

■ **Klaudia Ligęza, Piotr Narloch,**  
AGH w Krakowie, Polska Spółka Gazownictwa Sp. z o.o., OZG Kraków

# Perspektywy magazynowania wodoru z odnawialnych źródeł energii w Polsce

cz. 1

**D**o 2050 r. wodór może zastąpić gaz ziemny i paliwa stałe jako źródło energii. Ma odgrywać ważną rolę w gospodarce i w procesie osiągnięcia neutralności klimatycznej. Optymalizacja jego wykorzystania w gospodarce wymaga przede wszystkim stworzenia systemu jego magazynowania. Istotą magazynowania energii w postaci wodoru, wyprodukowanego w okresach nadwyżek energetycznych, np. w podziemnych pustkach, jest jej ponowne wykorzystanie w momencie szczytowego na nią zapotrzebowania. Taka forma magazynowania ma gwarantować odbiór zatłoczonego gazu w jak największej ilości i bez strat spowodowanych jego utratą. W artykule przedstawiono możliwości magazynowania wodoru w Polsce. Zaprezentowano zarówno wielkoskalowe możliwości magazynowania wodoru, jak i metody pozwalające na lokalne magazynowanie tego nośnika energii.

W najbliższych latach coraz większą rolę będzie odgrywał wodór odnawialny (tzw. „zielony” wodór) o bardzo wysokiej czystości (99,999% i więcej), wytwarzany w procesie elektrolizy wody z wykorzystaniem energii ze źródeł odnawialnych [13]. Przewiduje się, że niskoemisyjny wodór produkowany z paliw kopalnych w technologii wychwytywania, wykorzystywania i składowania CO<sub>2</sub> (CCUS) lub z wykorzystaniem dwutlenku węgla w różnych procesach (CCU) („niebieski” wodór), będzie odgrywał przejściową rolę w okresie do 2030 r. [13], [15]. Obecnie Polska należy do światowych liderów w produkcji wodoru (1 mln ton rocznie), który jest wykorzy-

stywany głównie przez sektor rafineryjny. Zgodnie z aktualną polityką energetyczną, wodór będzie kluczowym filarem dekarbonizacji przemysłu, służąc nie tylko jako wektor zielonej energii i paliwo w pojazdach napędzanych wodorem, ale także jako klucz do niezależności energetycznej w przypadku wyczerpania się złóż paliw kopalnych [4], [11]. Przedstawione plany strategii wodorowej zakładają, że oprócz rozwoju produkcji, przemysłu i dystrybucji zielonego wodoru - konieczne będzie również rozwinięcie sektora usług magazynowania [6]. W Polsce szacowany udział energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto został określony

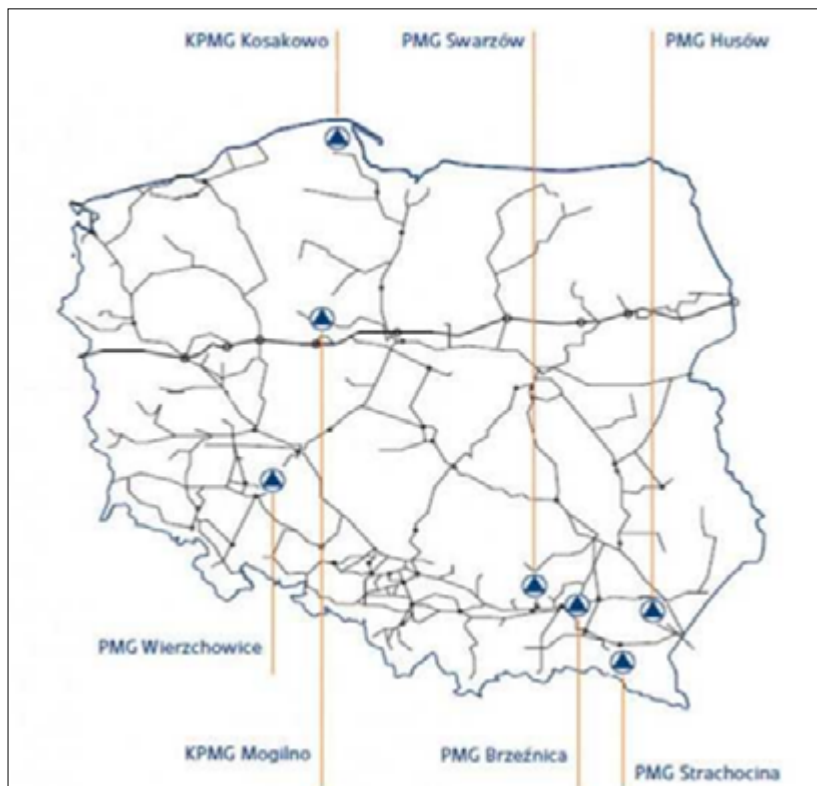
na ok. 12% w 2019 r. i ma sukcesywnie rosnąć. Aby zrównoważyć niedopasowanie między zmienną produkcją energii, a zapotrzebowaniem na nią, potrzebne są efektywne technologie jej magazynowania [4]. Sposób magazynowania jest wybierany na podstawie różnych kryteriów: w zależności od ilości magazynowanej energii, okresu magazynowania, czasu reakcji, sprawności w obie strony, gęstości energii i kosztów [13].

Metody magazynowania energii w postaci wodoru można podzielić na wielko- i małoskalowe. Do metod wielkoskalowych zalicza się magazynowanie wodoru w podziemnych strukturach geologicznych (kawerny solne), maga-

zynowanie wodoru skroplonego, wodoru wiązanego organicznie (LOHC), wodoru zatłaczanego do sieci przesyłowych i dystrybucyjnych gazu ziemnego oraz wodoru w formie amoniaku lub metanolu. Wśród metod małoskalowych wyróżniamy magazynowanie wodoru sprężonego ( $\text{CH}_2$ ) oraz wodoru skroplonego na potrzeby lokalne [7], [13], [14].

### Magazynowanie wodoru w strukturach geologicznych

Magazynowanie wodoru w strukturach geologicznych (kawerny wytugowane w złożach soli, głębokie warstwy wodonośne, wyeksploatowane złoża węglowodorów) uważane jest za rozwiązanie zapewniające lepsze wykorzystanie jego potencjału. Daje ono możliwość długotrwałego, bezpiecznego magazynowania tego gazu (pojemność magazynów energii rzędu terawatogodzin) przy stosunkowo niskich kosztach [13]. Zapewnia także bezpieczeństwo magazynowania - magazyn podziemny jest mniej narażony na pożar lub atak terrorystyczny. Ponadto dostępność struktur geologicznych odpowiednich do magazynowania podziemnego oraz doświadczenie w podziemnym magazynowaniu gazu sprawia, że system ten jest uważany za atrakcyjną opcję magazynowania wodoru na dużą skalę, czemu sprzyjają stosunkowo niskie koszty inwestycyjne, w porównaniu z innymi technologiami magazynowania [4], [12], [13]. Dostarczanie wodoru do lokalnego przemysłu i sektora mobilności, oprócz zwiększonego podłączenia do głównej infrastruktury gazowej i elektrycznej, oznacza, że oczekuje się znacznego wzrostu zapotrzebowania na podziemne magazynowanie wodoru odnawialnego na dużą skalę. Podziemne zbiorniki geologiczne umożliwiają bezpieczne przechowywanie dużych ilości wodoru, pod wysokim ciśnieniem i o dużej gęstości energii, bez wpływu na środowisko [16]. Dzięki temu technologia podziemnego magazynowania wodoru ma duże perspektywy na jej szybkie wdrożenie [13].



**Rys. 1.** Rozmieszczenie istniejących kawernowych oraz podziemnych magazynów gazu  
Źródło: [17]

Struktury geologiczne rozważane jako potencjalne miejsca magazynowania wodoru, ze względu na swoją historię geologiczną oraz zróżnicowanie litologiczne i petrofizyczne, będą różniły się stopniem eksploracji i możliwościami magazynowania. Na świecie doświadczenia z magazynowaniem wodoru w kawernach solnych, wykorzystywanych głównie przez przemysł petrochemiczny, mają takie kraje jak Wielka Brytania (Teesside, Yorkshire) oraz USA (Clemens, Moss Bluff i Spindletop). Doświadczenia z podziemnym magazynowaniem wodoru w porowatych formacjach geologicznych są obecnie jeszcze ograniczone [13], [15].

Główne możliwości głębokiego podziemnego magazynowania gazów, w tym wodoru, w formacjach geologicznych to [4]:

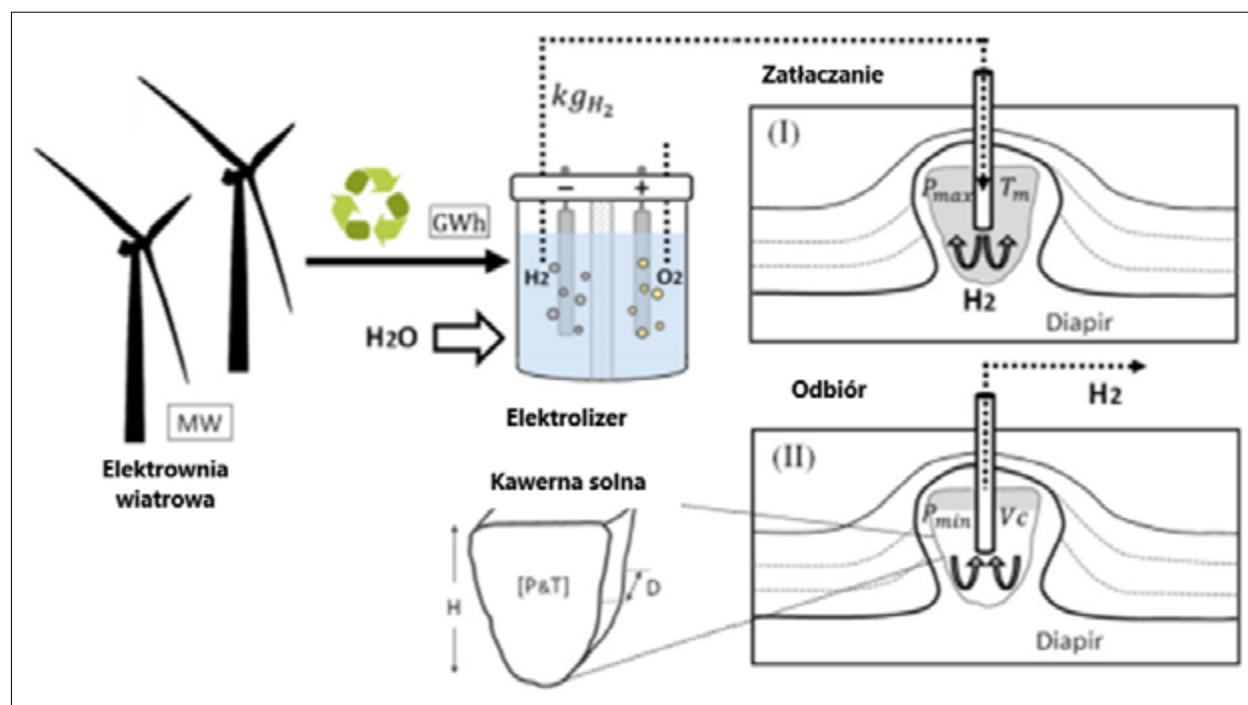
- naturalne zbiorniki wodonośne (warstwy wodonośne),
- puszczone kopalnie podziemne,

- wyeksploatowane pola gazowe i naftowe,
- kawerny skalne wydobywane przy użyciu konwencjonalnych technik górniczych,
- tworzone przez człowieka kawerny solne.

W Polsce mamy do wyboru trzy rodzaje magazynów w obiektach geologicznych. Są to: kawerny solne, wyeksploatowane złoża gazu oraz zawadnione struktury porowate [11].

#### Kawerny solne

Podziemne kawerny solne, będące sztucznymi komorami utworzonymi przez wytugowanie soli w jej złożach pokładowych lub w wysadach solnych, ze względu na właściwości fizyczne soli są odpowiednie do podziemnego magazynowania wodoru. Ściany kawerny solnej są nieprzepuszczalne dla tego gazu, a plastyczne właściwości soli chro-



Rys. 2. Schemat wytwarzania wodoru z odnawialnych źródeł energii oraz proces zatłaczania i odbioru wodoru z kawerny solnej  
Źródło [16]

nią je przed pojawieniem się i rozprzestrzenieniem pęknięć grożących utratą szczelności zbiornika. Sól kamienna jest ponadto obojętna względem wodoru. Ilość magazynowanego i odbieranego gazu w tym przypadku jest bardzo elastyczna, a w jednej strukturze solnej (pokładzie, czy wysadzie) można wyługować kilka kawern. W zależności od potrzeb i sposobu eksploatacji kawernowego magazynu, możliwa jest liczba do dziesięciu „obrotów” zatłoczonego gazu w ciągu roku [1], [5]. Magazynowanie wodoru zatłoczonego do kawerny pozwala na akumulację nadwyżek energii uzyskanej ze źródeł odnawialnych, a następnie jej odzyskanie w procesie odbioru wodoru z kawerny, co przedstawiono na schemacie (rys. 2).

Kawerny solne przeznaczone do magazynowania muszą być starannie zaprojektowane w zależności od specyficznych właściwości soli i dokładnych okoliczności eksploatacji. Projekt kawern musi zapewnić ich stabilność, szczelność dla magazynowanego gazu, dopuszczalne osiadanie powierzchni oraz

bezpieczeństwo otoczenia. Wymagania te muszą być spełnione zarówno podczas procesu ługowania, jak i podczas operacji zatłaczania i wydobywania magazynowanego gazu [16]. W zależności od specyfikacji i możliwości technicznych, kawerny mogą być budowane na głębokości do 2000 m, mają objętość geometryczną do 1 000 000 m<sup>3</sup>, wysokość 300-500 m i średnicę 50-100 m. W zależności od głębokości, mogą być eksploatowane przy ciśnieniu nawet powyżej 20 MPa, co umożliwia magazynowanie bardzo dużych ilości gazu. Ze względu na korzystne właściwości fizyczne soli, kawerny są szczelne względem magazynowanego gazu i charakteryzują się długotrwałą stabilnością oraz dużą elastycznością w zakresie zatłaczania i odbioru [5]. W porównaniu z powierzchniowymi zbiornikami gazu, magazyny kawernowe charakteryzują się znacznie niższymi kosztami budowy, teoretycznie nieograniczonym czasem eksploatacji oraz niewielką powierzchnią zabudowy naziemnej. Są one również chronione przez zalegające war-

stwy geologiczne o grubości często kilkuset metrów. Dzięki temu kawerny solne mają bardzo wysoki poziom ochrony przed wpływami zewnętrznymi [3], [5]. Głębokość kawern wpływa na pojemność magazynowania. Większa głębokość kawerny umożliwia zmagazynowanie większej ilości sprężonego wodoru (wyższe ciśnienie). Przy płytszej głębokości potrzebna jest mniejsza objętość poduszki gazowej [13].

W Polsce od wielu lat mamy sprawnie działające i regularnie wykorzystywane magazyny w kawernach solnych, przechowujące gaz ziemny (KPMG Mogilno, budowany magazyn KPMG Kosakowo) i paliwa (PMRiP Góra), jednak nie magazynowano w nich dotychczas wodoru. Podjęto także prace studialne nad oceną przydatności do tego celu wystąpień soli kamiennej w północnej części województwa pomorskiego, gdzie bliskość Morza Bałtyckiego ułatwia zrzut wyługowanej solanki [1]. Rozmieszczenie wysadów solnych na terenie kraju jednoznacznie warunkuje miejsca budowy tego typu magazynów, jednak lokali-

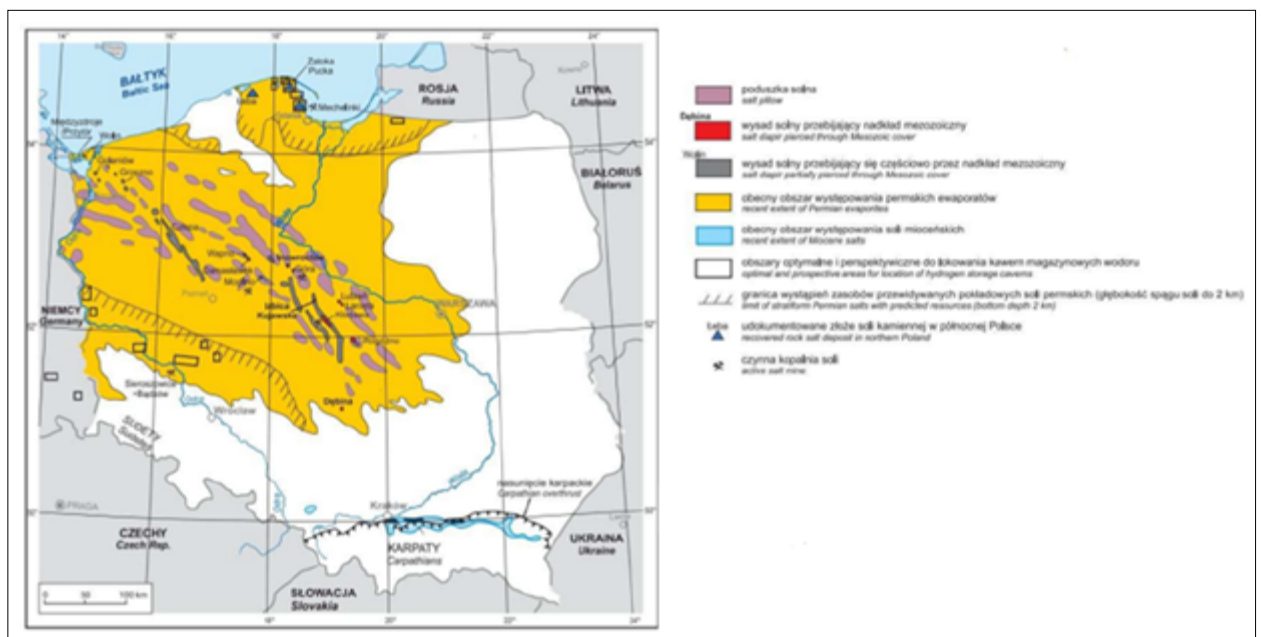
zacje te mogą nie być optymalne w kontekście transportu zmagazynowanego wodoru (mając na uwadze koszty budowy sieci gazociągów i późniejszego przesyłania gazu). To premiuje lokalizację budowy w pobliżu morza i koncepcję oddawania tam solanek, co jednak budzi duże wątpliwości ekologów [11]. Budowa geologiczna i górnicza kraju stwarza bardzo dobre warunki do wiercenia wielkogabarytowych kavern solnych w złożach halitowych, przy czym najbardziej korzystne do budowy kavern są złoża cechsztyńskie (górnym perm) [4]. Istniejące w Polsce kaverny zostały zbudowane w postaci izolowanych komór w złożu warstwowym. Komory rozmieszczone są w pewnych odstępach od siebie, przy czym Mogilno posiada czternaście czynnych komór, a Kosakowo pięć czynnych komór i pięć w budowie. Kilka lokalizacji zostało ocenionych pod kątem możliwości podziemnego magazynowania wodoru. W obrębie Wzniesienia Łęby dobrze zbadane zostały Łęba, Mecheliniki i Zatoka Pucka. W cyklotemie cechsztyńskim PZ1 znajdują się złoża soli kamiennej. Za najbardziej odpowiednie do

budowy kavern uważa się pokłady halitu starszego (Na1), które w złożach Łęby, Mecheliniki i Zatoki Puckiej występują na głębokości odpowiednio 490-800 m, 950-1000 m i 730-790 m. Kolejnym brany pod uwagę regionem jest Legnica-Głogów, położony w monoklinie przedsudeckiej [4].

Spośród 27 przeanalizowanych wysadów solnych (w pełni bądź częściowo przebijających osady mezozoiczne), zlokalizowanych na obszarze Niżu Polskiego w utworach cechsztynu, jedynie siedem dotychczas niezagospodarowanych wysadów spełnia przyjęte tu wymagania, stawiane budowie kavern magazynowych wodoru (minimalna grubość serii solnej rzędu 1 km, maksymalna głębokość występowania zwierciadła solnego <1 km). Przegląd stanu aktualnie dostępnej wiedzy geologicznej o dotychczas niezagospodarowanych wysadach solnych w Polsce pozwala dokonać oceny przydatności tych struktur do budowy w ich obrębie podziemnych magazynów wodoru. Najbardziej korzystne warunki do lokowania kavern magazynowych oferuje wysad **Rogóż-**

**no** (duża powierzchnia, płytko zalegająca sól i duże jej zasoby, dość gruba czapa wysadu i wstępne rozpoznanie struktury). Kolejną strukturą jest spory wysad **Damaśławek**, dość dobrze rozpoznany geologicznie, o nieco głębszym zaleganiu soli, znacznych jej zasobach i grubej czapie wysadu. Jako trzecią i czwartą strukturę w ocenie przydatności uznano bliźniacze wysady **Łanięta** i **Lubień**, o podobnych parametrach zalegania zwierciadła solnego, grubości czapy i stylu budowy wewnętrznej. Podobne są też ich problemy hydrologiczne, związane z obecnością zawadnienia w czapie. Strukturami perspektywicznymi (ocena IV), ale bardzo słabo rozpoznany wiertniczo, są stosunkowo niewielkie (powierzchnia 8-9 km<sup>2</sup>) wysady **Goleniów** i **Izbica Kujawska**, z których pierwszy cechuje dość prosta budowa, z dwoma elewacjami pnia solnego, natomiast w wysadzie **Izbica Kujawska** sól zalega nieco płycej (ok. 550 m), lecz jego rozpoznanie musi być prowadzone niemal od podstaw [1].

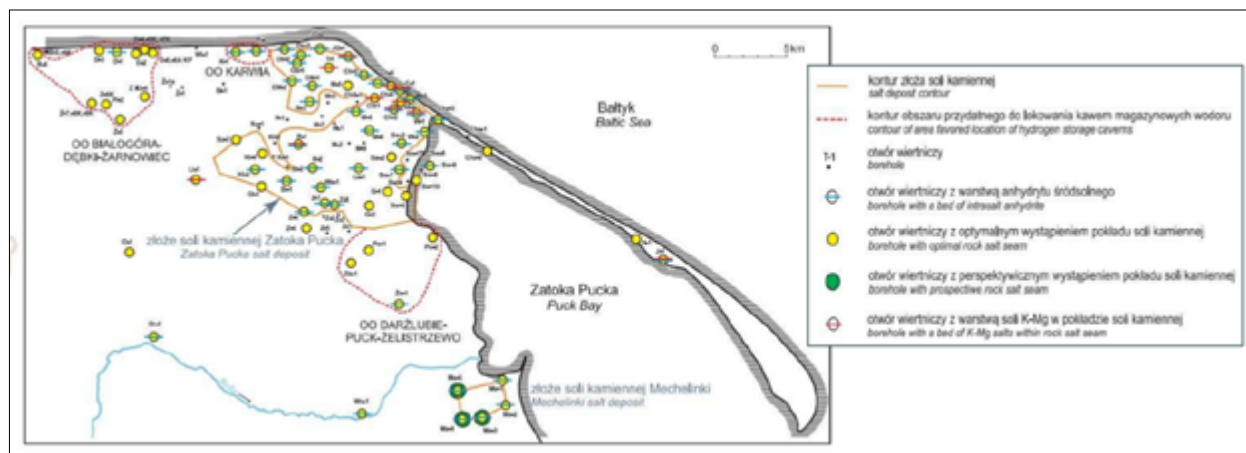
Także pas nadmorski stanowi perspektywiczną lokalizację dla budowy



**Rys. 3.** Lokalizacja obszarów perspektywicznych do lokalizacji kavern magazynowych wodoru w pokładowych złożach soli kamiennej cechsztynu w Polsce

Źródło: [17]





**Rys. 4.** Obszary i otwory wiernicze perspektywiczne do lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowym wystąpieniu utworów solnych w rejonie Zatoki Puckiej  
Źródło: [17]



**Rys. 5.** Potencjalny obszar pod lokalizację kawern wodorowych w rejonie Łeby  
Źródło: [17]

podziemnych magazynów wodoru. Złóża zlokalizowane w pobliżu morza mogą być szczególnie obiecujące ze względu na wygodną utylizację solanki, jaką zapewniają oraz bliskość lądowych elektrowni wiatrowych [4].

Kawerny solne na głębokości kilkuset metrów oferują wiele korzyści dla realizacji podziemnego magazynowania wodoru, w tym wysokie gęstości energii,

niskie koszty budowy i konkretne koszty inwestycyjne na megawatogodzinę magazynowania, niskie wskaźniki wycieków (biorąc pod uwagę ilość magazynowanego wodoru) oraz duże objętości magazynowe (ok. 500 000 m<sup>3</sup> dla kilku tysięcy ton wodoru) i minimalne ryzyko zanieczyszczenia wodorem [7], [12]. Biorąc pod uwagę ogromną pojemność magazynowania energii ok. 200 GWh dla du-

żej kawerny, można założyć, że początkowo muszą być realizowane mniejsze obiekty z zaledwie kilkoma kawernami. W tych okolicznościach znacznie bardziej efektywna pod względem kosztów i czasu jest przebudowa istniejących już kawern gazu ziemnego na kawerny wodoru lub budowa dodatkowych kawern w już zbadanym złożu z istniejącą infrastrukturą i pozwoleniami [5].

### Szczerpane złoża węglowodorów i warstwy wodonośne

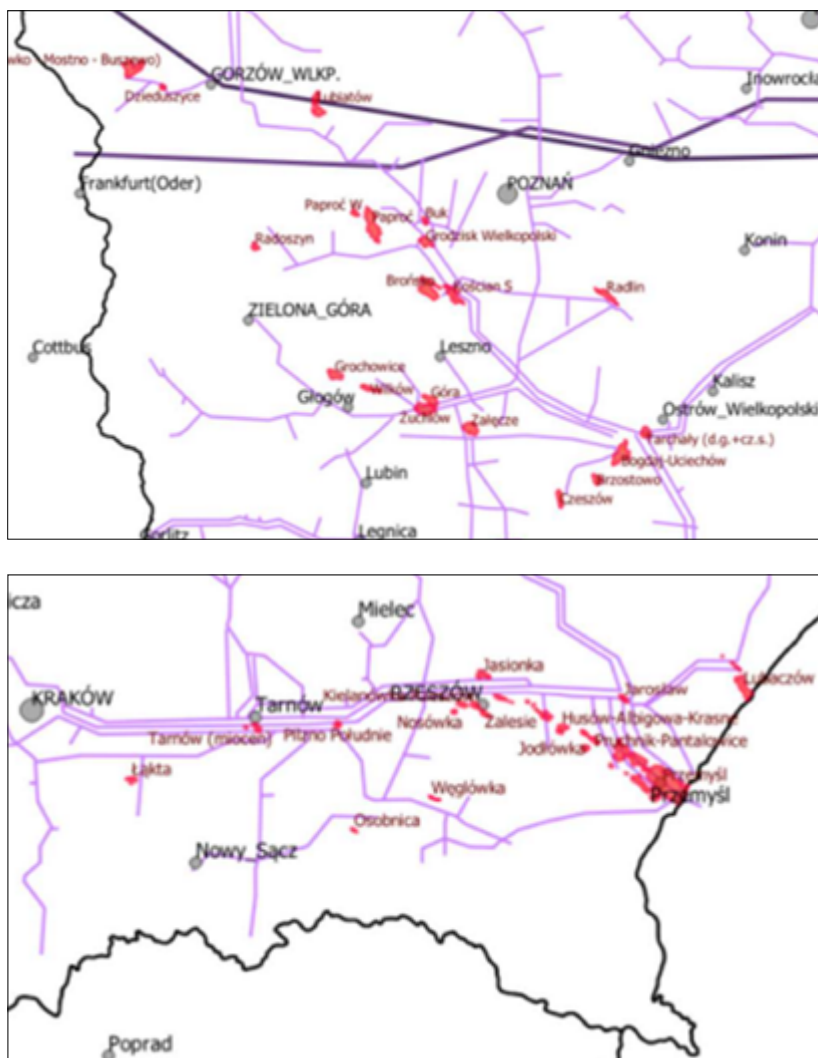
Wyeksploatowane złoża węglowodorów i warstwy wodonośne pozwalają na przechowywanie wodoru w ilościach znacznie większych (o rząd wielkości lub więcej) niż kawerny solne. Pojemność magazynowa w warstwach wodonośnych jest określana nie tylko przez wielkość struktury (zasięg i grubość skał zbiornikowych), ale także przez inne czynniki, do których należą: parametry petrofizyczne, przemieszczanie się płynów wielofazowych, zmiany ciśnienia związane z zatłaczaniem wodoru i inne. Struktury w warstwach wodonośnych są słabiej rozpoznane pod względem budowy geologicznej oraz parametrów zbiornikowych i petrofizycznych, dlatego budowa magazynu będzie wiązała się z licznymi i kosztownymi badaniami geologicznymi i geofizycznymi. Budowa geologiczna wyeksploatowanych zbiorników węglowodorów, ze względu na długą historię ich eksploatacji jest dobrze rozpoznana [13]. Oprócz warunków koniecznych, jakie musi spełnić poziom zbiornikowy do magazynowania gazu ziemnego, musi on również w przypadku wodoru spełniać dodatkowe warunki wynikające z cech fizyko-chemicznych cząsteczki wodoru. Konieczne jest rozpoznanie lub uszczegółowienie danych w następującym zakresie [6]:

- uaktualnienie danych dotyczących parametrów technicznych otworów eksploatacyjnych w tym zarurowania, wyposażenia wgłębnego oraz szczelności zacementowania rur okładzinowych,
- uaktualnienie budowy strukturalnej poziomu magazynowego, identyfikacji pułapek złożowych, oceny zamknięcia poziomu zbiornikowego i określenia miejsc newralgicznych,
- uszczegółowienie badań petrograficznych i mineralogicznych skał zbiornikowych i uszczelniających w celu określenia możliwości potencjalnych reakcji chemicznych między skałą, a wodorem,

- ocena składu chemicznego gazu pierwotnego i magazynowego oraz składu wód złożowych pod kątem możliwych reakcji z wodorem,
- określenie potencjalnych kierunków szybkiej dyfuzji wodoru w skałach zbiornikowych (w nawiązaniu do zmian facjalnych i granulometrycznych),
- analiza warunków mikrobiologicznych w poziomie zbiornikowym i ich ewentualnego wpływu na magazynowanie gazu z domieszką wodoru.

W Polsce jedną z możliwości zmagazynowania wodoru będzie wykorzystanie do tego celu istniejących magazynów gazu, położonych m. in. na obszarze zapadliska przedkarpackiego i magazynujących gaz ziemny w poziomach piaskowcowych miocenu autochtonicznego [6]. W toku prowadzonych badań wytypowano 27 złóż gazu ziemnego i 12 złóż ropy naftowej w perspektywie podziemnego magazynowania wodoru.

Do zalet tych obiektów geologicznych można zaliczyć: znane położenie, w znacznej części gotową infrastrukturę napowierzchniową, znaną objętość



Rys. 6 i 7. Wytypowane złoża gazu ziemnego i złoża ropy naftowej w perspektywie podziemnego magazynowania wodoru

Źródło: [17]

i ciśnienie początkowe gazu ziemnego. Wiadomo również, że złożę było szczelne dla metanu. Do wad należy mniejsza elastyczność w wielkości zatlaczenia i pobierania gazu. Jeśli magazyn ma być równocześnie mieszalnikiem wodoru z gazem ziemnym, to proces mieszania będzie przebiegał na powierzchni. Jeśli taki obiekt ma być dostosowany do magazynowania wodoru, konieczne jest zweryfikowanie szczelności odwiertów dla wodoru oraz odporność skał uszczelniających [11].

W przypadku głęboko zalegających warstw wodonośnych trzeba przeanalizować wszelkie dostępne dane archiwalne, takie jak: mapy geologiczne, przekroje geologiczne, wyniki badań sejsmicznych oraz wyniki wszystkich badań próbek skalnych jeśli w tym rejonie prowadzone były prace wiertnicze. Ponadto konieczne są badania oddziaływania wodoru ze skałami w obecności wód złożowych, pomiary weryfikujące szczelność struktury, zbudowanie numerycznego modelu geologicznego i dynamicznego. Końcowy etap to budowa infrastruktury powierzchniowej. Ryzykiem cały czas towarzyszącym budowie tego typu magazynu jest możliwość stwierdzenia na każdym jej etapie, że dana struktura nie nadaje się na magazyn. Jest to najdroższe rozwiązanie, nawet przy pozytywnym wyniku badań [11].

## Magazynowanie wodoru w zbiornikach naziemnych

Najdłużej i szeroko stosowaną metodą jest przechowywanie wodoru w stanie gazowym. Stosowane w przemyśle sprawdzone technologie i urządzenia pozwalają na przechowywanie gazowego wodoru pod ciśnieniem 200-350 barów w butlach stalowych [8]. Wodór można magazynować w postaci gazowej pod ciśnieniem (np. butle i zbiorniki ciśnieniowe), w postaci ciekłej (np. cysterny, statki do przewozu skroplonych gazów), w zbiornikach ciśnieniowych zawierających wodorki metali, czy też w materiałach węglowych [8]. Wśród

nich najczęściej stosowane w praktyce przemysłowej jest fizyczne przechowywanie gazowego wodoru w zbiornikach ciśnieniowych (do 700 atm) oraz wodoru ciekłego w kriokomorach (w temperaturze - 253°C) [4]. Naziemne magazyny wodoru, takie jak rurociągi lub zbiorniki, mają ograniczoną pojemność magazynowania (MWh; godziny-dni) [13].

## Zbiorniki ciśnieniowe - wodór sprężony

Tradycyjną i sprawdzoną metodą magazynowania wodoru jest jego sprężanie do zbiorników wykonywanych ze stali, które są wykorzystywane do transportu lub do stacjonarnego magazynowania. Aktualnie coraz częściej, w różnych branżach przemysłu, stosowane są zbiorniki ciśnieniowe wykonane jako konstrukcje kompozytowe, charakteryzujące się znacznie niższą wagą oraz wyższym ciśnieniem pracy, przy czym posiadają zbliżoną pojemność wodną do zbiorników metalowych na wodór w postaci gazowej. Rozwijana jest również technologia zbiorników krio-ciśnieniowych, w których przechowywany jest sprężony wodór w obniżonej temperaturze (od ok. -120 do -196°C) [8]. Ze względu na bardzo małą gęstość wodoru (0,089 kg/m<sup>3</sup>) w normalnych warunkach, magazynowanie pod wysokim ciśnieniem jest najbardziej skutecznym sposobem przechowywania wodoru [2].

Zbiorniki ciśnieniowe dzieli się na pięć typów w zależności od ich elementów, które w konsekwencji kontrolują ich charakterystykę [2]. Podstawowe typy zbiorników przeznaczonych do składowania sprężonego wodoru przedstawiono w tab. 1.

Typowym środkiem magazynowania i transportu wodoru są zbiorniki ciśnieniowe Typu III i IV jako systemy magazynowania na statkach oraz środki służące do transportowania wodoru w zestawach kontenerowych zgodnych ze standardem ISO. Powszechnym jest stosowanie zbiorników ciśnieniowych Typu IV służących do magazynowania wodoru w miejscach produkcji, takich jak stanowiska elektrolizy przy elektrowniach wiatrowych lub słonecznych/biogazowych oraz w miejscach użytkowania, takich jak zakłady przemysłowe oraz stacje napełniania [8]. Kompozytowe zbiorniki ciśnieniowe z wykładzinami metalowymi (typ III) i niemetalowymi (typ IV) są powszechnie stosowane w sektorze motoryzacyjnym [2].

## Zbiorniki ciśnieniowe - wodór skroplony

Ciekły wodór musi być przechowywany w temperaturze poniżej -240,18°C (temperatura krytyczna wodoru), zazwyczaj jest to ok. -250°C. Gęstość energii jest znacznie wyższa niż w przypadku wodoru sprężonego, skroplenie i utrzymanie wodoru w stanie ciekłym jest

Typ zbiornika	Właściwości
TYP I	Konstrukcja zbiornika głównie ze stali, w całości metalowa.
TYP II	Konstrukcja głównie ze stali i aluminium owiniętymi polimerem wzmocnionym włóknami w kierunku nawinięcia. Obciążenia konstrukcyjne są przejmowane przez materiały metalowe zbiornika oraz obwodowe materiały kompozytowe.
TYP III	Konstrukcja składająca się z okładziny metalowej, zwykle z aluminium, w pełni owiniętej kompozytem z żywic epoksydowych lub winylo-estrowych z ciągłym włóknem węglowym. Obciążenia konstrukcyjne są przejmowane przez matrycę kompozytową.
TYP IV	Konstrukcja niemetalowa, składająca się z kompozytu z włókna węglowego lub szklanego i węglowego, który jest owinięty wokół okładziny z polimeru termoplastycznego. Obciążenia konstrukcyjne przenoszą materiały kompozytowe.
TYP V	Konstrukcja w całości kompozytowa. Zbiornik pozbawiony jest okładziny oraz zawiera kompozyt z włókna węglowego lub węglowego i szklanego owinięty wokół składanego lub protektorowego trzpienia. Całe obciążenie jest przenoszone materiałami kompozytowe.

Tab. 1. Typy zbiorników magazynowych przeznaczonych dla wodoru sprężonego  
Źródło: [8]



bardzo energochłonne. Ciekły wodór przechowywany w zbiornikach kriogenicznych wyparowuje w tempie kilku % na dzień, przy temperaturze pokojowej na zewnątrz zbiornika [8]. Magazynowanie ciekłego wodoru ( $LH_2$ ) charakteryzuje się znaczną gęstością magazynowania  $70,9 \text{ kg-H}_2/\text{m}^3$ , a także zaletami bezpieczeństwa w odniesieniu do ciśnienia magazynowania [2].

Wodór skroplony może być transportowany na trzy sposoby [8]:

- skompresowany w zbiornikach ciśnieniowych - pojedynczych lub w zestawach kontenerowych,
- w postaci ciekłej - w termicznie izolowanych zbiornikach spełniających wymagania, np. ADN/ADR i IMO,
- rurociągami - w postaci czystej lub jako mieszanina np. z gazem ziemnym.

Całkowite zużycie energii w przypadku magazynowania skroplonego wodoru wynosi ok. 35% zawartości energetycznej magazynowanego wodoru, dlatego ten sposób magazynowania jest zwykle ograniczony do zastosowań lotniczych i kosmicznych [2]. Obecnie powszechnie stosowane pojemności zbiorników na  $LH_2$ , które nadal nadają się do transportu samochodowego, są rzędu 4 500  $\text{kg LH}_2$  (ok.  $60\text{-}70 \text{ m}^3$ ) [9].

Perspektywnym rozwiązaniem dla długoterminowego magazynowania wodoru jest wykorzystanie terminali LNG (skroplonego gazu ziemnego) poprzez rozszerzenie ich zastosowania na inne potencjalnie neutralne dla klimatu nośniki energii, takie jak ciekły wodór ( $LH_2$ ). Technologia jest uważana za komercyjną, ale nie ma projektów demonstracyjnych na dużą skalę, ani istniejącej infrastruktury transportowej, ponieważ nie istnieje globalny rynek wodoru ciekłego. Jak dotąd powstał tylko jeden prototypowy terminal ciekłego wodoru w Kobe w Japonii, a towar ten nie jest przedmiotem globalnego obrotu [9].

Wykorzystanie  $LH_2$  w terminalach LNG jest uważane za bardzo wyma-

gające, ponieważ jego niższa temperatura wrzenia w temperaturze  $-253^\circ\text{C}$  wymaga szerokich dostosowań izolacji termicznej komponentów. Jeśli jednak planuje się regazyfikację wodoru wkrótce po imporcie lub zamierza się wykorzystać gaz wylotowy do innych zastosowań, utrzymywanie stopnia wygotowania na tak niskim poziomie jak w przypadku LNG może nie być konieczne. Ryzyko kruchości wodorowej materiałów wyklucza stosowanie niektórych powszechnie stosowanych stali w zbiornikach LNG. Zdecydowanie zaleca się rozważenie kompatybilności materiałów z  $LH_2$  w fazie projektowania terminalu LNG. Na przykład poprzez zastosowanie wysokostopowych stali nierdzewnych odpowiednich dla bardzo niskich temperatur (np. 304L lub 316L). W przeciwnym razie elementy takie jak zbiornik magazynowy, stanowiący największą część inwestycji, nie będą kompatybilne z  $LH_2$ . Jeżeli do budowy zbiornika magazynowego zostanie użyta stal kompatybilna z  $LH_2$ , a wyższy współczynnik wrzenia będzie akceptowalny, to ok. 50% kosztów inwestycji w LNG może być ponownie wykorzystane przy użyciu  $LH_2$  [9]. Stosowanie wodoru zamiast gazu ziemnego wymusza również dodatkowe środki ostrożności. Ryzyko wybuchu lub zapłonu jest wyższe w przypadku gazowego wodoru ze względu na jego szerszy zakres palności (4-94 % objętości) i niższą energię zapłonu ( $0,02 \text{ mJ}$ ). Pożar wywołany przez wodór rozprzestrzeniałby się z prawie 8-krotnie większą prędkością w porównaniu z gazem ziemnym. Temperatury samozapłonu dla wodoru i gazu ziemnego są na porównywalnym poziomie. Czysty spalający się wodór ma płomień niewidoczny dla ludzkiego oka. Ponadto wodór ma wysoką reaktywność i dlatego powoduje degradację materiałów (kruchość wodorowa) [9].

Obecnie istnieje tylko niewielka liczba zbiorników na ciekły wodór, a ich pojemność jest znacznie niższa niż w przypadku LNG. Istniejące zbiorniki mają zazwyczaj mniejszą pojemność (np. ok.

$600 \text{ m}^3$ ). Nie były one dotychczas skalowane, gdyż nie było zapotrzebowania na większe zbiorniki wodoru. Dlatego doświadczenia z przechowywaniem wodoru w dużych ilościach są ograniczone [9]. W terminalu LNG zbiorniki magazynowe musiałyby być oczywiście wielokrotnie większe. Izolacja termiczna może być wykonana z zastosowaniem próżni lub osłony z ciekłego azotu (LIN), przy czym spodziewany wskaźnik wrzenia wynosi  $1\%/d$ . Łatwość konwersji istniejącego zbiornika LNG na  $LH_2$  jest różnie postrzegana w literaturze i w wywiadach eksperckich. Kluczowym wyzwaniem, które należy pokonać, są rozbieżne wymogi dotyczące chłodzenia  $LH_2$ . W odniesieniu do materiałów izolacji termicznej konieczne mogą być pewne dostosowania. Ryzyko odparowania jest znacznie większe w przypadku ciekłego wodoru, ze względu na jego bardzo niską temperaturę wrzenia wynoszącą  $-253^\circ\text{C}$ . Ograniczenie tego zjawiska stanowi wyzwanie. Aby utrzymać ekstremalnie niskie temperatury w zbiorniku, potrzebne są specjalistyczne konstrukcje [9]. Terminal  $LH_2$  w Kobe w Japonii posiada sferyczny zbiornik na wodór. Zbiorniki sferyczne są wybierane, ponieważ ich konstrukcja zmniejsza dzienny odpływ wodoru ze względu na mniejszy napływ ciepła. Jest to jednak rozwiązanie droższe w budowie niż zbiorniki z płaskim dnem. Ponieważ większość terminali LNG ma obecnie zbiorniki płaskodenne, w przypadku stosowania  $LH_2$  odparowanie może być wyższe, nie tylko z powodu izolacji, ale także z powodu konstrukcji zbiornika (niekorzystny stosunek powierzchni do objętości) [9]. Podkreśla się ponadto, że w zbiorniku LNG, w przypadku przechowywania w nim wodoru, zostanie zmagazynowane tylko ok. 40% energii, ze względu na odmienne właściwości fizyczne [9]. Istniejący w Polsce terminal LNG w Świnoujściu posiada dwa zbiorniki LNG o pojemnościach 160 tys.  $\text{m}^3$  LNG każdy oraz wybudowany w 2022 r. trzeci zbiorniki o pojemności 180 tys.  $\text{m}^3$ . □



Bibliografia

1. Czapkowski G., Tarkowski R., Uwarunkowania geologiczne wybranych wysadów solnych w Polsce i ich przydatność do budowy kavern do magazynowania wodoru, Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 472: 53-82, 2018.
2. Hassan I. A., Ramadan H. S., Saleh M. A., Hissel D., Hydrogen storage technologies for stationary and mobile applications: Review, analysis and perspectives, Renewable and Sustainable Energy Reviews 149, 2021, 111311.
3. Kirman N., Power-to-gas efficiency of a hydrogen back-up system governed by interruptible sources services, Technical University Delft, 2020.
4. Malachowska A., Łukasik N., Mioduska J., Gębicki J., Hydrogen storage in geological formations – the potential of salt caverns, Energies, 2022.
5. Michalski J., Bunker U., Crotogino F., Donadei S., Schneider G.-S., Pregger T., Cao K.-K., Heide D., Hydrogen generation by electrolysis and storage in salt caverns: Potentials, economics and systems aspects with regard to the German Energy transition, International Journal of Hydrogen Energy, 42, 2017, 13427-13443.
6. Miziolek M., Filar B., Kwiloz T., Magazynowanie wodoru w szczerpanych złożach gazu ziemnego, Nafta-Gaz, 2022, nr 3, s. 219-239.
7. Portarapillo M., Di Benedetto A., Risk assessment of the large-scale hydrogen storage in salt caverns, Energies, 2021.
8. Publikacja informacyjna 11/I. Bezpieczne wykorzystanie wodoru jako paliwa w komercyjnych zastosowaniach przemysłowych, Polski Rejestr Statków S. A., 06. 2021.
9. Riemer M., Schreiner F., Wachsmuth J., Conversion of LNG Terminals for Liquid Hydrogen or Ammonia Analysis of Technical Feasibility under Economic Considerations, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI, 11. 2022.
10. Schrottenboer A. H., Veenstra A. A. T., uit het Broek M. A. J., Ursavas E., A Green Hydrogen Energy System: Optimal control strategies for integrated hydrogen storage and power generation with wind energy, Renewable and Sustainable Energy Reviews 168, 2022, 112744.
11. Such P., Magazynowanie wodoru w obiektach geologicznych, Nafta-Gaz, 2020, nr 11, s. 794-798.
12. Takach M., Sarajlić M., Peters D., Kroener M., Schuldt F., von Maydell K., Review of hydrogen production techniques from water using renewable Energy sources and its storage in salt caverns, Energies, 2022.
13. Tarkowski R., Uliasz-Misiak B., Towards underground hydrogen storage: A review of barriers, Renewable and Sustainable Energy Reviews 162, 2022, 112451.
14. Tchorek G., Rewolucja wodorowa - jak skorzystać?, PARP, Centrum Rozwoju MŚP, 10. 2022.
15. Uliasz-Misiak B., Lewandowska-Śmierczalska J., Matula R., Tarkowski R., Prospects for the implementation of underground hydrogen storage in the EU, Energies, 2022.
16. Valle-Falcones L. M., Grima-Olmedo C., Mazadiego-Martinez L. F., Hurtado-Bezos A., Eguilior-Diaz S., Rodriguez-Pons R., Green Hydrogen Storage in an Underground Cavern: A Case Study in Salt Diapir of Spain, Applied Sciences, 2022.
17. Zacharski J., Wójcicki A., Czapkowski G., Wykorzystanie wybranych struktur geologicznych do podziemnego magazynowania substancji, Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy, Forum Innowacyjności, 2022.
18. Maciej Chaczykowski, Andrzej J. Osiadacz "Technologie Power-To-Gas w aspekcie współpracy z systemami gazowniczymi", materiał z VI Konferencji Naukowo-Technicznej Energetyka Gazowa, kwiecień 2016, Zawiercie.
19. Zespół ds. Rozwoju Przemysłu OZE i Korzyści dla Polskiej Gospodarki, raport Zespołu Nr 4 „Gospodarka wodorowa”.  
<https://klastrowodorowy.pl/images/zdjecia/Gospodarka%20Wodorowa%20Rekomendacje%20grupy%204.pdf>
20. Piotr Szewczyk, Jacek Jaworski „Analiza wpływu dodatku wodoru do gazu ziemnego na szczelność połączeń mechanicznych wybranych elementów sieci i instalacji gazowych”, Instytut Nafty i Gazu, Kraków 2020.

REKLAMA



☎ 510 365 202 ✉ biuro@induserwis.pl

## SYSTEMY MOCOWANIA RUR W PRZEMYSŁE

BIURO / DZIAŁ SPRZEDAŻY  
Obrowiec, ul. Krapkowicka 19, 47-320 Gogolin  
Tel./fax: 77/466 68 36, Kom.: 510 365 202, 511 991 093  
Email: biuro@induserwis.pl

DZIAŁ PRODUKCJI / MAGAZYN / DOSTAWY  
47-300 Rogów Opolski  
ul. Ks. Żuga 7  
Kom.: 572 899 823

- DIN3567A
- DN3570A
- DIN1593
- DIN1592
- ślizgi
- podpory
- zawiesia
- siedziska
- obejmy
- uchwyty



### PRODUCENT SYSTEMÓW MOCOWANIA RUR I KABLI

Firma Induserwis s. c. działa na rynku polskim od 2009 roku i łącząc wieloletnie doświadczenie jej założycieli, może zaferować Państwu profesjonalizm i fachowość w doborze systemów zamocowania rur i kabli oraz w zakresie usług, które świadczymy.

[www.induserwis.pl](http://www.induserwis.pl)