane cechy, w kontekście możliwości jego wykorzystania w systemie energetycznym. Podobnie jak energia elektryczna, pełni rolę nośnika energii, który może być wytwarzany za pomocą źródeł odnawialnych. Dodatkowo, można go wykorzystywać do magazynowania energii oraz do ładowania baterii poprzez wykorzystanie ogniw paliwowych. Z drugiej strony, wodór, podobnie jak paliwa kopalne, jest łatwopalny i wytwarza ciepło podczas spalania. Może być wyodrębniany z węglowodorów, przechowywany w zbiornikach, transportowany przez rurociągi oraz magazynowany na dłuższy okres. Ponadto, wykazuje zdolność do przekształcania się między stanem gazowym a ciekłym.

„Storage is only one element, undoubtedly an important one, of a functioning hydrogen supply chain and the hydrogen economy²”

Te unikalne właściwości fizyko-chemiczne czynią wodór intrygującą perspektywą w kontekście transformacji energetycznej. Jednakże, generują one również przeszkody w jego powszechnym stosowaniu, zwłaszcza w zakresie bezpieczeństwa, rozwoju infrastruktury, metod produkcji, odpowiednich zastosowań i opłacalności komercyjnej.

² Ekspert podczas wywiadów

Produkcja wodoru

Rozpoczynając dyskusję na temat magazynowania wodoru, nie sposób nie poruszyć kwestii jego produkcji. Wodór może być wytwarzany za pomocą różnych metod, które charakteryzują się zróżnicowaną wydajnością i wpływem na środowisko.

Jest on często klasyfikowany według (intuicyjnej) skali kolorów, które rozróżniają się, kategoryzując użyte metody produkcji, surowca i czystość ostatecznej formy wodoru. Poniższa tabela przedstawia podsumowanie różnych dostępnych opcji produkcji wodoru, uwzględniające surowce, z których jest wytwarzany, technologię oraz poziomy emisji gazów cieplarnianych (CO₂). Kolor zielony przypisuje się zero – lub niskoemisyjnym technologiom.

Tabela 2. Przegląd technologii produkcji wodoru

	Kolor wodoru	Surowiec	Technologia produkcji	Bezpośrednia emisja gazów cieplarnianych kg CO ₂ /kg H ₂	Pośrednia emisja gazów cieplarnianych kg CO ₂ /kg H ₂
Produkcja z użyciem energii elektrycznej	Zielony	Energia elektryczna z OZE, woda i/lub para z termolizy		-	>0
	Żółty	Energia sieciowa, woda	Elektroliza	-	<1–30 W zależności od ilości węgla w mieszkaniu energetycznym.
	Różowy	Energia atomowa, Woda		-	>0
Produkcja z użyciem paliw kopalnych	Szary	Gaz ziemny	Reforming metanu	9 – 11	0.5 – 4
	Brązowy	Węgiel brunatny	Gazyfikacja	18 – 20	1 – 7
	Czarny	Węgiel kamienny	Gazyfikacja	18 – 20	1 – 7
	Niebieski	Gaz ziemny lub węgiel kamienny	Reforming metanu z CCS Gazyfikacja z CCS	0.5–4	0.5–7
	Turkusowy	Gaz ziemny	Piróliza	Węgiel stały (Produkt uboczny)	0.5–5
	Zielony	Biogaz lub biomasa	Reforming z lub bez CCS Gazyfikacja z lub bez CCS	Prawdopodobieństwo ujemnej emisji z CCS	1–3
Inne	Czerwony	Ciepło atomowe, woda	Termoliza	-	>0
	Fioletowy	Energia i ciepło atomowe, woda	Termoliza i elektroliza	-	>0
	Pomarańczowy	Promieniowanie słoneczne, woda	Fotoliza	-	>0
	Zielony	Odpady drzewne, plastiki, komunalne	Termochemiczna	Prawdopodobieństwo ujemnej emisji z CCS	Nie oceniono, ponieważ zmienność w łańcuchach wartości jest zbyt duża, aby dokładnie odzwierciedlać ekwiwalent emisji gazów cieplarnianych.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie wywiadów eksperckich i raportu DNV Hydrogen Report 2022

Jak można zauważyć w tabeli 2, wielkości emisji gazów cieplarnianych mogą znacznie różnić się, nawet w obrębie tej samej kategorii koloru wodoru ze względu na różnice w efektywności, emisjach w łańcuchu dostaw i miksu energetycznym. Dlatego też, wyłączenie korzystania z kolorów do określania i omawiania poziomów emisji wodoru może być mylące. W związku z tym, obecnie obserwuje się tendencję do klasyfikowania technologii pozyskiwania wodoru pod względem intensywności węglowej, która wyraża wielkość emisji w jednostkach równoważników CO₂ na jednostkę wyprodukowanego wodoru. Takie podejście umożliwia rzeczywiste porównanie technologii i wynikających z nich poziomów emisji.

„W podanej perspektywie 20 letniej, wodór może pojawić się w strukturze produkcji energii, ale nie liczyłbym, że jego udział przekroczy 20%.³”

Rysunek 6. Wizja eksplozji zbiornika wodorowego.

Źródło: Opracowanie własne za pomocą algorytmu Stable Diffusion 2.1.

Kolejnym istotnym aspektem przy analizie metod produkcji wodoru jest osiągnięty przez nie poziom czystości. Elektroliza wody jest znaną technologią produkcji wodoru o najwyższym poziomie czystości, ponieważ jej efektem ubocznym jest tlen. Różne sektory przemysłu produkcji końcowej, wykorzystujące wodór jako surowiec, mają zróżnicowane wymagania dotyczące czystości wodoru, przy czym np. ogniwa paliwowe wymagają wysokich poziomów czystości. W rezultacie, gdy wodór jest produkowany z paliw kopalnych, często konieczne jest użycie dodatkowo procedur oczyszczania, aby spełnić określone wymagania jakościowe, co skutkuje utratą energii i zmniejszeniem efektywności tych rozwiązań.



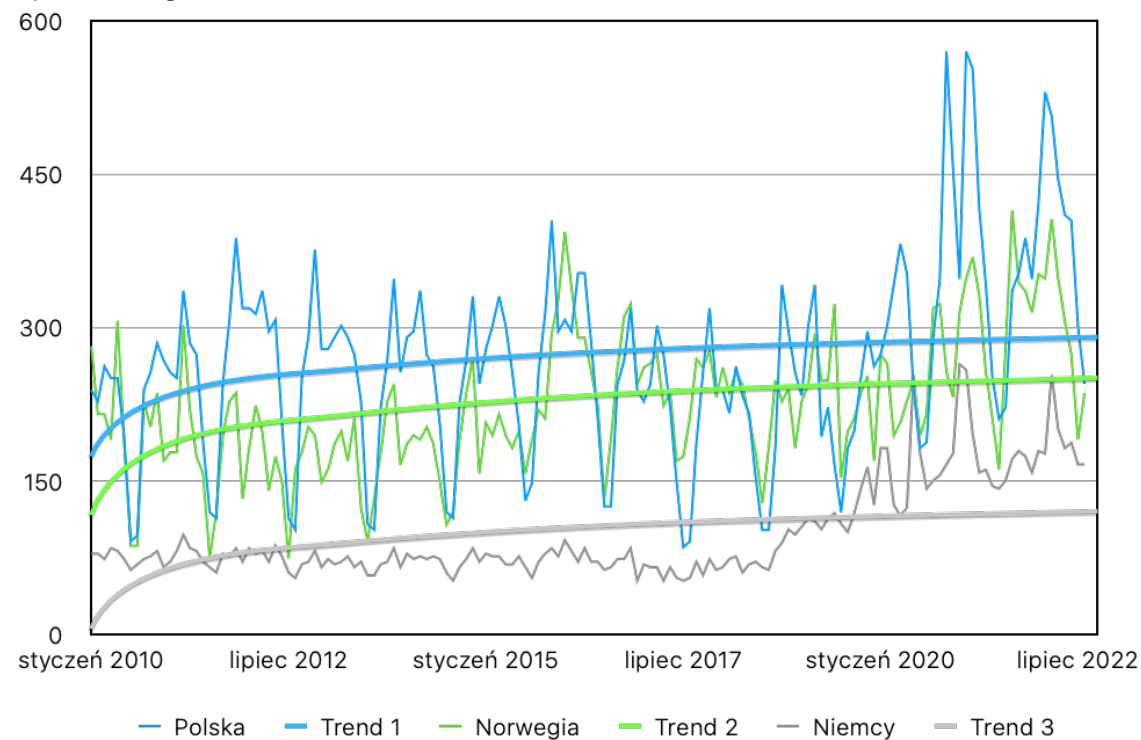
³ Ekspert podczas wywiadów

Trendy wodorowe

W celu określenia trendów oraz potencjału wdrażania technologii wodorowych w Polsce, oprócz wiedzy eksperckiej, można wykorzystać także inne, eksperymentalne wskaźniki referencyjne takie jak analizę trendów zapytań według Google, analizę ilości patentów dla odnawialnych źródeł energii, analizę ilości wyspecjalizowanych przedsiębiorstw czy oszacowanie środków finansowych przeznaczanych na sektor badań i rozwoju z uwzględnieniem konkretnych, wybranych branż.

„Głównym trendem będzie agresywne wypieranie energetyki paliw kopalnych poprzez energetykę OZE stabilizowaną wodorem (H₂OZE). Wyzwaniem będzie zmitigowanie ryzyka związanego z realizacją koncepcji węgiel + atom w Polskiej energetyce w najbliższych 5-10 latach.⁴”

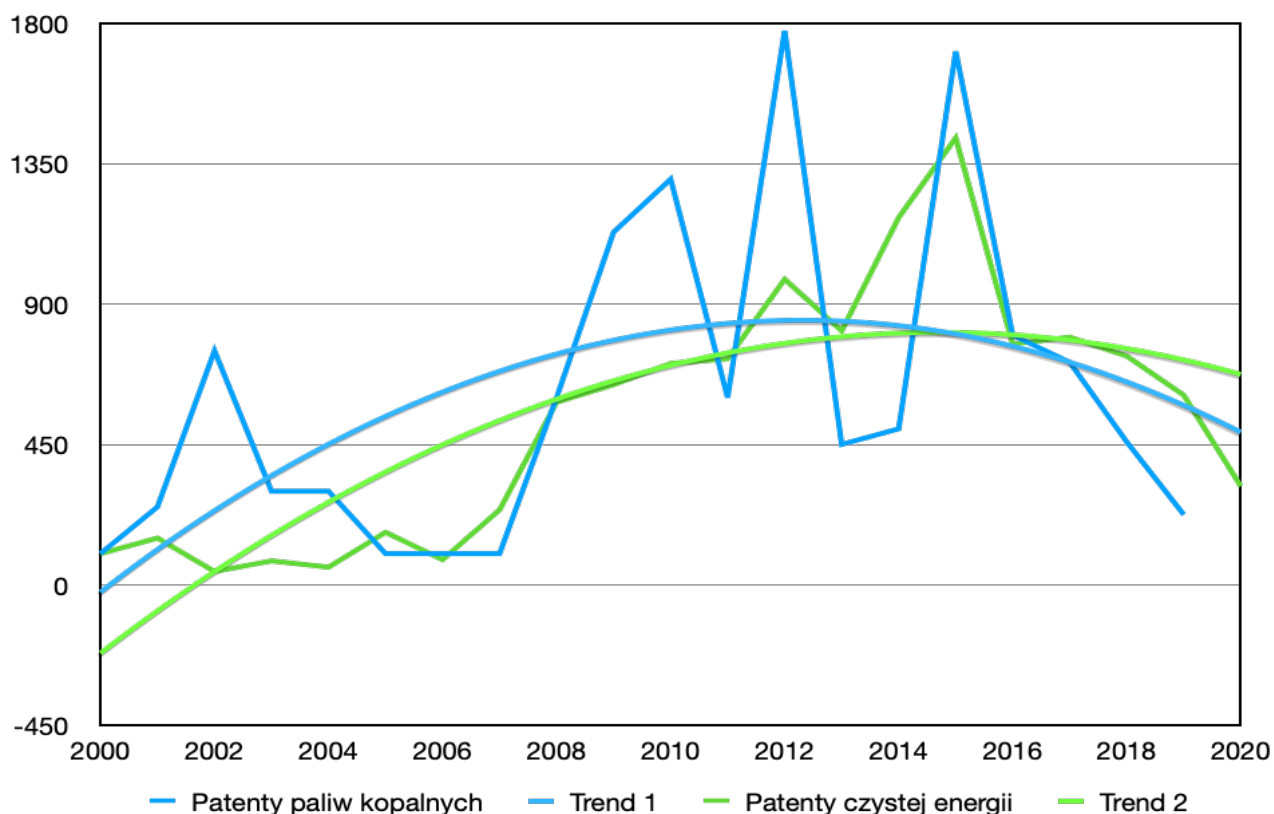
Wyniki analizy trendów, według wyszukiwań przeglądarki Google, wskazują na stale rosnący jednak stabilny trend zarówno w Polsce, jak i innych analizowanych krajach. Rysunek podzielony jest na wyraźne sektory. Może to sugerować sezonowość, która wpływa na zachowania ludzi. Znaczący wzrost przypada na początek roku 2020. Wtedy też w Polsce dużym zainteresowaniem cieszyły się technologie fotowoltaiczne. Trend polski koreluje z trendem Norweskim, natomiast zaskoczeniem mogą być niskie wartości w przypadku Niemiec. Na arenie międzynarodowej to właśnie Niemcy przodują w wykorzystywaniu rozwiązań wodorowych i postrzegani są jako wiążący duże nadzieje z rozwojem tej technologii.



Rysunek 7. Liczba wyszukiwań hasła „Hydrogen” według kraju przeglądarki Google

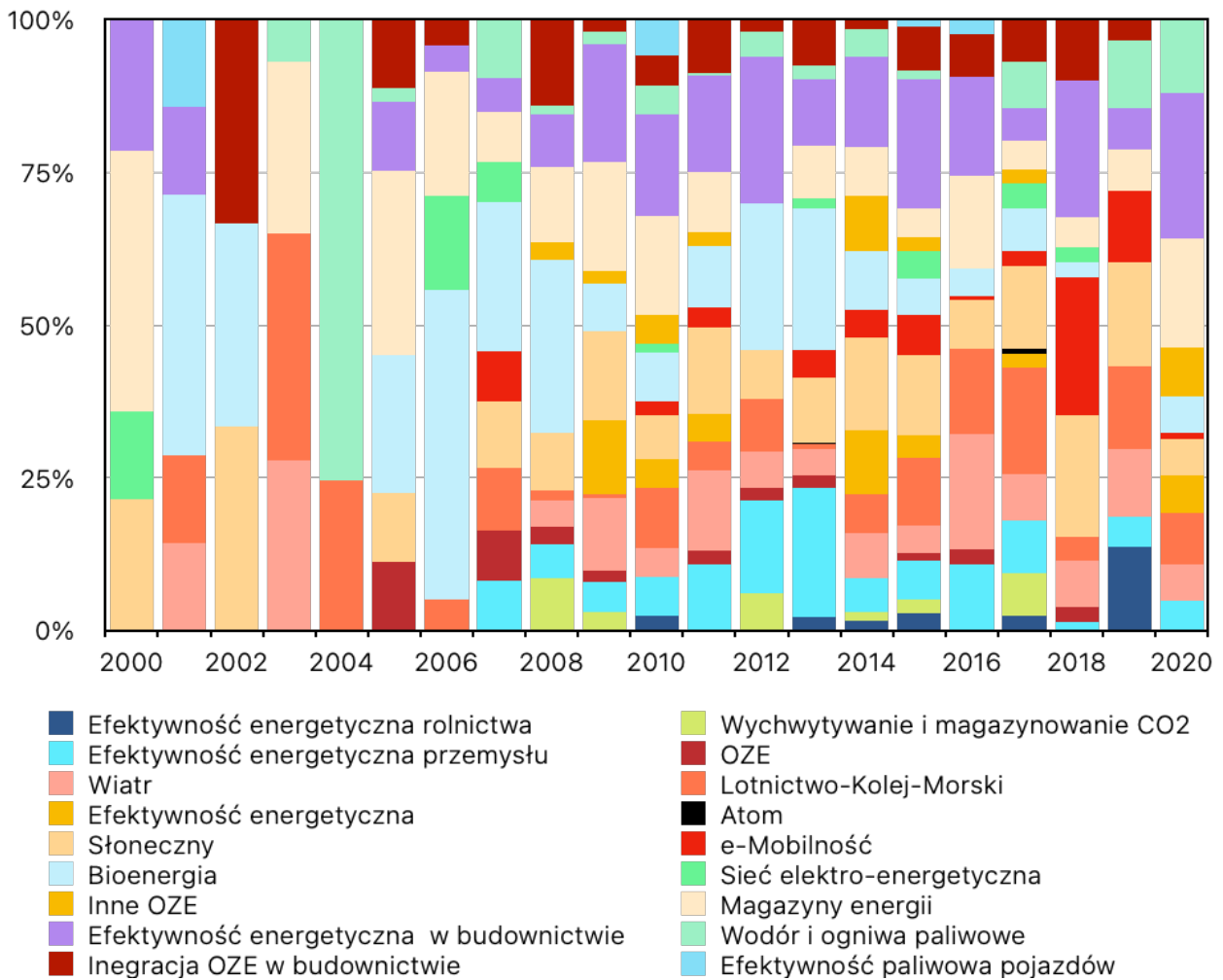
Źródło: Opracowanie własne na podstawie IEA (2022), Google Trends Data Explorer, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/google-trends-data-explorer>

Liczba patentów sektora energetycznego w Polsce, przez długi czas była zdominowana przez patenty dla rozwiązań paliw kopalnych. Dopiero od 2016 roku liczba obu sektorów zrównała się i od tego roku patenty „czystej energii” przewyższały swoją liczbą pozostałe (Rysunek 8). W dobie szybkiej i mocno przyspieszanej transformacji energetycznej, te wartości mogą wydawać się jednak niezadowalające. Polski system energetyczny z pewnym opóźnieniem reaguje na globalne zmiany. Lepszy ogólny obraz problemu zapewniają rysunki: 9, 10, 11. Można z większą dokładnością ocenić, który sektor wydaje się najbardziej perspektywiczny oraz jakie nośniki energii są preferowane. Początkowy udział w przypadku technologii wodorowych i ogniw paliwowych może wydawać się niski (12%). Należy jednak pamiętać, że rozwiązania wodorowe znajdują się również w innych kategoriach i mogą być klasyfikowane jako patenty dotyczące magazynowania energii, wychwytywania dwutlenku węgla czy integracji OZE w budownictwie.



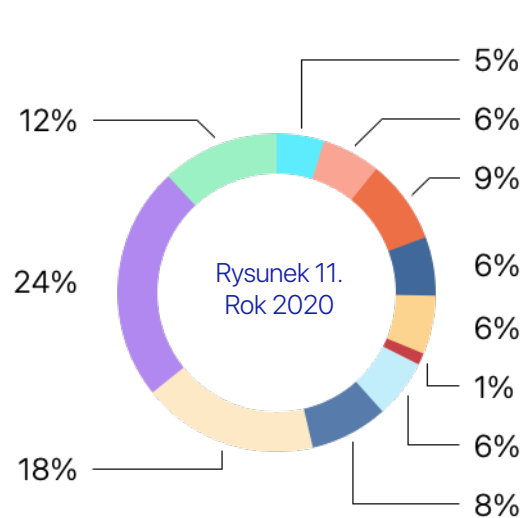
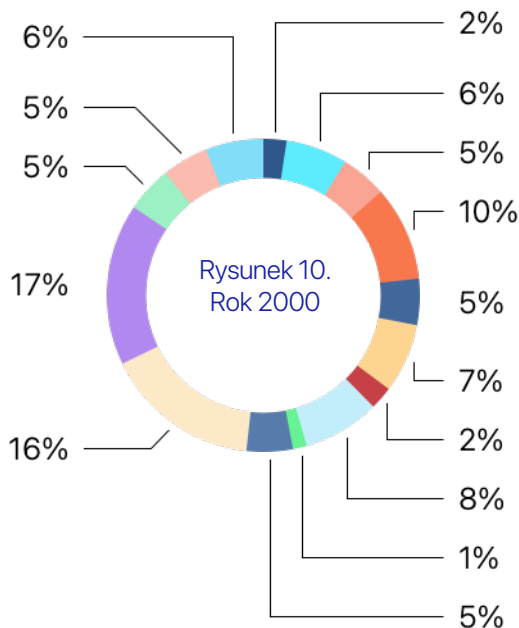
Rysunek 8. Ilość patentów w sektorze paliw kopalnych i „czystej energii” w Polsce, w okresie 2000 - 2020

Źródło: Opracowanie własne na podstawie IEA (2022), *Energy Technology Patents Data Explorer*, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-technology-patents-data-explorer>



Rysunek 9. Patenty sektora „czystej energii” z podziałem na rodzaj technologii dla Polski w okresie 2000 - 2020

Źródło: Opracowanie własne na podstawie IEA (2022), Energy Technology Patents Data Explorer, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-technology-patents-data-explorer>



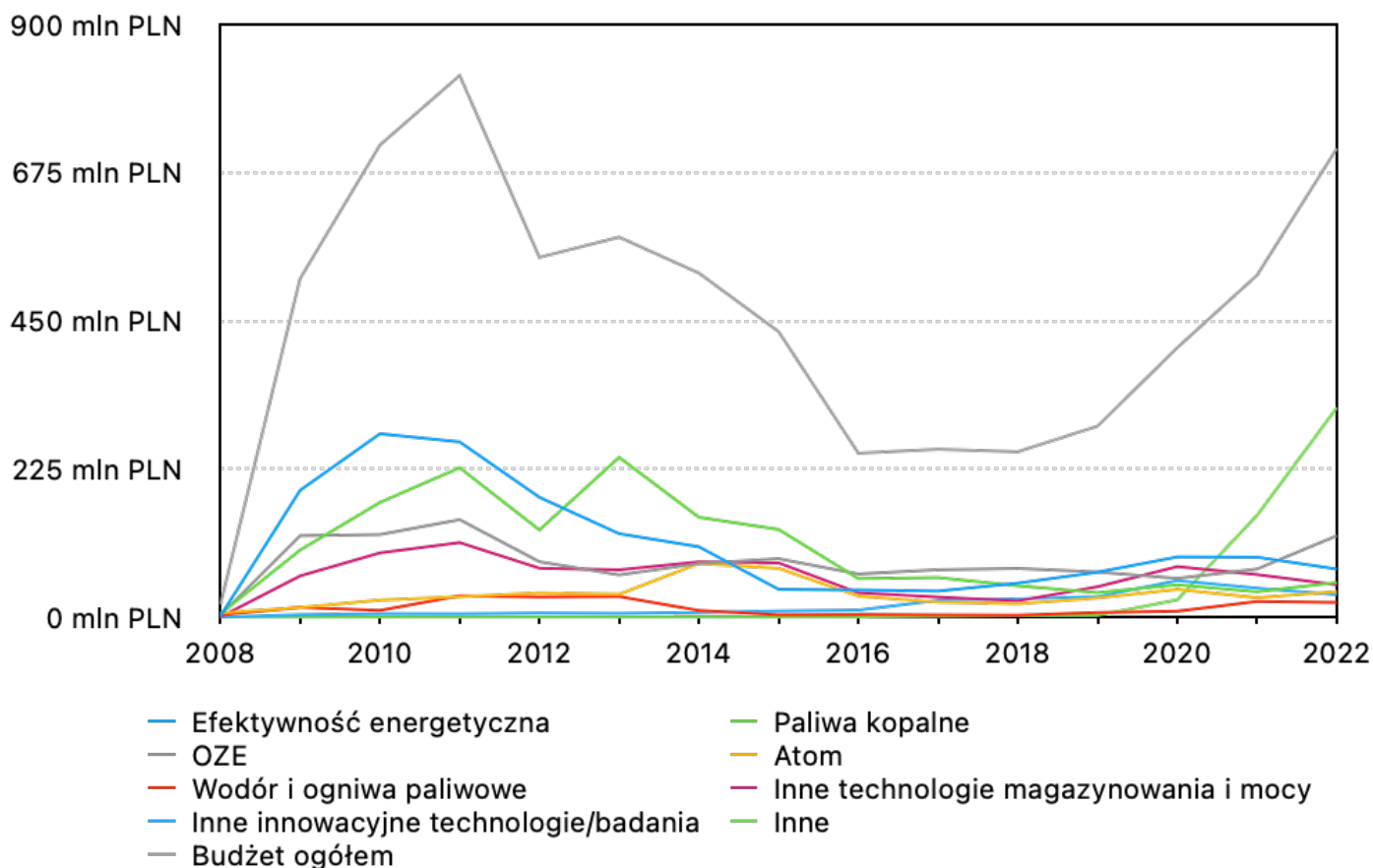
Źródło: Opracowanie własne na podstawie wykresu 3

Źródło: Opracowanie własne na podstawie wykresu 3

Analizując dłuższe przedziały czasowe (dziesięciolecia) można zaobserwować dywersyfikację rodzajów patentów, ich ilości oraz sektory, dla których są przeznaczone. Jest to korzystny sygnał, ponieważ oznacza dostrzeżenie nowych potencjałów. Ilość patentów dla technologii wodorowych i ogniów paliwowych wyraźnie z roku na rok wzrasta.

Dynamika zmian liczby patentów zależy bezpośrednio od środków finansowych jakie państwo przeznaczają na dany sektor. Należy pamiętać, że z roku na rok budżet państwa w Polsce zmienia się i może nie mieć możliwości finansowania rozwoju w wybranych sektorach. Rysunek 12 prezentuje zmiany struktury budżetu na badania i rozwój w Polsce w

ostatnim dwudziestolecium. To co przykuwa uwagę to fakt, jak niskie środki zaangażowane są w praktycznie każdy rodzaj technologii. Mimo, że całociowy budżet utrzymuje trend wzrostowy od ostatnich 6 lat, to nadal istnieje duża rozbieżność co do środków przeznaczanych na dany sektor. Technologie gospodarki wodorowej otrzymywały przykładowo większe wsparcie w 2012 roku niż w roku 2022. Trudno jest się więc dziwić, że liczba patentów wodorowych również jest niższa. Jest to fakt zaskakujący, ponieważ według założeń polityk i strategii, gospodarkę wodorową postrzega się jako obiecującą technologię w przyszłości.



Rysunek 12. Budżet R&D z podziałem na sektory w Polsce w latach 2008 - 2022

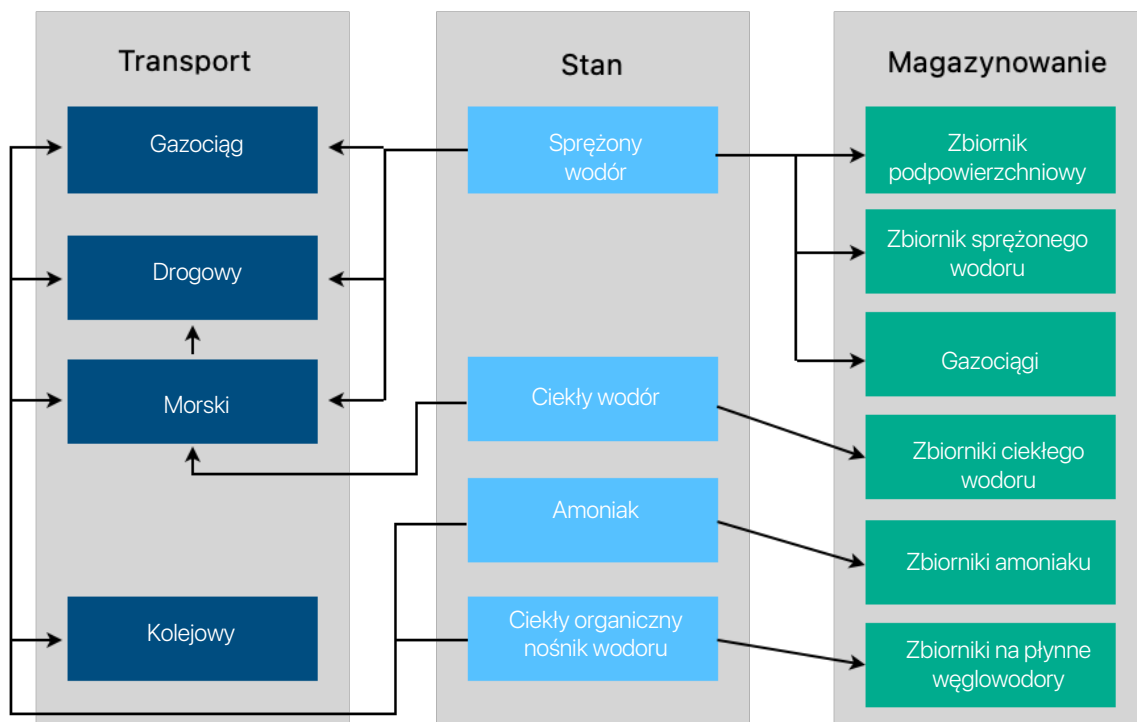
Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych IEA (2020), *Renewables 2020*, IEA, Paris
<https://www.iea.org/reports/renewables-2020>, License: CC BY 4.0

Magazyny wodoru

Przyszły rozwój wodoru w dużej mierze zależy od stworzenia opłacalnej infrastruktury dystrybucji i dostawy. Jednak wodor jako nośnik energii, staje w obliczu wyzwań związanych z niską gęstością energetyczną, kruchością i zagrożeniami dotyczącymi bezpieczeństwa w porównaniu do innych gazów i cieczy. Te właściwości stwarzają istotne bariery kosztowe i dotyczące bezpieczeństwa na każdym etapie dystrybucji, od produkcji do użytku końcowego.

Równie istotna jest forma, w jakiej wodor jest transportowany i przechowywany. Czysty wodor można transportować zarówno w stanie sprężonym, jak i skroplonym.

Alternatywnie, wodor może być przenoszony za pomocą nośników ciekłego wodoru, takich jak amoniak lub płynne nośniki organicznego wodoru (LOHC). Rysunek 13 przedstawia przegląd dostępnych opcji transportu i przechowywania wodoru. Każda z tych opcji wymaga różnych przekształceń stanu wodoru, takich jak sprężanie, skraplanie lub reakcje chemiczne. Każde przekształcenie powoduje straty energetyczne i dodatkowe koszty. Wybór preferowanej lub najbardziej opłacalnej opcji transportu i magazynowania zależy od czynników takich jak stan wodoru, odległość transportu, skala działalności i planowane zastosowanie.



Rysunek 13. Przegląd głównych opcji transportu i magazynowania wodoru

Źródło: Opracowanie własne na podstawie wywiadów eksperckich i raportu DNV Hydrogen Report 2022.

W każdym efektywnym systemie energetycznym konieczne jest zapewnienie bezpieczeństwa i stałości dostaw dla klientów (elastyczności dostaw). System energetyczny musi być zaprojektowany i obsługiwany w taki sposób, aby zapewnić wystarczające zabezpieczenie fizycznych aktywów, różnorodność dostaw energii, kontrolę rynku i elastyczności dostaw, uwzględniających odporność na różne wydarzenia geopolityczne. Jednym z głównych wyzwań w procesie transformacji energetycznej jest zwiększona zależność od energii odnawialnej, co powoduje zmienność w czasie produkcji wodoru, a to oznacza, że przechowywanie wodoru staje się coraz bardziej warunkiem koniecznym dopasowania podaży do popytu. Wodór można przechowywać na dwa sposoby - jako czysty wodór lub zintegrowany z nośnikiem, który ułatwia transport i przechowywanie.

Wodór można przechowywać jako gaz pod wysokim ciśnieniem lub jako ciekły wodór przy bardzo niskich temperaturach. W danym momencie potrzebny wodór można pobierać z magazynu, a ciśnienie lub temperatura mogą być odpowiednio dostosowane do zamierzonego zastosowania, bez konieczności dalszego znaczącego przetwarzania chemicznego.

Ciekłe nośniki wodoru to cząsteczki o znacznej zawartości wodoru - ciekłe w warunkach zbliżonych do temperatury otoczenia i ciśnienia - co ułatwia ich transport i przechowywanie, bez konieczności specjalnych zabezpieczeń. Istnieje kilka rodzajów organicznych cząsteczek o wysokiej zawartości wodoru, takich jak toluen i dibenzyltoluen -

znanych jako ciekłe organiczne nośniki wodoru (LOHC). Wadą LOHC jest koszt energetyczny związany z ich syntezą oraz wymóg kolejnej regeneracji wodoru w miejscu użycia. Jeśli energia wykorzystywana w procesie transformacji nośnika wodoru nie jest odnawialna, to wiąże się to również z emisją dwutlenku węgla. Innym nośnikiem jest amoniak (NH₃), dobrze znany jako ciekły nośnik wodoru, zawierający jedną cząstkę azotu i trzy cząstki wodoru. W niektórych zastosowaniach amoniak może być bezpośrednio spalany, a nie poddawany rozszczepieniu w celu uwolnienia wodoru.

W większości gospodarek przemysłowych popyt na energię jest zmienne. Często wzrasta w określonych godzinach dnia oraz zależy od sezonowych wahań, zwłaszcza w krajach w strefach umiarkowanego i subpolarnego klimatu (w warunkach zimowych). Zmienność krótkookresowa dotyczy zmian dobowych popytu na energię, zmienność długookresowa dotyczy zmian sezonowych popytu. Zmienność dostaw energii elektrycznej musi być dostosowana do zmienności popytu, zwłaszcza gdy wykorzystywane są odnawialne źródła do wytwarzania energii, co tworzy bardzo złożony system eksploatacji. Bezpieczeństwo dostaw zapewnia odpowiedni system przechowywania nośników energii, który wypełnia luki zarówno wtedy, gdy popyt przewyższa podaż (opróżnianie magazynów), jak i gdy podaż przewyższa popyt (wypełnianie magazynów nadmiarową ilością nośnika). Przechowywanie energii elektrycznej w bateriach (akumulatorach) jest możliwe, ale stanowi wyzwanie w przypadku dużej skali produkcji (dużej nadwyżki pro-

dukcji energii) i długich okresów. Przechowywanie nośnika energii w formie wodoru jako formy energii cząsteczkowej jest stabilnym i niezawodnym sposobem przechowywania energii, a wodór można używać bezpośrednio lub przekształcić go w energię elektryczną w miarę potrzeb.

W trakcie transformacji energetycznej wprowadzenie mieszanek wodorowych do sieci gazowych oraz budowa nowych instalacji do przechowywania wodoru będzie niezbędnym pierwszym krokiem, co stymuluje rozwój produkcji wodoru oraz całego ekosystemu technicznego związanego z wodorem. W przypadku urządzeń do ogrzewania domowego, tolerowane są pewne zmiany stężenia wodoru (do 20 mol%), jednak dla dużych firm, odbiorców przemysłowych, wykorzystujących np. turbiny gazowe lub silniki gazowe oraz dla elektrowni gazowych (gazowo-wodorowych) tolerancja zmienności stężenia wodoru jest niemożliwa w takim samym stopniu. Inne mechanizmy wyważania podaży i popytu wodoru, takie jak elastyczność popytu i elastyczność dostaw, mogą mieć znaczenie, ale nie wykorzystują one okresów nadmiernego wytwarzania nośników energii ze źródeł energii odnawialnej. Efektem ostatecznym jest konieczność ograniczenia produkcji.

Prawdopodobnie będzie konieczne zastosowanie mieszanki różnych opcji przechowywania (magazynowania) wodoru, a projekty przedsięwzięć, dotyczące klastrów przemysłowych, będą skoncentrowane na zrozu-

mieniu potrzeb i opracowaniu harmonogramów przechowywania wodoru. Projektanci modeli systemów energetycznych będą musieli przeprowadzić analizy bilansowania całego systemu, aby dokładnie określić potrzeby i harmonogramy przechowywania. Generalnie, przechowywanie wodoru może wymagać większego rozproszenia niż (aktualnie wykorzystywane systemy) przechowywania gazu ziemnego, ponieważ w istniejących gazociągach będzie mniej przestrzeni do przechowywania. Wodór ma znacznie niższą gęstość energetyczną niż gaz ziemny (3 do 4 razy mniejszą), co zwiększa złożoność rozwiązania. Jeśli wodór ma być wykorzystywany w aplikacjach transportowych, jest on około 2700 razy mniej gęsty niż benzyna, co oznacza, że musi być skompresowany, skroplony lub połączony chemicznie z nośnikiem LOHC przed przechowywaniem.

Prawdopodobnie konieczne będzie opracowanie ogólnego ramowego porównania opcji przechowywania wodoru, a oceny dla każdego regionu lub kraju powinny uwzględniać:

- Pojemność
- Możliwość dostawy
- Czas trwania rozładowania
- Czas reakcji
- Gęstość energetyczną
- Koszt jednostki przechowywania
- Bezpieczeństwo
- Lokalizacja
- Czas do wprowadzenia na rynek

Tabela 3. Możliwości magazynowania wodoru

Typ magazynu energii	Opcje magazynowania wodoru	Pojemność magazynu (TWh)	Czas realizacji	Czas trwania	Poziom gotowości technologicznej (TRL)	Ramy czasowe wdrażania technologii	Popyt na aplikowanie	Scentralizowane/zdecentralizowane rozwiązanie	Zagrożenie/toksyczność
Geologiczne	Zaadaptowana kawerna solna	-	Szybka dostępność (1 godzina)	Wielokrotne roczne cykle	Średni	Średni	Wielu użytkowników w branży energetycznej, ciepłej i przemysłowej.	Scentralizowane	Niskie
	Nowa kawerna solna	1.5			Wysoki	Długie			Niskie
	Zaadaptowany zbiornik dla węglowodorów	9	Wolna dostępność (12 - 24 godziny)	Pojedynczy sezonowy cykl	Niski	Długie	Wielki stałowe zapotrzebowanie na ciepło.	Średnie	
	Nowe kawerny podmorskie	-			Niski	Długie			
Powierzchniowe	Skompresowany	0.00004	Szybka dostępność (minuty)	Wielokrotne roczne cykle	Wysoki	Krótkie	Wielu użytkowników w branży energetycznej, ciepłej i przemysłowej.	Oba	Średnie
	Ciekły wodór	1	Szybka dostępność (1 godzina)		Niski	Długie			Wysokie
	Amoniak		Średnia dostępność (>4 godziny)		Średni	Długie			Wysokie
	LOHC		Niski		Długie	Niskie			
	Wodorki metali (MH)	8μ	Średni		Średni	Niskie			
Sieć	Gazociągi (Line pack)	1.2	Szybka dostępność (Natychmiast)	Dzienny cykl	Wysoki	-	Niskie		
Import	Gazociąg wodorowy	-	Szybka dostępność (Natychmiast)	-	Wysoki	Średnie	Ograniczony ze względu na czas realizacji, należy celować w duże przewidywalne wahania popytu np. w branży ciepłej	Scentralizowane	Średnie
	Amoniak	-	-	-	Średni	Długie			Wysokie
	LOHC	-	-	-	Niski	Długie			Niskie
	Metanol	-	-	-	Niski	Długie			Wysokie
	Ciekły wodór	-	Wolna dostępność (Dni w zależności od długości dostawy)	-	Niski	Długie			Wysokie
Zróżnicowanie dostaw	Elastyczna produkcja (Niebieski Wodór)	-	Średnia dostępność (>4 godziny)	-	Średni	Średni	Przemysł i branża ciepła	Oba	-
	Elastyczna produkcja (Elektroliza podłączona do sieci energetycznej)	-	Szybka dostępność (1 godzina)	-	Średni	Średni	Wielu użytkowników		-
Zróżnicowanie popytu	Kontrakty przerywalne	-	-	-	Wysoki	Krótkie	-	-	-
	Inteligentne Systemy Grzewcze	-	-	-	Niski	Długie	-	-	-

Źródło: Opracowanie własne na podstawie wywiadów eksperckich oraz raportu DNV Hydrogen Report 2022.

Opcje przechowywania wodoru na potrzeby systemów energetycznych i transportowych będzie obejmować różne formy w celu długotrwałego przechowywanie dla sieci gazowych (jako źródła transportu). Mogą to być:

- jaskinie solne, w których można zarządzać wielokrotnym napełnianiem/rozładowaniem,
- porowate skały, umożliwiające sezonowe przechowywanie (choć pory nie są dobre dla zmiennej i szybkiej dostępności i możliwości wstrzykiwania gazu).

Podsumowanie opcji przedstawiono w Tabeli 3.

Analiza historycznych mechanizmów i rozwiązań dotyczących przechowywania gazu ziemnego, tylko w części pomoże rozwiązać problemy związane z przechowywaniem wodoru. Produkcję gazu ziemnego można zwiększać i zmniejszać w zależności od potrzeb, ale niskoemisyjny wodór, wytwarzany przez elektrolizę wody lub reformowanie węglowodorów i CCS (CO₂ Capture and Storage) zużywa duże ilości energii. Procesy o nieregularnej (energia odnawialna) lub stałej produkcji (reformowanie metanu lub elektrolizy wykorzystując energię nuklearną), stwarzają nowe wyzwania oraz konieczność znalezienia innego rozwiązania magazynowania.



Rysunek 14. Widzja zbiornika wodorowego.

Sieć przesyłowa

System transportu wodoru umożliwiający przenoszenie go na duże dystanse, przy czym zazwyczaj przekazywany jest w postaci sprężonego gazu lub skroplonej cieczy. Transport wodoru realizowany jest różnymi kanałami dystrybucji takimi jak transport morski, drogowy lub kolejowy oraz poprzez sieć gazociągową.

„Coraz bardziej uwypukla się problem sezonowości produkcji energii odnawialnej i jej nadmiaru w czasie słonecznych i wietrznych dni oraz braku elastyczności polskiego systemu elektroenergetycznego. Niebawem pojawi się na północy kraju (dawniej mającej problem z energią elektryczną) problem nadmiaru produkcji energii ze źródeł odnawialnych oraz z energetyki jądrowej. Pojawi się olbrzymi problem z przesyłem tej energii sieciami do Polski centralnej i południowej. Istnieje konieczność modernizacji polskich sieci elektroenergetycznych.”

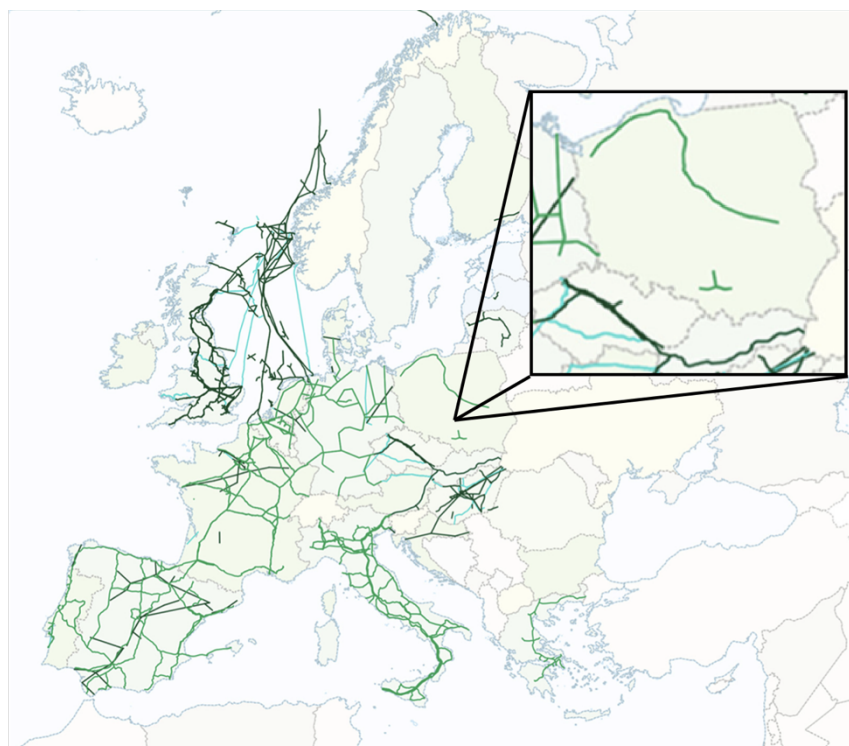
Przesył wodoru za pomocą ciężarówek stanowi rozwiniętą opcję, gdzie wodór może być przemieszczany w formie gazowej, ciekłej lub poprzez wykorzystanie nośników, takich jak amoniak lub substancje organiczne o dużej pojemności magazynowania (LOHC). Niemniej jednak, dla długich dystansów ta opcja nie zawsze jest optymalnym rozwiązaniem pod względem kosztów. W przypadku transportu sprężonego

gazu, ciężarówki zazwyczaj wykorzystują kontenery o długości 6 lub 12 metrów wykonane z kompozytów szklano-włóknowych lub węglowo-włóknowych. Przy tej metodzie jeden pojazd może przewozić około 1100 kg wodoru sprężonego do ciśnienia 500 barów.

Alternatywę stanowi transport wodoru ciekłego. Ciężarówka ma możliwość przewiezienia około 4000 kg wodoru na 4000 km; przekroczenie tego dystansu może prowadzić do termicznego przegrzania wodoru i związanej z tym zmiany ciśnienia, spowodowanej efektem Joule'a Thompsona.

Przekształcenie wodoru w amoniak przed przewozem umożliwia przetransportowanie około 5000 kg wodoru.

Transport wodoru za pośrednictwem rurociągów stanowi ekonomiczną i niezawodną metodę na dystanse do 2000 km, podlegającą wpływowi różnych czynników między innymi ilości przesyłanego wodoru. W Stanach Zjednoczonych istnieje już sieć o łącznej długości przekraczającej 2500 km rurociągów wodorowych. W Europie najdłuższe trasy rurociągów wodorowych znajdują się w Belgii i Niemczech, osiągając odpowiednio długość 600 km i 400 km. Ogólnie na całym świecie istnieje około 5000 km rurociągów wodorowych, w porównaniu do 3 milionów kilometrów gazociągów. Poniższa mapa prezentuje stan gazociągów o różnym stopniu przystosowania i możliwości adaptacyjnych dla wodoru w Unii Europejskiej.



Rurociągi gotowe do ponownego użytku z uwzględnieniem aktualnego stanu wiedzy/standardów (ocenione przez twórców raportu Re-Stream) —

Rurociągi dla których potrzebne są kolejne testy i/lub aktualizacja standardów by były użyteczne (ocenione przez twórców raportu Re-Stream) —

Przystosowane rurociągi zdolne do użytkowania z wodorem (ocenione przez krajowych dostawców) —

Rysunek 15. Mapa wybranych sieci gazociągowych w Europie.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie raportu CarbonLimits

Bezpieczeństwo i zagrożenia

Wodór ma długą historię produkcji i wykorzystania, trwającą ponad wiek, co świadczy o jego znajomości w społeczeństwie. Jednakże, jego użytkowanie głównie miało miejsce w kontrolowanych środowiskach przemysłowych, nadzorowanych przez wykwalifikowane osoby, które rozumieją związane z tym ryzyko. Prognozowany znaczny wzrost rynku wodoru jako nośnika energii spowoduje pojawienie się nowych obiektów wodorowych, znacznie różniących się od tych z przeszłości. Warto zaznaczyć, że niektóre z tych obiektów będą usytuowane w sąsiedztwie obszarów mieszkaniowych społeczeństwa i (często) będą zarządzane przez niedoświadczonych operatorów, nie posiadających odpowiedniej wiedzy z zakresu bezpieczeństwa obsługi urządzeń zasilanych wodorem.

W rezultacie, nasza dotychczasowa wiedza na temat bezpieczeństwa urządzeń wodorowych stanowi niewłaściwy punkt odniesienia do przewidywania możliwej analizy ryzyka.

Akceptacja wykorzystania wodoru będzie silnie zależna od postrzegania ryzyka. Prawdopodobnie wypadki związane z wodorem przyciągną większą uwagę mediów niż podobne incydenty związane z tradycyjnymi paliwami, co może wywołać opór społeczny i skutkować bardziej rygorystycznym środowiskiem regulacyjnym, przynajmniej na początku. Poziom wrażliwości i postrzegania ryzyka będzie różnić się w zależności od sektorów, ale będzie najwyższy

tam, gdzie ludzie znajdą się w bezpośrednim sąsiedztwie użytkowanych urządzeń wodorowych, takich jak lotniska (silniki napędzane wodorem) i urządzenia ciepłownicze w ogrzewaniu domów. Poziom ryzyka wydaje się nieco niższy w zakresie zastosowań przemysłowych, na przykład w magazynowaniu wodoru, z uwagi na profesjonalizm i kwalifikacje pracowników.

„Konwencjonalne technologie magazynowania wodoru, takie jak kompresja i skroplenie, wymagają rygorystycznych środków bezpieczeństwa, aby zapobiec wypadkom i zagrożeniom.⁵”

Bezpieczeństwo stanowi istotne ryzyko biznesowe dla inwestorów i deweloperów. W przeszłości zdarzały się przypadki, gdy incydenty na stacjach tankowania wodoru prowadziły do długotrwałych przerw w wykorzystywaniu wodoru w pojazdach. Przemysł posiada sprawdzone metody zarządzania bezpieczeństwem palnych gazów, które są stosowane od dziesięcioleci i przynoszą cenne, zdobyte z trudem lekcje. Po pierwsze, bezpieczeństwo musi opierać się na zrozumieniu, w jaki sposób konkretne właściwości wodoru i jego pochodnych wpływają na potencjalne zagrożenia. Po drugie, najbardziej skuteczne (zarówno pod względem bezpieczeństwa, jak i kosztów) jest wprowadzanie odpowiednich środków redukcji ryzyka we wczesnej fazie projektowania.

⁵ Ekspert podczas wywiadów

W wielu przypadkach, gdy te środki są uwzględniane we wczesnym etapie, można je wdrożyć praktycznie bez dodatkowych kosztów lub nawet całkowicie bez nich, co prowadzi do projektów, które są w swej naturze bardziej bezpieczne. Na koniec, zamiar projektowy musi być zachowany przez cały cykl życia technologii: środki bezpieczeństwa nie powinny ulegać pogorszeniu. Aby osiągnąć to wszystko, konieczne jest zrozumienie kluczowych właściwości wodoru (i jego pochodnych), które wpływają na zagrożenia.

Tabela 4. Porównanie właściwości wodoru z innymi gazami

Właściwości wodoru

Gazowy (sprężony) wodór		
Gęstość	Szybkość uwalniania	Jako 1/8 gęstości metanu, w tożsamyh warunkach, objętościowy przepływ wodoru jest 2,8 raza większy niż metanu i odwrotnie. Przez to izolowane układy ciśnieniowe wodoru będą tracić ciśnienie szybciej niż w przypadku metanu przy czym w stratach metanu mogą powstawać większe łatwopalne chmury gazu.
.	Dyspersja i gromadzenie się gazu	Wodór ma lepszą „pływalność” niż metan przez co szybciej i prościej przemieszcza się w górę. Może być to wykorzystane do minimalizowania zagrożenia eksplozją.
Zapalność	Energia zapłonu	Minimalna energia potrzebna dla zapłonu wodoru jest 10 raz mniejsza niż w przypadku metanu czy gazu ziemnego. Wielokrotnie jednak siła zapłonu powoduje albo zapalenie obu gazów albo żadnego.
	Łatwopalność	Stężenia wodoru od 4% do 75% są istotnie łatwopalne. Znacznie mniejszym zakresem charakteryzuje się gaz ziemny. W jego przypadku jest to stężenie od 5 do 15%.
Spalanie	Ogień	Sprężony wodór płonie jak ogień z silników odrzutowych. Długość płomienia zależy zaś od natężenia przepływu energii. Sytuacja w tym przypadku jest podobna zarówno dla wodoru jak i metanu, dlatego też ryzyko pożaru jest równe.
	Eksplozja	Wybuchowość wodoru, w stężeniach powietrza >20%, jest znacznie większa niż w przypadku metanu. Ma to związek z dużo większą prędkością płomienia. Sama mieszanina wodoru z powietrzem może przejść w stan detonacji, co nie miaoby miejsca w przypadku metanu.
Ciekły wodór (dodatkowe zagrożenia)		
Temperatura	Skraplanie	Można powiedzieć, że ciekły wodór jest cieczą kriogeniczną jak to jest w przypadku skroplonego gazu ziemnego. Jednak ciekły wodór ze względu na niższą temperaturę może skraplać się i scalać z powietrzem atmosferycznym. W przypadku mieszanki ciekłego wodoru z powietrzem mogą występować eksplozje czego nie można powiedzieć w kwestii LNG.
Gęstość	Wyporność i dyspersja	Odparowany wodór chłodzi się i miesza się z powietrzem, przez co zwiększa się jego gęstość. W związku z tym chmura wodoru (ciekłego) w powietrzu będzie miała inną wyporność niż w przypadku stanu gazowego (wodoru). Dzieje się tak również w przypadku LNG.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie wywiadów eksperckich i raportu DNV Hydrogen Report 2022.

Ponieważ wodór różni się znacząco od swoich pochodnych, należy je rozważać oddzielnie. Na zagrożenie wybuchu wodoru wpływają różne czynniki, zagrożenie jest większe, gdy paliwo (wodór, nośnik wodoru) jest bardziej "reaktywne". W tym kontekście reaktywność odnosi się do prędkości, z jaką płomień się rozprzestrzenia w łatwopalnej chmurze.

W przypadku wodoru, jego płomienie mogą spalać się około dziesięć razy szybciej niż gaz ziemny i znacznie szybciej niż większość powszechnie używanych węglowodorów, co wiąże się z wyższą reaktywnością. Co więcej, gdy płomień porusza się z bardzo dużą prędkością, osiągając prędkości ponaddźwiękowe, wybuch może przejść w detonację. Detonacja to samonapędzający się proces, którą charakteryzuje prowadząca fala uderzeniowa o ciśnieniu wynoszącym około 20 barów, kompresując gaz do punktu samozapłonu. Następująca po niej reakcja spalania dostarcza energii potrzebnej do podtrzymania fali uderzeniowej. Należy zauważyć, że obecne metody symulacji wybuchu stosowane przez przemysł nie są w stanie modelować przejścia do detonacji, a jedynie wskazywać, kiedy taka sytuacja mogłaby wystąpić, choć istnieje nadal znaczna niepewność w tym obszarze.

Może się wydawać, że są istotne bariery dla akceptacji i implementacji instalacji wodorowych, ale te właściwości zależą od stężenia paliwa w powietrzu. Jeśli stężenie wodoru w powietrzu jest utrzymywane poniżej około 15%,

ocenia się, że sytuacja jest porównywalna do zagrożenia metanowego przy podobnych stężeniach. Wynika z tego, że kluczowym elementem zarządzania bezpieczeństwem urządzeń wodorowych jest kontrola rozpraszania gazu i jego kumulacji, aby zapobiec przekroczeniu stężenia wodoru w powietrzu powyżej 15%. Stanowi to szczególne wyzwanie w przypadku ograniczonej przestrzeni rozpraszania, na przykład na pokładzie statków morskich. Wykrywanie gazu i szybkie odizolowanie magazynów wodoru będą kluczowymi środkami. Istotne jest również rozważenie wskaźników wentylacji oraz układów wentylacyjnych. Ważne jest, że obecne metody symulacji mogą z rozsądnym prawdopodobieństwem modelować rozpraszanie gazu i stopień jego skumulowania.

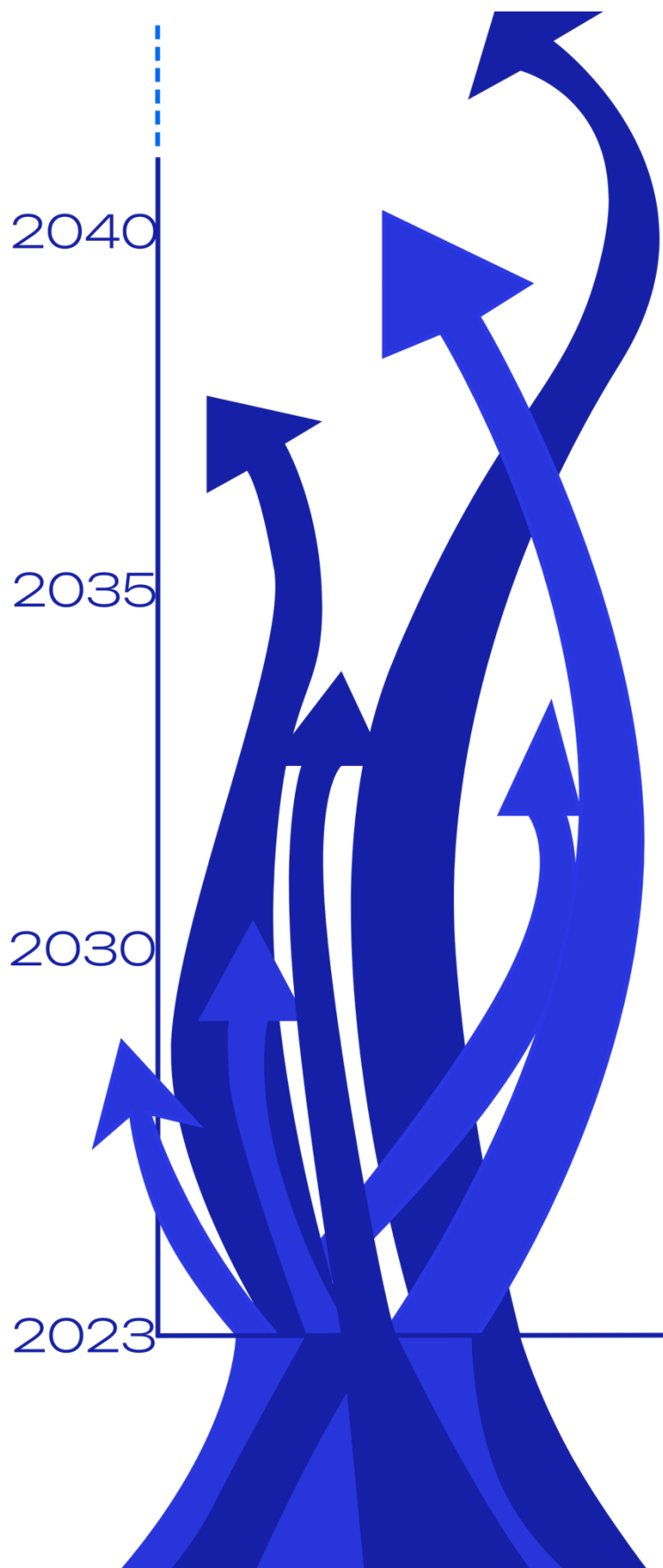
Podsumowując, chociaż wysoka reaktywność wodoru w wybuchu jest z pewnością istotną przeszkodą jego implementacji w systemach transportowych i energetycznych, poprzez świadomość tego problemu i projektowanie w celu unikania wysokich stężeń wodoru w atmosferze, można oczekiwać, że inżynierowie będą w stanie stworzyć instalacje, które będą tak samo bezpieczne lub nawet bezpieczniejsze niż szeroko akceptowane i obecnie stosowane instalacje gazu ziemnego. Kosztowe implikacje takich rozwiązań mogą nie być znaczące, jeśli będą oparte na solidnym zrozumieniu wymogów technicznych, we wczesnym etapie projektowania.

Wizja Hydrogen 2040+

Ocena jakości życia we współczesnym świecie jest między innymi definiowana poprzez dostęp do przystępnej i niezawodnej energii. W obliczu nieuchronnych zmian klimatycznych i postępującego procesu globalnego ocieplenia, charakter i jakość źródeł energii powinny korespondować z zasadami zrównoważonego rozwoju. Niemniej jednak dążenie do płynnego wkomponowania źródeł energii odnawialnej w system energetyczny, tak aby zastąpiły one istotną część mixu energetycznego, staje się wyzwaniem o istotnej skali. Realizacja tego zadania wymaga określonych warunków geograficznych, a ze względu na zmienną efektywność tych źródeł w odniesieniu do okresów determinowanych przez zmienne sezonowe, zachowanie równowagi energetycznej wymaga akumulacji nadwyżek energetycznych w okresach cechujących się lepszym bilansem energetycznym.

Dla porównania paliwa kopalne wykazują dwie fundamentalne cechy jako nośniki energii. Same w sobie służą jako magazyny energetyczne oraz są łatwo transportowalne drogą lądową, morską czy sieciami gazociągowymi. Oznacza to, że nadają się do przechowywania w surowej formie, aż do czasu, gdy ich wykorzystanie staje się niezbędne. W wyraźnym kontraście stawia się większość technologii pozyskiwania odnawialnej energii (z wyjątkiem energii z biomasy czy elektrowni wodnych). Wymagają one wcześniejszego przekształcenia w na przykład energię elektryczną i

dopiero w tej postaci mogą być magazynowane. Wodór może potencjalnie rozwiązać ten problem.



W tym celu powstał powyższy raport, który nie tylko pokazuje dostępne opcje magazynowania - ich mocne strony czy ograniczenia – lecz także prezentuje perspektywiczny potencjał jaki wodór może mieć w Śląsko-Małopolskiej Dolinie Wodorowej. Poniższa wizja stanowi zwieńczenie badań nad magazynami wodoru i uzupełnia raport o rekomendacje ukierunkowane dla badanego terytorium. Wizja składa się z trzech części, na początku zostanie dokonana analiza charakterystyki regionu, uwzględniając zarówno potencjał technologii wodorowych, dynamikę wzrostu konsumpcji, jak również gotowość istniejącej już infrastruktury do implementacji rozwiązań wodorowych. Kolejnym etapem będzie omówienie dwóch kluczowych technologii wodorowych dla małej, średniej oraz dużej skali magazynowania. Pod koniec wizji nastąpi syntetyczne podsumowanie, ukazujące przewidywany kształt miksu energetycznego w 2040 roku. Przedstawiona perspektywa opiera się na zebranych danych, analizie literatury przedmiotowej, przeprowadzonych badaniach ilościowych oraz pogłębionych wywiadach eksperckich.

Śląsko-Małopolska przystań wodorowa

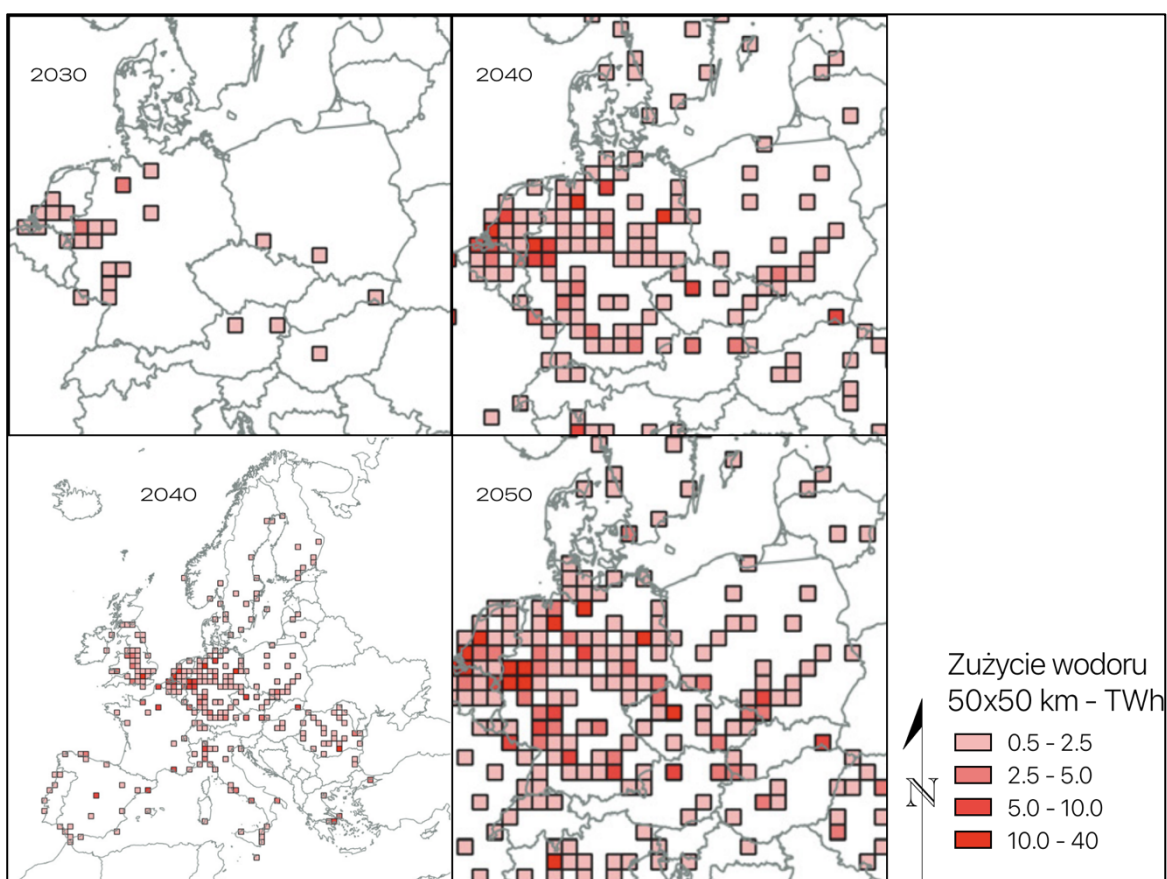
Realizacja i dalszy rozwój koncepcji Dolin Wodorowych stanowi jedynie inauguracyjny etap rewolucji wodorowej. Stanowczo zaleca się zacieśnienie współpracy pomiędzy instytucjami akademickimi a sektorem prywatnym, z włączeniem wyższej rangi obecności cenionych ośrodków edukacyjnych, takich jak Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie czy Politechnika Śląska, jako kluczowych instytucji wpływających na inkubację innowacyjnych rozwiązań. Kreowana zostaje dynamiczna infrastruktura technologiczna, operująca w ramach środowiska akademickiego, stanowiąca inkubator dla studentów i startupów zajmujących się pionierskimi konceptami w dziedzinie technologii wodorowych. W kontekście aktywnej polityki państwa, istotnym aspektem jest wspieranie optymalizacji infrastruktury, zarówno nowej, jak i dającej się dostosować do rosnącego zapotrzebowania na technologię wodorową.

„Mamy potężną lukę wiedzy i know-how. Musimy zastosować strategię imitacyjną, najlepiej dostosować się do gospodarki niemieckiej, gdyż jest to nasz główny partner handlowy. Bardzo dobre wzorce są również w Danii, czy Wielkiej Brytanii.”⁶

Rysunek numer 16 przedstawia prognozowany rozwój wykorzystywania technologii wodorowych w Polsce oraz Unii Europejskiej. Możemy zauważyć znaczący skok w ciągu najbliższych 20 lat. Bardzo duże zagęszczenie znajduje się również w obrębie omawianej doliny wodorowej. Popiera to tezę mówiącą o Śląsko-Małopolskiej Dolinie Wodorowej jako o regionie opartym na wodorze. Zachęcanie do inwestycji w tym sektorze, zarówno ze strony sektora publicznego, jak i prywatnego, niewątpliwie powinno być poparte po-

⁶ Ekspert podczas wywiadów

dobnymi działaniami jak te, które miały miejsce w początkowym etapie rozwoju technologii fotowoltaicznych w Polsce. Przy tym należy mieć na uwadze, że ten proces nie może utrudniać organicznego postępu, lecz raczej sprzyjać wyważonemu rozwojowi sektora. W miarę wzrostu zapotrzebowania na energię, konieczność bilansowania jej w czasie za pomocą magazynów energetycznych staje się jednym z kluczowych wyzwań. Szczególnie w kontekście narastającego udziału źródeł odnawialnych, takich jak fotowoltaika, konieczne staje się skuteczne zarządzanie nadwyżkami energii i ich deficytami, np. podczas mniej efektywnych okresów zimowych. W tym obszarze magazyny wodorowe wykazują swój potencjał. W kontekście rosnącego zużycia wodoru, kluczowym zagadnieniem jest implementacja obiektów magazynowych, pełniących rolę bufora między podażą a popytem w różnych okresach czasowych, od krótkoterminowych do dłuższych, miesięcznych interwałów. Podczas gdy mniejsze magazyny wodorowe mogą być wznoszone w stosunkowo niezależny sposób od lokalizacji, przewiduje się, że magazyny o większej pojemności będą w znacznym stopniu uzależnione od dostępu do formacji geologicznych z potencjałem adaptacyjnym.

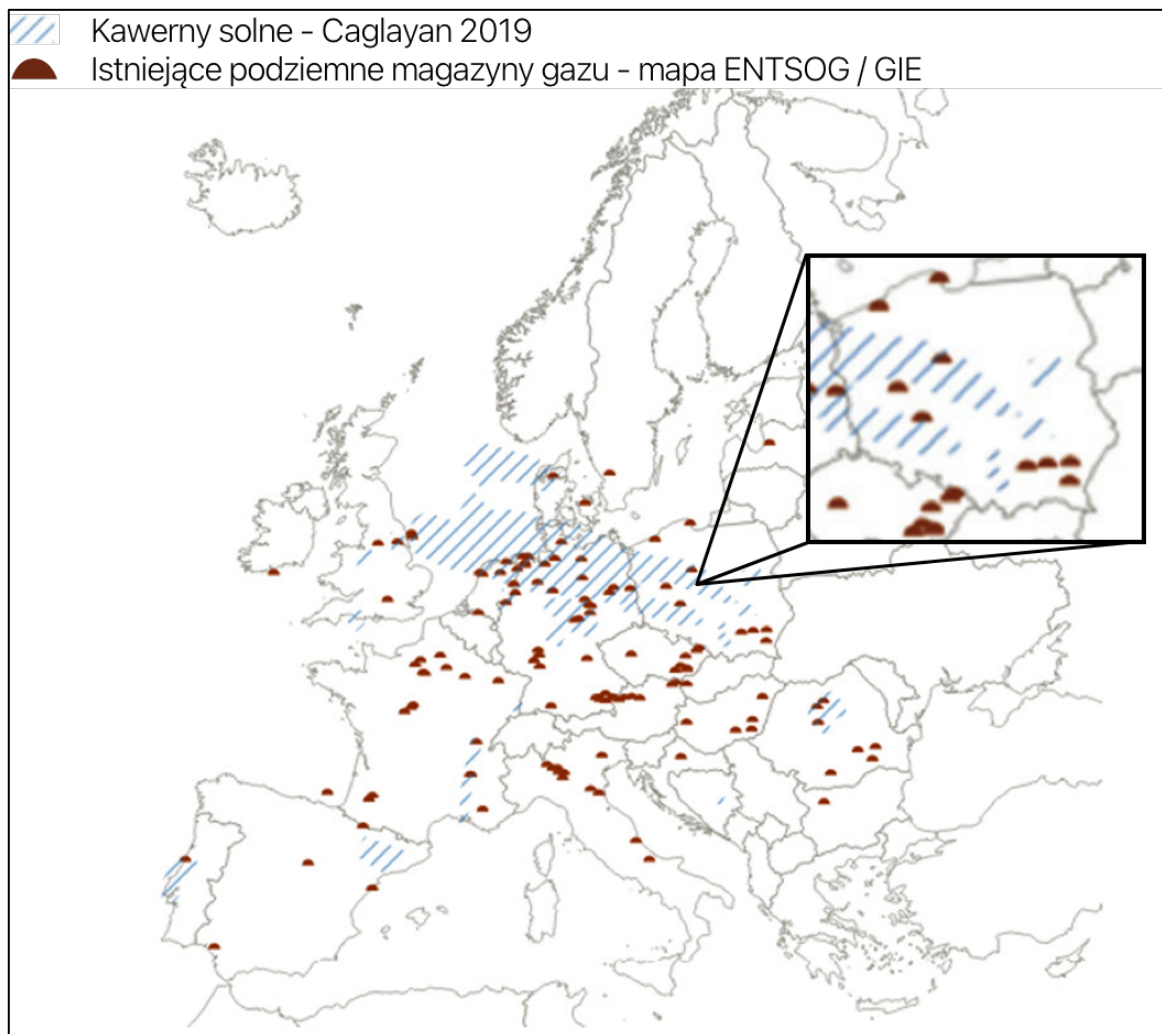


Rysunek 16. Mapy gęstości zużycia wodoru dla lat 2030, 2040 i 2050, gdzie gęstość = wielkość zużycia w komórce siatki o wymiarach 50x50 km.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie analiz raportu Carbon Limits

Sól ziemi czarnej

Podziemne formacje solne oraz zamknięte chodniki kopalniane, które pozostały wskutek transformacji energetycznej, stanowią atrakcyjne przestrzenie pod adaptację na magazyny wodoru. Sól, wydobywana z tych formacji, pozwala na stworzenie stabilnych komór w skalnych warstwach, które mogą skutecznie gromadzić wodór. Wyeksploatowane pola i warstwy wodonośne są kolejnymi potencjalnymi rozwiązaniami w skali dużych magazynów wodoru. Na terytorium doliny wodorowej istnieją również podziemne magazyny gazu, które można zaadaptować do przechowywania wodoru. Przystosowywanie kawern solnych, kopalni węgla czy istniejących już zbiorników gazowych składa się z kilku etapów takich jak wstępna analiza adaptacyjna, testy inicjacyjne wtłaczania wodoru oraz rozpoczęcie eksploatacji i składowania. Oznacza to proces trwający od 3 do 7 lat w przypadku konwersji istniejących już obiektów magazynujących gaz oraz od 4 do 10 lat dla nowych formacji. Poniższa mapa przedstawia lokalizację pokładów soli oraz istniejącej już infrastruktury gazowej. Sugeruje ona wysoki potencjał dla adaptacji tej technologii w regionie.



Rysunek 17. Lokalizacja potencjalnych geologicznych magazynów wodoru w Polsce i Unii Europejskiej

Źródło: Opracowanie własne na podstawie map Caglayan 2019 oraz ENTSOG / GIE

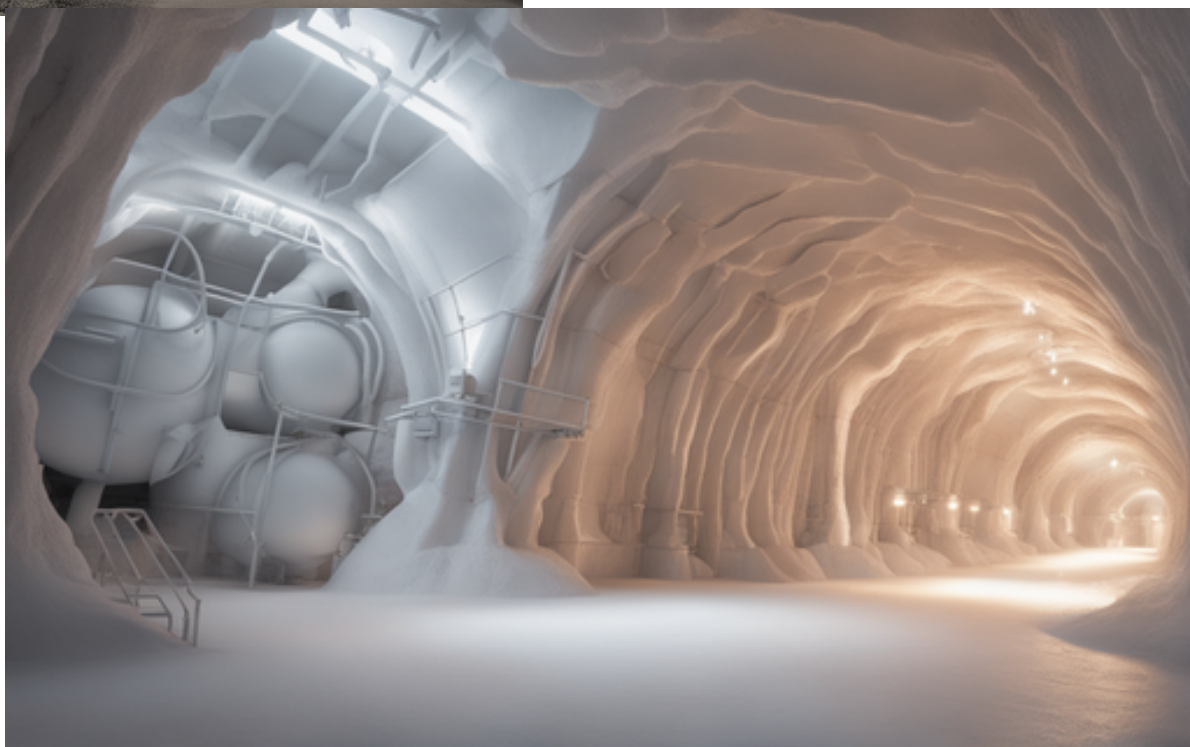
Równocześnie wysoka ilość kopalń węgla kamiennego na Górnym Śląsku wymaga od nas przemyślenia, jak wykorzystać pozostałą po nich przestrzeń w czasach schyłku epoki górnictwa. Użycie ich jako magazynów energii nie tylko rozwiąże problem pozostałych nieużytków, ale również może przyczynić się do rozwiązania problemu sprawiedliwej transformacji społecznej osób zatrudnionych wcześniej w przemyśle górniczym.

"Based on international experiences in the development of underground hydrogen storage, one major factor that impacts the development and implementation of this technology is the lack of infrastructure development and comprehensive regulatory frameworks. Moreover, there are technological challenges regarding hydrogen compression, injection, and extraction from the reservoirs, which can hamper the long-term adoption and deployment of such technology nevertheless underground hydrogen storage seems to be the most efficient and cost-effective option for Poland."⁷

Zastosowanie kawern solnych i zaadaptowanych szybów pokopalnianych stanowi koncepcję znaczącą dla przyszłego krajobrazu energetycznego Śląsko-Małopolskiej Doliny Wodorowej do roku 2040. Zbiorniki geologiczne, takie jak kawerny solne, potencjalnie pozwolą na magazynowanie wodoru w dużych ilościach. Szczególnie istotne jest to, że zdolność jaskiń do przechowywania wodoru pod wysokim ciśnieniem i w niskich temperaturach pozwala na osiągnięcie znaczącej gęstości energii. Taka charakterystyka przekłada się na możliwość pomieszczenia znacznego wolumenu wodoru na stosunkowo niewielkiej przestrzeni. Rozważmy przykładowe wartości. Jedna kawerna solna może potencjalnie pomieścić kilka milionów metrów sześciennych wodoru. Przy obecnie dostępnych technologiach, wodór może być przechowywany pod ciśnieniem rzędu 100 atmosfer i temperaturze bliskiej -40 stopni Celsjusza. Takie parametry pozwoliłyby na zagęszczenie wodoru do ponad 20% jego objętości gazu w normalnych warunkach atmosferycznych. To z kolei sugeruje, że pojedyncza kawerna solna mogłaby pomieścić potencjalnie około 400 tysięcy metrów sześciennych skroplonego wodoru. Jednocześnie, adaptacja opuszczonych szybów pokopalnianych, które pozostały po zmianach w sektorze węgla, stanowi intrygujący obszar badań. Rozważmy przypadek przekształcenia jednego z opuszczonych szybów w pojemnik na wodór. Szyb o średnicy 8 metrów i głębokości 500 metrów może pomieścić około 100 tysięcy metrów sześciennych wodoru pod ciśnieniem atmosferycznym. Jeśli wodór miałby zostać skroplony do stanu ciekłego (LH2) pod ciśnieniem atmosferycznym i temperaturze -253 stopni Celsjusza, jego gęstość wzrosłaby znacząco. Jedna kawerna mogłaby zatem przechowywać tysiące ton skroplonego wodoru.

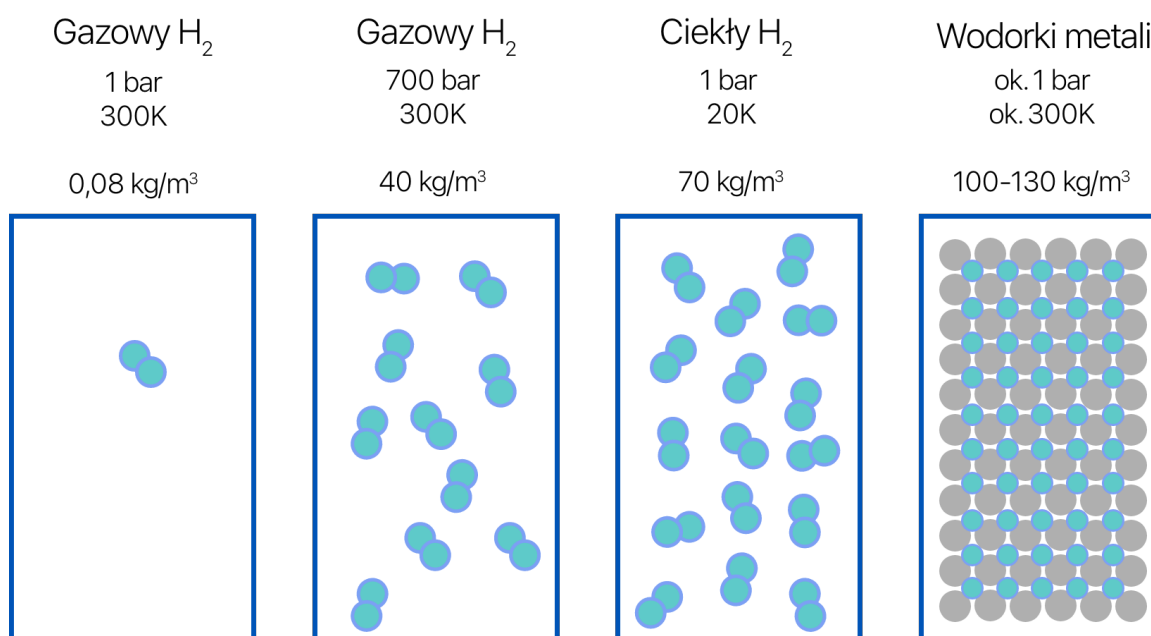
⁷ Ekspert podczas wywiadów

Takie podejście daje nam możliwość wyraźnego pomiaru potencjału przechowywania wodoru w kawernach solnych i adaptowanych szybach pokopalnianych. Wspierane przez modele matematyczne, te ilości stanowią mierzalne wskaźniki przydatne przy projektowaniu przyszłych struktur magazynujących energię wodorową. Warto podkreślić, że wizja ta skoncentrowana na technicznych aspektach i dokładnych parametrach podkreśla perspektywę innowacyjnej i zrównoważonej przyszłości energetycznej, której fundamenty będzie można już wkrótce obserwować w Dolinie Wodorowej.



Wodorki metali

Magazynowanie wodoru przy wykorzystaniu wodorków metali (MH) to zaawansowany technologicznie system składowania oraz produkcji wodoru. Pozwala on na zaspokajanie zmiennych potrzeb energetycznych. Szczególnie użyteczny jest dla obiektów małej lub średniej skali, w których miałyby być wykorzystywane. Główne różnice w sposobie w tym systemie, w porównaniu do innych technologii, przedstawione zostały na poniższym rysunku. W dużym uproszczeniu jego największym atutem jest możliwość zmagazynowania dużej ilości wodoru na małej powierzchni oraz przy utrzymaniu niskiego ciśnienia w samym zbiorniku. Tego typu magazyny mogą być mniejszych rozmiarów niż w przypadku metod konwencjonalnych a jednocześnie wielkość zmagazynowanego wodoru osiąga prawie trzykrotnie lepsze rezultaty w stosunku do innych zbiorników. Minusem tego rozwiązania jest duża masa zbiornika, powoduje to, że zbiorniki muszą być stacjonarne.



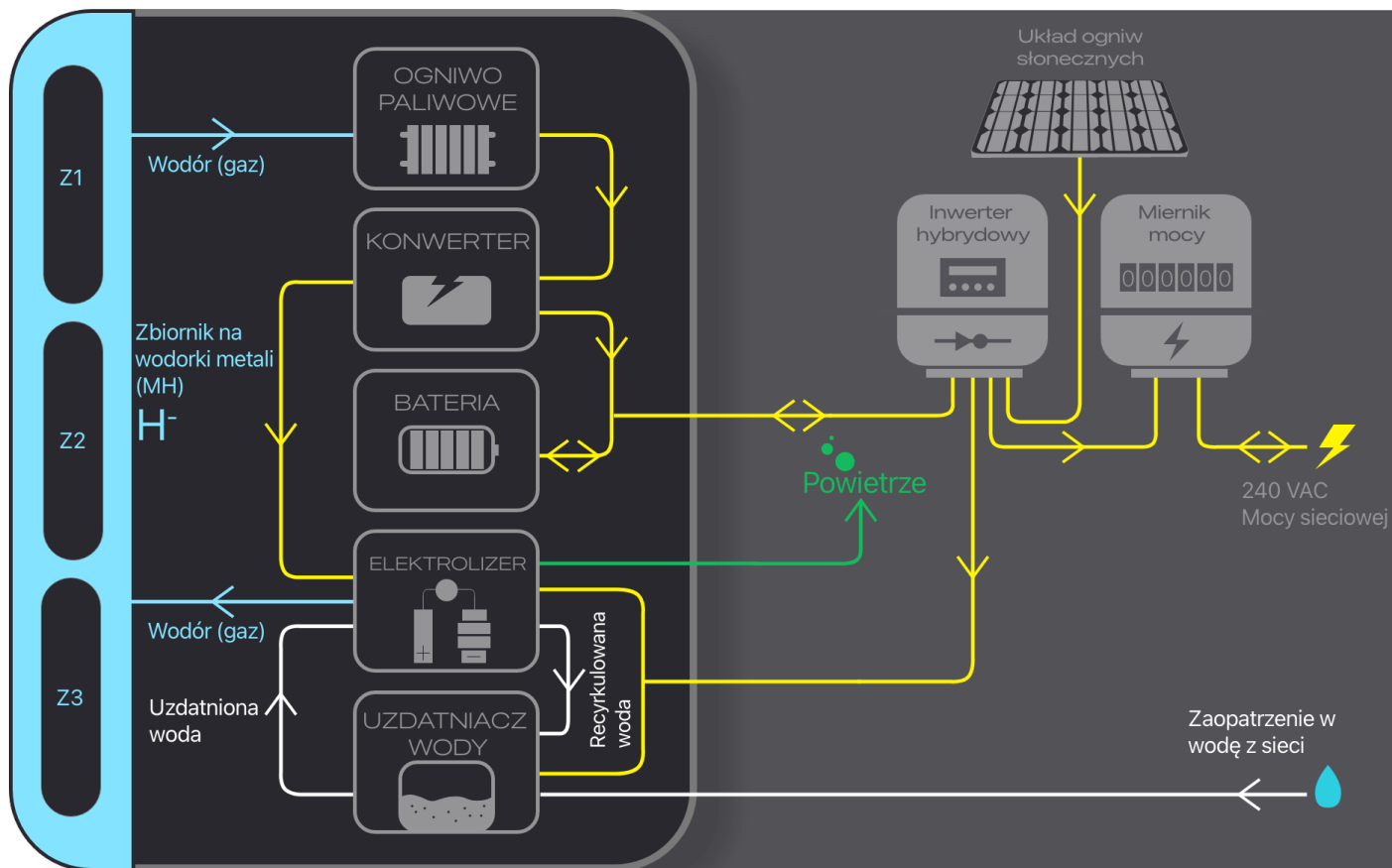
Rysunek 18. Porównanie gęstości energetycznej wybranych rodzajów magazynów wodoru

Źródło: Opracowanie własne

W przypadku zbiorników wodorowych opartych na technologii wodorków metali dostrzec można kolejne zalety, takie jak:

- Duża koncentracja objętościowa
- Bezpieczeństwo
- Oczyszczanie
- Kompresja nie mechaniczna

Przykłady zastosowań systemów MH w Dolinie Wodorowej obejmują szeroki zakres sektorów oraz skali ich wielkości. Małe zbiorniki wodoroków metali mogą być wdrażane w budynkach mieszkalnych, gdzie przechowywany wodór może służyć jednocześnie jako źródło prądotwórcze, generator ciepła oraz bazowo jako magazyn energii. Warto podkreślić, że takie zastosowanie jest istotne w kontekście rosnącej liczby inteligentnych budynków, gdzie wykorzystanie MH może stanowić kluczową część systemu zarządzania zamkniętym obiegiem energii oraz ideą systemów samowystarczalnych. Scenariusz przydomowego wykorzystania zbiorników wodorowych jest możliwy jedynie w sytuacji, gdy duża część ogólnej infrastruktury oparta jest na wodorze. Posiadanie takiego zbiornika w gospodarstwie domowym może również rozwiązać problem produkcji energii przez prosumentów. Obecnie osoby produkujące energię na przykład z paneli fotowoltaicznych muszą zwracać ją do swojego głównego dostawcy. Doprowadza to do tego, że każda nadwyżka wyprodukowanej energii nie może być przez nich zmagazynowana na własny użytek tylko trafia do ogólnej sieci przesyłowej i w konsekwencji prosumenci na tym tracą. Aby lepiej zrozumieć funkcjonowanie tej technologii, na poniższym rysunku przedstawiono szczegółowy schemat małego skalowego zbiornika MH.



Rysunek 19. Schemat działania zbiornika na wodorok metali w użyciu przydomowym

Źródło: Opracowanie własne na podstawie urządzenia firmy LAVO

Aplikacja systemów MH na większą skalę to na przykład integrowanie ich z lokalnymi stacjami tankowania wodoru dla pojazdów napędzanych ogniwami paliwowymi. Mogą być również wykorzystywane w przemyśle, dla osiedli mieszkaniowych, dzielnic czy szpitali jako zabezpieczenie w przypadku braku energii sieciowej. Najważniejsze zalety systemów magazynowania MH obejmują ich zdolność do przechowywania wodoru pod niskim ciśnieniem i bezpieczne uwalnianie go w razie potrzeby czy integracja instalacji z odnawialnymi źródłami energii w celu produkcji zielonego wodoru. Wodór w postaci wodorków metali może być magazynowany w sposób stabilny i nie wymaga skomplikowanej infrastruktury ciśnieniowej. Ponadto, zastosowanie systemów MH może przyczynić się do elastycznego zarządzania zapotrzebowaniem energetycznym. Systemy te mogą reagować na zmieniające się zapotrzebowanie na energię, uwalniając wodór w razie potrzeby, co pozwala na dostosowanie dostaw energii do bieżących potrzeb. Ta elastyczność jest kluczowa w kontekście zmiennego charakteru dostępności energii odnawialnej, takiej jak energia słoneczna czy wiatrowa.

Podsumowując, magazynowanie wodoru przy wykorzystaniu wodorków metali jest zaawansowaną technologią, która może dostarczyć nie tylko skuteczne, ale także zrównoważone rozwiązania dla różnych sektorów i zastosowań energetycznych Doliny Wodnorodowej. Ze względu na swoje zalety techniczne, takie jak wysoka gęstość energii i elastyczność, systemy MH wnoszą istotny wkład w transformację energetyczną regionu, przyczyniając się do zrównoważonego i efektywnego magazynowania energii. Obecnie rozwiązanie to nie jest popularne, ze względu na jego wysoki koszt, jednak w perspektywie 20 letniej możemy spekulować o obniżeniu jej ceny w ramach tak zwanego cyklu technologicznego, czyli w wyniku szerszej implementacji tej technologii na rynku.

Kolejne kroki

Postęp w dziedzinie technologii wodorowych na obszarze Doliny Śląsko-Małopolskiej przekształca oblicze regionalnej energetyki. Ten dynamiczny rozwój, idący za polityką zrównoważonej przyszłości, kształtuje się obecnie jako nowa normalność, a nie tylko chwilowy trend. Wzmożone inwestycje w sektorze wodorowym ukierunkowują się na tworzenie przemysłu wodorowego jako nowego filaru gospodarki. Strategiczne inwestycje dotyczące rozbudowania infrastruktury wodorowej przyczyniły się do stworzenia zaplecza, które pozwala na oparcie gospodarki na tej technologii. Mowa tu między innymi o elektrolizerach do produkcji wodoru, powszechnych stacjach tankowania, czy hurtowniach wodorowych. Dystrybucja wodoru wewnątrz regionu oraz poza jego granice przebiega poprzez dostosowanie istniejących już sieci gazociągowych. Pozwoliło to na ograniczenie kosztów oraz wykorzystanie posiadanych zasobów. Magazyny wodoru oparte na technologii wodorków metali (MH) stanowią ważny element całego systemu. Dzięki uruchomieniu programu „Moje H₂OZE” wdrożono wsparcie dla gospodarstw domowych oraz przedsiębiorstw przy inwestycji we własne instalacje wodorowe, co pozwoliło im osiągnąć pewną autonomię i bezpieczeństwo energetyczne. Uruchomienie programów finansowania w postaci dotacji, ulg podatkowych oraz kredytów preferencyjnych zna-

cząco wpłynęło na zainteresowanie samą technologią w sektorze publicznym oraz prywatnym. Taki model zdecentralizowanego systemu energetycznego nie tylko usprawnia sam przesył energii, ale również minimalizuje ryzyko przeciążenia sieci elektroenergetycznej. Wodór w formie skroplonej lub gazowej magazynowany jest w utworzonych geologicznych magazynach w zamkniętych kopalniach oraz kawernach solnych. Pełnią one rolę strategicznych rezerwarów i buforów energetycznych. Stanowią one zabezpieczenie przed fluktuacjami w dostawach energii ze źródeł odnawialnych zapewniając stabilność systemu w trudnych warunkach pogodowych. Biorąc przykład od Polskich partnerów strategicznych takich jak Niemcy czy kraje Skandynawskie, Polska wypracowała unikalny jednak oparty na ogromnym zasobie wiedzy i doświadczeniu partnerów, zintegrowany system energetyczny. Powstałe inkubatory nowych technologii w pobliżu uczelni wyższych (Akademii Górniczo Hutniczej oraz Politechniki Śląskiej), dedykowane rozwojowi technologii „nowej energetyki”, doprowadziły do zwiększenia ilości patentów w tym sektorze. Również sektor prywatny poprzez fundusze inwestycyjne oraz uruchamiane programy w postaci akceleratorów technologicznych przyczynia się do ugruntowania pozycji wodoru jako ważnego filaru gospodarki. Silna współpraca pomiędzy innymi doliczonymi wodorowymi opiera się nie tylko na dokumentach strategicznych, ale również na procesie transferu technologii pomiędzy graczami. Pozwala to na równą rywalizację oraz wymianę wiedzy, aby zapewnić równomierny postęp na krajowym poziomie. Tym samym wolniej rozwijające się regiony mają okazję do wyrównania szans i zniwelowania różnic lokalnych. Adaptacja infrastruktury wodorowej w obszarach transportu czy przemysłu (w tym ciężkiego) zwiększa zaufanie oraz ciągle zapotrzebowanie na wodór.

Magazyny wodoru istotnie przyczyniły się do zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego nie tylko regionu, ale również kraju. Tym samym Polska wzmocniła swoją autonomię energetyczną niwelując zapotrzebowanie na import energii z innych krajów. Wiadomo jak ważnym elementem wdrażania technologii wodorowych pozostaje sama edukacja i świadomość społeczna. Kampanie edukacyjno-informacyjne mające na celu zwiększenie świadomości społecznej na temat opcji produkcji, magazynowania i wykorzystania wodoru w codziennym życiu, powodują zwiększenie zaufania oraz lepsze poczucie bezpieczeństwa wśród mieszkańców. Wodór traktowany jest jak każde inne źródło energii oraz postrzegany jest nie jako zagrożenie, ale jako gwarancję bezpieczeństwa.

„Uważam, że zapotrzebowanie na wodór będzie szczególnie istotne w obszarze transportu (nośnik energii w pojazdach z ogniwami paliwowymi), przemysłu oraz magazynowania energii elektrycznej (Magazyny wodorowe mogą pełnić rolę bufora energetycznego i pomagać w integracji odnawialnych źródeł energii do sieci elektroenergetycznej). Jeśli wodór staje się strategicznym elementem transformacji energetycznej jego wpływ na polską energetykę będzie ogromny. Stosowanie wodoru jako nośnika energii może wspomóc redukcję emisji i dekarbonizacji. Wobec tego, Polska może być zmuszona do inwestycji w produkcję, dystrybucję i infrastrukturę związaną z wodorem.⁸”

⁸ Ekspert podczas wywiadów

Zwiększenie udziału odnawialnych źródeł energii w miksie energetycznym spowodowało pojawienie się nadwyżek energii w okresach letnich oraz spadki w okresach zimowych. Wodór pozwolił na zniwelowanie tych różnic poprzez efektywne magazynowanie go w okresach obfitości energetycznej oraz uwalnianie w potrzebnych chwilach.

Tabela 5. Potencjalny mikś energetyczny w 2040 roku

Energia pierwotna	Procent udziału w miksie energetycznym
Energia jądrowa	25 – 30 %
Węgiel	15 – 20 %
Zielony wodór	20 – 25 %
Energia z biomasy	10 – 15 %
Energia wiatrowa	20 – 25 %
Energia słoneczna	10 – 15 %

Źródło: Opracowanie własne na podstawie wywiadów eksperckich

Powyższa tabela prezentuje możliwy do uzyskania mikś energetyczny Polski w 2040 roku. Podczas wywiadów eksperckich pojawiło się pytanie o wizję struktury energetycznej. Ekspertcy wskazali na znaczący wzrost wykorzystania energii odnawialnej oraz odsuwanie na bok paliw kopalnych. Znalazło się miejsce również i dla wodoru. Występuje w dwóch głównych rolach. Jako zamiennik gazów konwencjonalnych oraz służy do bilansowania energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych. Stabilizowanie odnawialnych źródeł energii wodorem stanowi istotny punkt wdrażania polityki H₂OZE. Zminimalizowane zostało ryzyko związane z koncepcją węgiel + atom, dzięki zrozumieniu, że transformacja energetyczna jest nieuchronna, a Śląsk stanowi strategiczny region kraju. Tradycja energetyczna regionu zachowała się dzięki wprowadzeniu nowego źródła, które może zastąpić węgiel w drodze do czystszej i bardziej zrównoważonej struktury energetycznej kraju i regionu.

Przywiązanie coraz większej wagi do technologii wodorowych wpisuje się w tendencje globalne, a ich rola w energetyce nie tylko przyczynia się do zmian w strukturze energetycznej, lecz również kształtuje realną transformację, poprzez stworzenie zrównoważonego, odpornego na zmiany i niezależnego systemu energetycznego w Polsce.

Rekomendacje

Zintegrowanie odnawialnych źródeł energii z technologiami wodorowymi, może skutecznie przyspieszyć tak zwaną zieloną transformację sektora energetycznego. Działania podejmowane w zakresie popularyzacji oraz wdrażania nowego ekosystemu powinny opierać się na skonkretyzowanych celach oraz działaniach, które ułatwią aplikację rozwiązań wodorowych do istniejącego systemu.

Cele

1. Przyspieszenie Wdrożenia Technologii Wodorowych: Inwestycje w badania i rozwój technologii wodorowych oraz ich integracji z OZE powinny być priorytetem. Skoncentrowanie się na poprawie wydajności, bezpieczeństwa i skalowalności pomoże przyspieszyć adaptację.
2. Tworzenie Sprzyjającego Środowiska Legislacyjnego i Strategicznego: Ustanowienie korzystnych ram regulacyjnych, dotacji i ulg podatkowych zachęci sektor publiczny i prywatny do współpracy, inwestowania i tworzenia innowacyjnych rozwiązań.
3. Rozbudowanie Infrastruktury Wodorowej: Inwestycje w infrastrukturę produkcji, magazynowania i dystrybucji wodoru oraz ich integracja z istniejącym systemem stworzą stabilne i efektywne środowisko dla rozwoju.
4. Edukacja i Akceptacja Społeczna: Kampanie edukacyjne i dialog z lokalnymi społecznościami pomogą zrozumieć korzyści i wyzwania technologii wodorowych, co przyczyni się do ich akceptacji i wsparcia.
5. Współpraca Międzynarodowa i Lokalna: Współpraca z innymi krajami oraz innymi regionalnymi dolinami wodorowymi, przodującymi w dziedzinie wykorzystania technologii wodorowych, pozwoli na wymianę wiedzy, doświadczeń i transfer technologii, przyspieszając rozwój sektora.

Strategiczne działania

Badania i rozwój technologii

- A. Instytucjonalne wsparcie finansowe rozwoju technologii magazynowania wodoru oraz jej integracji z infrastrukturą odnawialnych źródeł energii sektora B&R.
- B. Otwarcie inkubatorów dla otoczenia akademickiego, wspierające młodych naukowców nad tworzeniem innowacyjnych rozwiązań.
- C. Finansowanie prywatnych oraz publicznych akceleratorów przedsiębiorczości dla małych i średnich firm oraz startupów.

- D. Zacieśnienie współpracy sektora publicznego, prywatnego oraz akademickiego. Umożliwienie transferu technologii, wymiany wiedzy oraz sprawiedliwej konkurencji.

Tworzenie polityk i regulacji

- A. Wprowadzenie spójnych przepisów regulujących produkcję, dystrybucję, magazynowanie i wykorzystanie wodoru, włączając standardy bezpieczeństwa.
- B. Zachęcanie do współpracy między organami rządowymi, przemysłem i środowiskiem akademickim. Dzielenie się wiedzą i doświadczeniem w celu efektywnego dostosowania polityki do postępu technologicznego i trendów rynkowych.
- C. Dostosowanie systemu prawnego do potrzeb sektora wodorowego, aby uproszczać procesy projektowe. Wprowadzenie mechanizmów wsparcia dla projektów innowacyjnych, np. specjalnych procedur pozwoleń czy ulg podatkowych.
- D. Opracowanie przepisów bezpieczeństwa dla magazynowania i transportu wodoru. Zapewnienie ochrony środowiska i uwzględnienie wyzwań technologicznych w regulacjach.
- E. Opracowanie strategicznych ram regulacyjnych dla sektora wodorowego, obejmujących wsparcie finansowe i podatkowe. Ustanowienie programów finansowania, które koncentrują się na projektach związanych z produkcją, dystrybucją i wykorzystaniem wodoru oraz jego integracji z OZE.

Rozwój infrastruktury

- A. Inwestycje w infrastrukturę dla produkcji wodoru, jednostki magazynujące, stacje tankowania, elektrolizery i dystrybucję. Stworzenie efektywnej sieci dla powszechnego wykorzystania energii wodorowej.
- B. Współpraca sektorów gazowego, wodnego i energetycznego. Ułatwianie transportu, dystrybucji i wykorzystania wodoru poprzez integrację istniejących struktur.
- C. Wdrażanie technologii OZE, takich jak fotowoltaika, farmy wiatrowe, elektrownie wodne i biogazownie do produkcji wodoru.
- D. Kontynuacja prac oraz rozpoczęcie projektów pilotażowych dotyczących zbiorników opartych na wodorkach metali (MH). Rozpoczęcie wykorzystywania ich na małą skalę oraz ocena adaptacji.
- E. Rozpoczęcie prac nad przystosowywaniem kawern solnych do magazynowania wodoru.

Świadomość i akceptacja społeczna

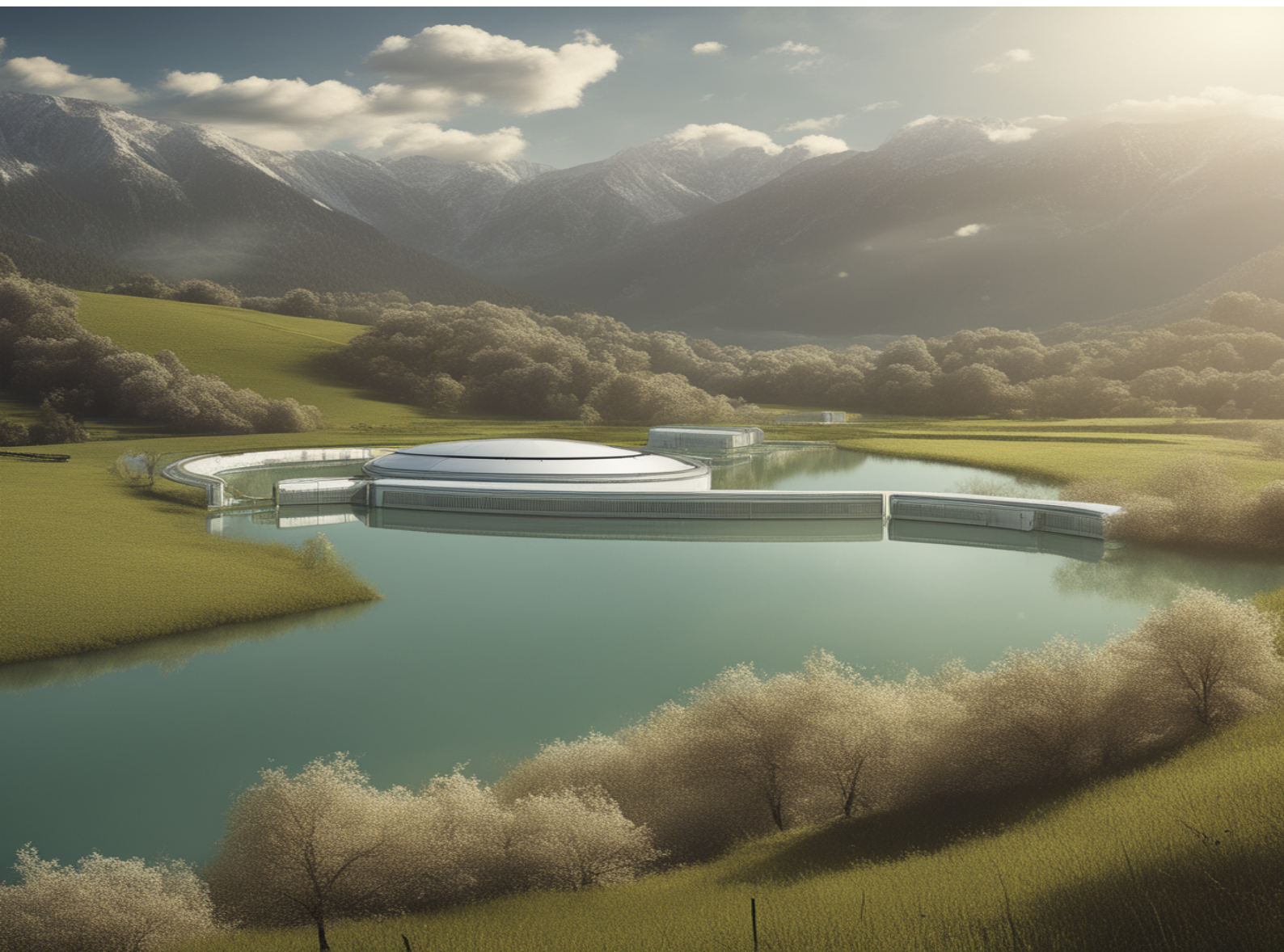
- A. Przeprowadzenie kampanii edukacyjnych dla społeczeństwa, ukierunkowanych na wyjaśnienie korzyści i potencjału energii wodorowej oraz rozwianie błędnych przekonań.
- B. Współpraca z lokalnymi społecznościami i interesariuszami w celu zrozumienia ich obaw oraz opinii. Umożliwienie aktywnego udziału w procesach podejmowania decyzji związanych z projektami strategicznych dokumentów w sprawie magazynowania i wykorzystania wodoru.
- C. Stworzenie platformy umożliwiającej społeczeństwu udział w procesach decyzyjnych dotyczących transformacji energetycznej. Obejmuje to tworzenie regulacji i polityk związanych z technologią wodorową.
- D. Prowadzenie kampanii informacyjnych, skierowanych zarówno do obywateli, jak i przedsiębiorstw oraz instytucji. Celem tych kampanii jest zwiększenie świadomości na temat korzyści wynikających z różnych opcji magazynowania wodoru oraz integracji z odnawialnymi źródłami energii.
- E. Dążenie do osiągnięcia zrównoważonej akceptacji społecznej dla technologii wodorowych poprzez transparentność, edukację i uwzględnienie opinii lokalnych społeczności.

Międzynarodowa i lokalna współpraca

- A. Aktywne nawiązywanie współpracy z krajami przodującymi w technologiach wodorowych, takimi jak Niemcy i kraje Skandynawskie, w celu wymiany wiedzy, najlepszych praktyk i doświadczeń.
- B. Zaangażowanie się w międzynarodowe fora i organizacje zajmujące się energią wodorową, aby pozostawać na bieżąco ze światowymi trendami, postępem technologicznym i rozwojem polityki.
- C. Tworzenie partnerstw i współpracy między różnymi dolinami wodorowymi w celu wymiany wiedzy, doświadczeń oraz transferu technologii.
- D. Promowanie integracji lokalnych i regionalnych rozwiązań energetycznych opartych na odnawialnych źródłach energii, co przyczyni się do zwiększenia efektywności i stabilności infrastruktury energetycznej.
- E. Stworzenie partnerstwa pomiędzy sektorem publicznym a prywatnym, wspierającego rozwój różnych opcji magazynowania wodoru poprzez ułatwienia administracyjne, dostęp do finansowania i promocję innowacyjnych rozwiązań.
- F. Zachęcanie do współpracy między sektorami elektroenergetycznym, gazowym, ciepłowniczym, e-mobilności i innymi zainteresowanymi podmiotami w celu osiągnięcia synergii i efektów skali poprzez integrację różnych możliwości magazynowania wodoru.

Zakończenie

Wyniki analizy przyszłości magazynowania wodoru sugerują istotny potencjał jaki posiada wodór nie tylko w kontekście tego jednego segmentu, ale również w kontekście ogólnogospodarczym. Globalne zmiany dotyczące systemów energetycznych, ochrony klimatu czy bezpieczeństwa wewnętrznego potrzebują holistycznych rozwiązań, które dadzą efektywne odpowiedzi na współczesne wyzwania. W taki sposób można postrzegać właśnie wodór. Gotowy do wykorzystania w transporcie, sektorze energetycznym czy ciepłowniczym, jak również w rolnictwie czy mieszkalnictwie. Niestety, mimo że jest wszechobecny oraz bardzo dobrze znany, wciąż nie potrafimy przeskoczyć bariery ekonomicznej oraz tej związanej z mentalnym oporem. Przejście gospodarki w stronę modelu bardziej zrównoważonego chęci dążenia do postępu. Na szczęście względy ekonomiczne nie powinny stanowić problemu nie do przejścia. Analizując historyczne zachowania innych technologii jesteśmy w stanie dojść do wniosku, że w pewnym momencie koszty z nią związane maleją. Technologie wodorowe potrzebują czasu, popularyzacji oraz wsparcia strategicznego ze strony sektora publicznego oraz prywatnego. Często w przypadku energetyki to regulacje państwowe decydują o kierunku rozwoju danej gałęzi. Finansowania wodoru powinny wychodzić odgórnie i być na tyle szerokie, aby wodór zaczął stanowić realną konkurencję względem innych źródeł energii. Jednocześnie konieczne jest ściśle zacieśnienie współpracy pomiędzy sektorem prywatnym, publicznym oraz ośrodkami akademickimi. Te ostatnie najczęściej stanowią o sile innowacji w danej branży. Obecny stan gospodarki wodorowej w Polsce a szczególnie tech-



nologii magazynowania wodoru, trudno określić jako zaawansowany. Ważnym krokiem było zapoczątkowanie powstawania dolin wodorowych, nakreślenia przestrzeni do wspólnej wymiany wiedzy oraz stworzenie Strategii Wodorowej, jednak efekty tych projektów wciąż są niewielkie.

Z drugiej strony ważnym krokiem będzie (w końcu) rozpoczęcie transformacji energetycznej kraju. Nie sposób myśleć o nowoczesnych rozwiązaniach, kiedy wciąż żyjemy w cieniu gospodarki opartej na węglu. Energetyka atomowa również nie stanowi wystarczającego rozwiązania. Po pierwsze, okres jej wdrażania pozostaje zbyt długi, aby odpowiadał na bieżące potrzeby. Po drugie atom nadal podtrzymuje proces przywiązania do źródeł nieodnawialnych. Transformacja energetyczna nie dotyczy jednak jedynie sposobu wytwarzania energii. Stan polskich sieci elektroenergetycznych czy gazociągów wciąż pozostaje w tyle względem naszych partnerów. W dobie silnej urbanizacji, zwiększania podaży oraz popytu na energię elektryczną, przeciążenia sieci będą coraz częstsze. Polska nie będzie gotowa ani na wodór, na OZE, ani na żadną inną opcję niskoemisyjnego wytwarzania energii, jeśli nie zadba o zmodernizowaną i zaadaptowaną do obecnych wymagań infrastrukturę. Jeżeli chodzi o barierę mentalną, potrzeba szeroko zakrojonych kampanii edukacyjnych, które pozwolą na lepsze zrozumienie wodoru i korzyści z niego płynących. Warto również uzmysławiać, że obecnie również korzystamy z surowców, które zdolne są do niekontrolowanych zachowań. Wodór może być od nich znacznie bezpieczniejszy. Śląsko-Małopolska dolina wodorowa posiada wszystkie potrzebne zasoby do rozwoju technologii magazynowania wodoru oraz szerzej - rozwoju technologii wodorowych. Powyższa analiza wskazała począwszy od ogólnej charakterystyki po bardziej szczegółową wizję, możliwości jakie daje ten region. Pora na podejmowanie odpowiednich decyzji oraz określenie o jakiej przyszłości myślimy.

Wodór określić można jako wyzwanie i możliwość jednocześnie. Wdrażanie odpowiednich polityk, efektywne gospodarowanie zasobami oraz współpraca w zakresie rozwoju będą kluczowymi determinantami sukcesu tego projektu. Działania podejmowane obecnie będą miały znaczący wpływ na kształtowanie się przyszłości. Dobrze, jeśli będziemy z niej dumni.

Spis literatury

- [1] Aziz, M. (2021) "Liquid Hydrogen: A Review on Liquefaction, Storage, Transportation, and Safety", *Energies* 2021, 14, 5917. Dostępne na: <https://doi.org/10.3390/en14185917>
- [2] Carbon Limits & DNV (2021) Re-Stream — Study on the reuse of oil and gas infrastructure for hydrogen and CCS in Europe. Dostępne na: <https://www.carbonlimits.no/wp-content/uploads/2022/03/Re-stream-Final.pdf>
- [3] Dell, R. and Rand, D., 2001. 'Energy storage — a key technology for global energy sustainability', *Journal of Power Sources*, vol. 100, no. 1-2, pp. 2-17.
- [4] DNV (2022) ENERGY TRANSITION OUTLOOK 2022 EXECUTIVE SUMMARY A global and regional forecast to 2050, Hovik
- [5] DNV (2022) Hydrogen Forecast to 2050 - Energy Transition Outlook 2022, Hovik
- [6] DOLINY WODOROWE - Agencja Rozwoju Przemysłu S.A. 2023. DOLINY WODOROWE - Agencja Rozwoju Przemysłu S.A. [ONLINE] Dostępne na: <https://arp.pl/pl/jak-dzialamy/doliny-wodorowe/>.
- [7] hydrogenconference.pl - Podsumowanie. 2023. hydrogenconference.pl - Podsumowanie. [ONLINE] Dostępne na: <https://hydrogenconference.pl/podsumowanie/>.
- [8] IEA (2019) The Future of Hydrogen Seizing today's opportunities Report prepared by the IEA for the G20, Japan
- [9] IEA (2020) Energy Technology Perspectives 2020, Francja
- [10] IEA (2020) Renewables 2020, Analysis and forecast to 2025, Francja
- [11] IEA (2021) Global Hydrogen Review 2021, International Energy Agency, Paris
- [12] IEA. 2023. Energy Start-up Data Explorer – Data Tools - IEA. [ONLINE] Dostępne na: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-start-up-data-explorer>.
- [13] IEA. 2023. Energy Technology Patents Data Explorer – Data Tools - IEA. [ONLINE] Dostępne na: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-technology-patents-data-explorer>.
- [14] IEA. 2023. Google Trends Data Explorer – Data Tools - IEA. [ONLINE] Dostępne na: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/google-trends-data-explorer>.
- [15] IEA. 2023. Poland - Countries & Regions - IEA. [ONLINE] Dostępne na: <https://www.iea.org/countries/poland>.
- [16] Infuture Institute (2021) Gdańsk Przyszłości, Raport z badań, Dostępne na: <https://gdanskprzyszlosci.ikm.gda.pl>, Gdańsk
- [17] IRENA (2022), Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi

[18] Komorowska, A., Benalcazar, P. and Kamiński, J., 2023. 'Evaluating the competitiveness and uncertainty of offshore wind-to-hydrogen production: A case study of Poland', *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 39, pp. 14577-14590.

[19] Krauz M., Bąkała M., Razumkova K., Skrzypkiewicz M., Niemczyk A., Ajdys L., Boguszewicz P., Kosiorek M., Łazor M., Czarnecki B., Bronk L., Tchorek G., Wójtowicz S., Brzozowski M., Koziół W., Majczyk J., Andrzejewski T., Jabłońska B., Targowski F., Grzybowski M., Fudała J., Błaszczyc E., Cenowski M., Müller T., Strzelecka-Jastrząb E., Wcisło E., 2021. *Analiza potencjału technologii wodorowych w Polsce do roku 2030 z perspektywą do 2040 roku*. 1st ed. Warszawa: Centrum Technologii Wodorowych, Instytut Energetyki Wydział Zarządzania, Uniwersytet Warszawski Instytut Ekologii Terenów Uprzemysłowionych, Warszawa, październik 2021 r.

[20] Kupecki J., Błesznowski M., Motyliński K., Wierzbicki M., Jagielski S., Boiski M. Maj, M., Szpor, A. (2020), *Gospodarka wodorowa w Polsce. Obserwacje na podstawie ram badawczych Technologicznego Systemu Innowacji*, Policy Paper, nr 5, Polski Instytut Ekonomiczny, Warszawa.

[21] Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z Perspektywą do roku 2040 se.min-pan.krakow.pl. 2023. [ONLINE] Dostępne na: https://se.min-pan.krakow.pl/pelne_teksty35/k35_prezentacje/k35se_barszczowska.pdf.

[22] Śląsko-Małopolska Dolina Wodorowa - Portal wodorowy, 2023. [ONLINE] Dostępne na: <https://h2poland.eu/pl/kategorie/doliny-wodorowe/slasko-malopolska-dolina-wodorowa/>.

[23] Stowarzyszenie Śląsko-Małopolska Dolina Wodorowa zarejestrowana w Krajowym Rejestrze Sądowym - AKTUALNOŚCI - H2POLAND. 2023. Stowarzyszenie Śląsko-Małopolska Dolina Wodorowa zarejestrowana w Krajowym Rejestrze Sądowym - AKTUALNOŚCI - H2POLAND. [ONLINE] Dostępne na: <https://h2poland.com.pl/pl/aktualnosci/stowarzyszenie-slasko-malopolska-dolina-wodorowa-zarejestrowana-w-krajowym-rejestrze-sadowym>.

[24] Tarasov, B., Fursikov, P., Volodin, A. and Bocharnikov, M., 2021. 'Metal hydride hydrogen storage and compression systems for energy storage technologies', *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 25, pp. 13647-13657.

[25] TÜV Rheinland. 2023. Zbiorniki ciśnieniowe na wodór i inne metody jego magazynowa | TÜV Rheinland. [ONLINE] Dostępne na: <https://www.tuv.com/landingpage/pl/hydrogen-technology/main-navigation/storage/>.

[26] Weitemeyer, S., Kleinhans, D., Vogt, T. and Agert, C., 2015. 'Integration of Renewable Energy Sources in future power systems: The role of storage', *Renewable Energy*, vol. 75, no. 20, pp. 14-20.

Spis tabel

Tabela 1 Wodór a krajowe polityki i działania, s. 12

Tabela 2 Przegląd technologii produkcji wodoru, s. 14

Tabela 3 Możliwości magazynowania wodoru, s. 23

Tabela 4 Porównanie właściwości wodoru z innymi gazami, s. 27

Tabela 5 Potencjalny miks energetyczny w 2040 roku, s. 39

Spis rysunków

Rysunek 1 Foresight graficznie, s. 4

Rysunek 2 Modelowa wizja gospodarki opartej na wodorze, s. 6

Rysunek 3 Modelowa wizja metody 3xW, s. 7

Rysunek 4 Mapa dolin wodorowych w Polsce, s. 9

Rysunek 5 Właściwości wodoru, s. 13

Rysunek 6 Wizja eksplozji zbiornika wodorowego, s. 15

Rysunek 7 Liczba wyszukikań hasła „Hydrogen” według kraju przeglądarki Google, s. 16

Rysunek 8 Ilość patentów w sektorze paliw kopalnych i „czystej energii” w Polsce, w okresie 2000 – 2020, s. 17

Rysunek 9 Patenty sektora „czystej energii” z podziałem na rodzaj technologii dla Polski, w okresie 2000 – 2020, s. 18

Rysunek 10 Rok 2000, s. 18

Rysunek 11 Rok 2020, s. 18

Rysunek 12 Budżet R&D z podziałem na sektory w Polsce w latach 2008 – 2022, s. 19

Rysunek 13 Przegląd głównych opcji transportu i magazynowania wodoru, s. 20

Rysunek 14 Wizja zbiornika wodorowego, s. 24

Rysunek 15 Mapa wybranych sieci gazociągowych w Europie, s. 25

Rysunek 16 Mapa gęstości zużycia wodoru dla lat 2030, 2040 i 2050, s. 31

Rysunek 17 Lokalizacja potencjalnych geologicznych magazynów wodoru w Polsce i Unii Europejskiej, s. 32

Rysunek 18 Porównanie gęstości energetycznej wybranych rodzajów magazynów wodoru, s. 35

Rysunek 19 Schemat działania zbiornika na wodorki metali w użytku przydomowym, s. 36