



■ Dr inż. Andrzej Węgrzyn,
HydroH2

Analityczny Proces Decyzyjny lokowania H2Hubs

Studium przypadku Police, Gdynia, Gubin

Proces wyboru lokalizacji hubów wodorowych stanowi kluczowy element budowy zdecentralizowanego systemu energetycznego opartego na OZE i zielonym wodorze. W artykule przedstawiono zastosowanie metody AHP1 do oceny wariantów lokalizacyjnych (Police, Gdynia, Gubin) w kontekście programu HydroH2Hubs, uwzględniającego pełny łańcuch wartości wodoru oraz uwarunkowania infrastrukturalne, rynkowe i geostrategiczne. Analiza wskazuje, że właściwa lokalizacja determinuje skalowalność, efektywność i bezpieczeństwo inwestycji.

Problem decyzyjny w lokowaniu hubów wodorowych

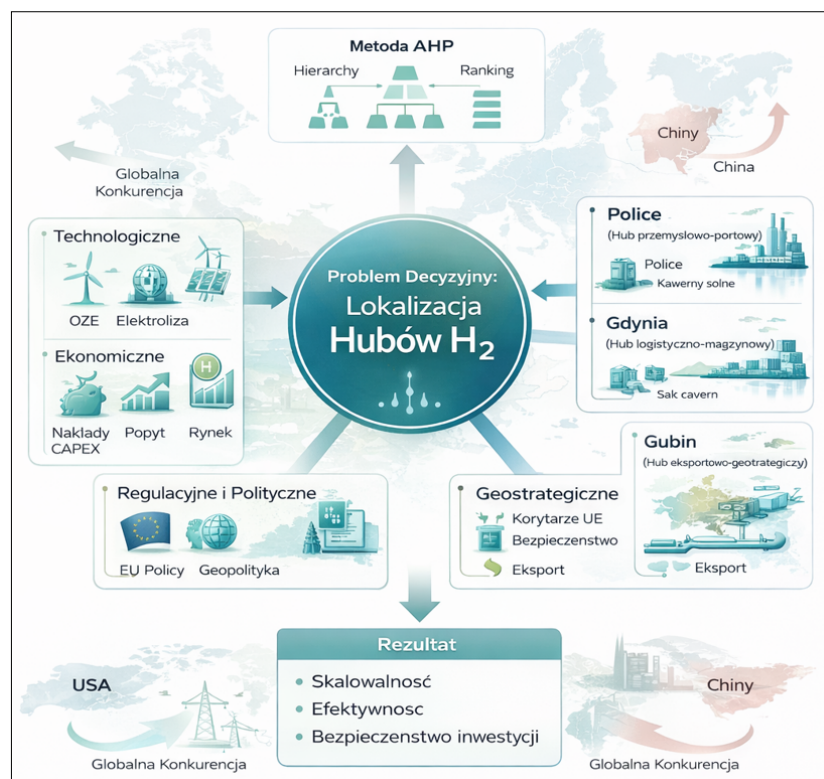
Proces lokowania hubów wodorowych stanowi złożony problem decyzyjny o charakterze wielokryterialnym, w którym krzyżują się czynniki technologiczne, ekonomiczne i geostrategiczne. Wybór lokalizacji - jak pokazuje analiza wstępnie wybranych wariantów Police, Gdynia i Gubin - determinuje nie tylko efektywność inwestycji, lecz także jej odporność na zmienność otoczenia rynkowego i politycznego. W tym kontekście metody takie jak Analityczny Hierarchy Process (AHP) pozwalają

uporządkować problem poprzez hierarchizację kryteriów, porównania parami oraz budowę spójnego rankingu wariantów, integrując zarówno dane ilościowe, jak i jakościowe.

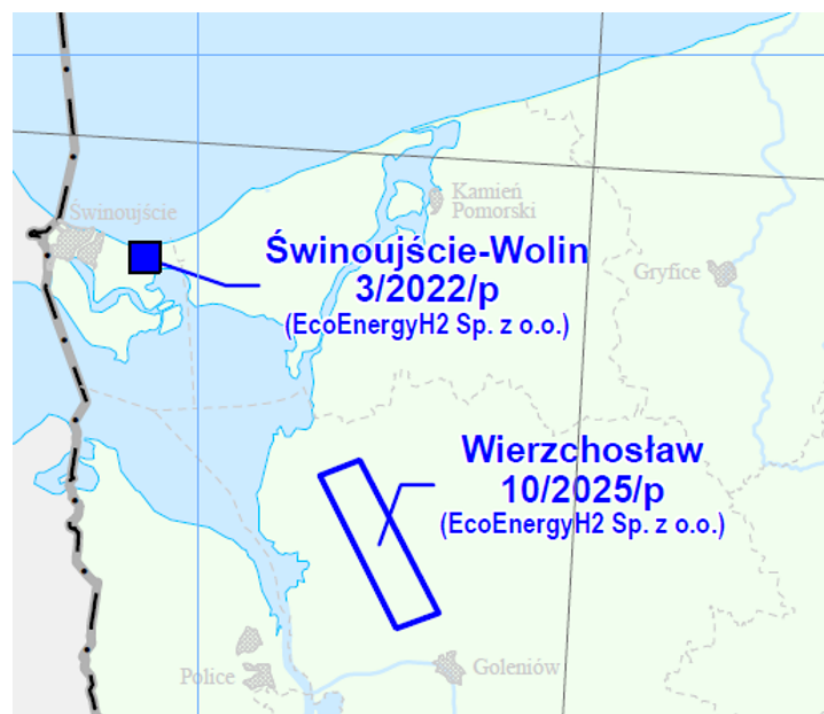
Jednak decyzja lokalizacyjna nie jest już wyłącznie optymalizacją techniczną. Współczesne uwarunkowania geopolityczne wskazują na erozję dotychczasowego ładu bezpieczeństwa i konieczność redefinicji strategii energetycznych w Europie. Rosnąca niepewność relacji z Rosją, ograniczona zdolność projekcji siły przez UE oraz redefinicja priorytetów USA powodują, że infrastruktura energetyczna staje

się elementem gry strategicznej państw. W tym sensie lokalizacja hubu wodorowego wpisuje się w logikę wyboru opcji uwzględniających scenariusze regionalnej kooperacji lub konieczność autonomizacji systemów energetycznych w sytuacji konfliktu.

Równolegle obserwujemy presję ekonomiczną wynikającą z konkurencji globalnej, szczególnie ze strony Chin i USA, które wykorzystują skalę, subsydia i integrację łańcuchów wartości do budowy przewag technologicznych. Europa, zmagająca się z napięciami społecznymi i ryzykiem naruszenia kontraktu społecznego, traci zdolność do utrzymania



Rys. 1. Ilustracja problemu decyzyjnego w lokowaniu hubów wodorowych



Rys. 2. Koncesje na magazynowanie wodoru
Źródło: Mapa MKiS

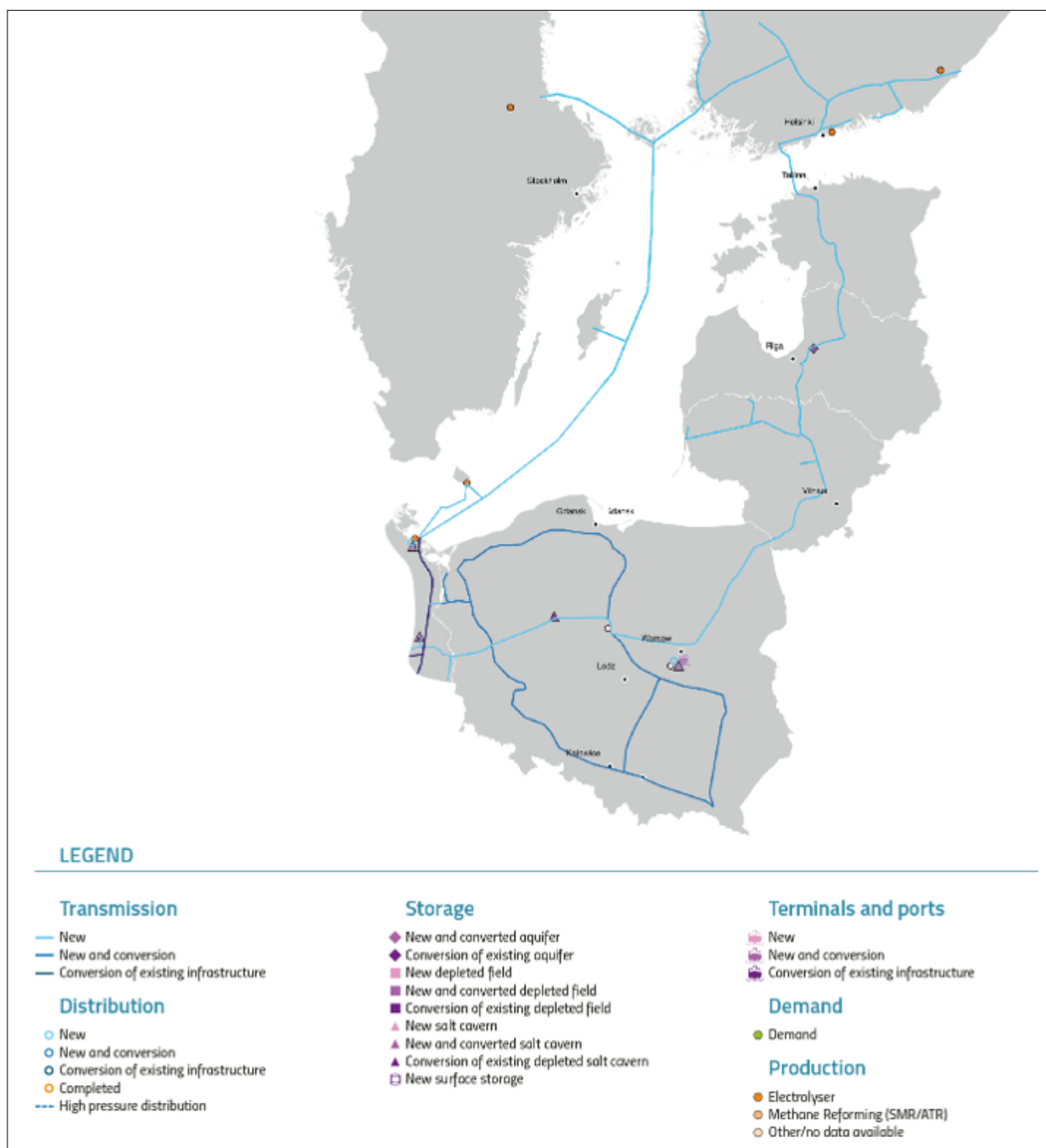
nia wysokich kosztów transformacji bez zapewnienia konkurencyjności przemysłu. W tym kontekście huby wodorowe pełnią funkcję nie tylko infrastrukturalną, ale również stabilizacyjną.

Dodatkowym czynnikiem jest przyspieszająca transformacja technologiczna - rozwój AI i robotyki zwiększa zapotrzebowanie na stabilne, skalowalne źródła energii, jednocześnie zmieniając strukturę popytu przemysłowego. Tym samym decyzja o lokalizacji hubu wodorowego staje się elementem szerszego systemu decyzyjnego, w którym AHP stanowi narzędzie integrujące złożone, często sprzeczne determinanty, umożliwiając racjonalny wybór w warunkach niepewności.

Definicja wariantów strategicznych

Definicja wariantów strategicznych została oparta na wynikach projektu „Wodorowa Mapa Polski”¹ oraz analizach eksperckich HydroH2², które wskazują na koncentrację przyszłej produkcji wodoru w północno-zachodniej części kraju - w szczególności w województwach zachodniopomorskim, pomorskim i lubuskim. Obszary te łączą kluczowe determinanty rozwoju gospodarki wodorowej: dostęp do OZE, infrastrukturę przemysłową, porty oraz potencjał magazynowania, co wpisuje się w podejście wielokryterialne oparte na AHP, uwzględniające m.in. kawerny solne, korytarze europejskie i strefy przemysłowe

Pierwszym wariantem są **Police** - model hubu przemysłowo-portowego, który reprezentuje najbardziej zintegrowaną strukturę łańcucha wartości wodoru. Lokalizacja ta łączy stabilny popyt przemysłowy generowany przez Grupę Azoty, dostęp do portu głębokowodnego oraz istniejącą infrastrukturę energetyczną i chemiczną, co umożliwia szybkie wdrożenie produkcji, magazynowania, dystrybucji i przesyłu na dalekie odległości wodoru. Dodatkowym atutem jest potencjał integracji z morską energetyką wiatrową oraz moż-



Rys. 3. Nordic Baltic H₂ supply corridor⁴

liwość skalowania inwestycji w modelu modułowym, co ogranicza ryzyko inwestycyjne i sprzyja komercjalizacji. Silną stroną lokalizacji są koncesje EcoEnergyH₂ na magazynowanie wodoru w kavernach solnych.

Drugim wariantem jest **Gdynia/Kosakowo** - model logistyczno-magazynowy, oparty na synergii portu kontenerowego oraz istniejącej infrastruktury magazynowej w kavernach solnych. Kawerny te, zgodnie z badaniami i pro-

gramami rozwoju infrastruktury magazynowania, stanowią najbardziej efektywną i bezpieczną formę wielkoskalowego przechowywania wodoru, charakteryzującą się wysoką elastycznością operacyjną. Lokalizacja ta pełni funkcję węzła

dystrybucyjnego, integrując produkcję, import oraz przesył wodoru w ramach rozwijających się europejskich korytarzy wodorowych.

Trzecim wariantem jest **Gubin/Krosno Odrzańskie** - model magazynowo-korytarzowy o silnym charakterze geostrategicznym. Region ten dysponuje jednym z największych potencjałów kawernowych w Polsce, gdzie możliwe jest utworzenie dziesiątek kawern o łącznej pojemności rzędu kilku tys. TWh³, zdolnych do bilansowania krajowego i europejskiego systemu energetycznego. Jednocześnie lokalizacja na styku rynków europejskich, w szczególności niemieckiego, wpisuje się w logikę transgranicznych korytarzy wodorowych i umożliwia rozwój eksportu, wzmacniając rolę Polski jako elementu europejskiej infrastruktury bezpieczeństwa energetycznego.

Zestawienie tych trzech wariantów pokazuje, że rozwój hubów wodorowych nie jest jednorodny, lecz przyjmuje różne modele funkcjonalne - od produkcyjnego, poprzez magazynowy i logistyczny po systemowy - które odpowiadają na zróżnicowane potrzeby rynku i architektury przyszłego systemu energetycznego.

Modelowanie i symulacja AHP

Symulacja decyzyjna została przeprowadzona z wykorzystaniem metody Analytic Hierarchy Process (AHP), która - zgodnie z klasycznym ujęciem T.L. Saaty'ego - pozwala na sprowadzenie złożonego problemu wyboru do struktury hierarchicznej, opartej na porównaniach parami oraz agregacji wyników w postaci wektora globalnych preferencji. W analizie przyjęto cztery kryteria wynikające z „Wodorowej Mapy Polski” oraz prac zespołu HydroH2: (1) zapotrzebowanie lokalne na wodór, (2) dostępność energii i przyłączy (PSE + OZE), (3) możliwości magazynowania i dystrybucji wodoru oraz (4) uwarunkowania geostrategiczne.

Wagi kryteriów zostały określone ekspercko jako: popyt - 0,35; energia -

0,30; magazynowanie/logistyka - 0,20; geostrategia - 0,15, co odzwierciedla dominującą rolę czynników rynkowych i infrastrukturalnych w ekonomice projektów H₂. Następnie dokonano syntetycznej oceny wariantów (Police, Gdynia, Gubin) w skali Saaty'ego 1-9. Police uzyskały najwyższe oceny w zakresie popytu i infrastruktury (silny offtake przemysłowy), Gdynia/Kosakowo w zakresie logistyki i magazynowania (kawerny solne, port), natomiast Gubin w zakresie geostrategii i potencjału eksportowego.

Tabela 1 potwierdza dominację lokalizacji Police jako lokalizacji o najwyższej wartości syntetycznej, wynikającej z równoczesnej przewagi w kryteriach popytowych i logistycznych. Gdynia osiąga wysoką ocenę dzięki funkcji magazynowo-portowej, natomiast Gubin buduje swoją pozycję głównie na czynniku geostrategicznym.

Po agregacji wyników otrzymano wystandardyzowany wektor preferencji AHP, przedstawiony w tabeli 2.

Oznacza to, że wariant Police osiąga najwyższą wartość całkowitą, wynikającą z synergii popytu przemysłowego i istniejącej infrastruktury energetycznej. Gdynia pełni rolę komplementarnego hubu logistyczno-magazynowego, natomiast Gubin - strategicznego węzła eksportowego w relacji do rynku niemieckiego.

Dyskusja wyników wskazuje, że przewaga Police nie wynika z jednego dominującego czynnika, lecz z równowagi między kryteriami. Jednocześnie różnice pomiędzy wariantami nie są skrajne,

co potwierdza zasadę AHP, iż optymalna decyzja jest kompromisem między konkurencyjnymi kryteriami. W ujęciu systemowym oznacza to zasadność rozwoju wielowęzłowej architektury H₂ w Polsce, zamiast koncentracji w jednej lokalizacji.

Analiza ryzyka wariantów strategicznych

Analiza ryzyka wariantów Police, Gdynia/Kosakowo oraz Gubin została przeprowadzona w oparciu o wyniki AHP (rozdz. 1-3), literaturę dotyczącą projektów energetycznych oraz model teorii gier rozszerzony do czterech kluczowych uczestników rynku: generacji OZE, produkcji wodoru, magazynowania i dystrybucji oraz offtake. W literaturze wskazuje się, że projekty energetyczne obarczone są ryzykiem rynkowym, regulacyjnym, kredytowym i operacyjnym, które wzajemnie się wzmacniają i determinują efektywność inwestycji.

W ujęciu teorii gier mamy do czynienia z układem współzależnych decyzji przy niepełnej informacji. Generacja OZE podejmuje decyzje inwestycyjne zależne od stabilności popytu, producenci wodoru od kosztów energii i CAPEX, operatorzy magazynów od wolumenów i sezonowości, a odbiorcy końcowi od ceny i bezpieczeństwa dostaw. Brak koordynacji prowadzi do klasycznego „coordination failure”, gdzie żaden z graczy nie inicjuje inwestycji bez gwarancji działań pozostałych.

Lokalizacja	Popyt	Energia	Logistyka	Geostrategia	Wynik
Police	9	8	9	8	8,55
Gdynia	6	7	9	7	7,05
Gubin	5	8	6	9	6,85

Tab. 1. Ocena syntetyczna (skala 1-9)

Opcja	Wartość
Police	0,41
Gdynia/Kosakowo	0,34
Gubin/ Krosno Odrzańskie	0,25

Tab. 2. Wektor preferencji AHP

Police minimalizują to ryzyko dzięki silnemu lokalnemu popytowi i istniejącej infrastrukturze - układ osiąga równowagę zbliżoną do stabilnej równowagi Nasha. Gdynia/Kosakowo reprezentuje model infrastrukturalny, w którym ryzyko dotyczy synchronizacji magazynowania

z produkcją i popytem. Gubin natomiast funkcjonuje jako wariant eksportowy, silnie uzależniony od regulacji UE i rynku niemieckiego, co zwiększa ekspozycję na ryzyko polityczne i taryfowe.

Dodatkowym wymiarem jest otoczenie instytucjonalne. Koncepcje takie jak „wolne miasto” (np. model Stanisławowa⁴), piaskownice regulacyjne (sandbox), czy historyczne analogie Hanzy i współczesnych hubów typu Hongkong wskazują, że przewaga konkurencyj-

na może wynikać z elastyczności regulacyjnej, a nie wyłącznie z zasobów fizycznych. Wprowadzenie specjalnych reżimów prawnych redukuje ryzyko regulacyjne i przyspiesza osiągnięcie równowagi inwestycyjnej.

W rezultacie analiza potwierdza, że kluczowym ryzykiem nie jest technologia, lecz koordynacja i otoczenie instytucjonalne. Police są wariantem o najniższym ryzyku systemowym, Gdynia - o ryzyku koordynacyjnym, a Gubin - o najwy-

ższej ekspozycji geostrategicznej i regulacyjnej.

Podsumowanie

W gospodarce wodorowej nie wygrywają pojedyncze technologie, lecz lokalizacje zdolne do **integracji całego łańcucha wartości**. Police stanowią przykład takiej lokalizacji - nie jako projekt, lecz jako **systemowy węzeł** przyszłej energetyki Europy. □

Przypisy:

- 1 Saaty, T. L. (1980). The Analytic Hierarchy Process: Planning, priority setting, resource allocation. McGraw-Hill. Doi: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(82\)90022-4](https://doi.org/10.1016/0377-2217(82)90022-4).
- 2 GAZ-SYSTEM publikuje wyniki badania Wodorowa Mapa Polski, <https://www.gaz-system.pl/pl/dla-mediow/komunikaty-prasowe/2024/grudzien/19-12-2024-gaz-system-publikuje-wyniki-badania-wodorowa-mapa-polski.html>.
- 3 Andrzej Węgrzyn, Jak zrobić mapę wodorową z wykorzystaniem AHP? Nowa Energia 02/2024, <https://magazyn.nowa-energia.com.pl/magazyny/nowa-energia-04-2024/>.
- 4 LEARNBOOK ON HYDROGEN SUPPLY CORRIDORS, Clean Hydrogen Alliance Transmission and Distribution Roundtable, March 2023, https://www.entsog.eu/sites/default/files/2023-04/web_entsog_230311_CHA_Learnbook_230418.pdf.
- 5 Leszek Lankof., GIS-based analysis of rock salt deposits' suitability for underground hydrogen storage, International Journal of Hydrogen Energy, 2023.
- 6 Jacek Bartosiak, Wolne miasto Stanisławów, Patronite, 2026, <https://patronite.pl/post/82355/wolne-miasto-stanislawow>.

REKLAMA



Fot.: unsplash.com, Nowa Energia