



Potencjał magazynowy wodoru w permjskich złożach soli kamiennej w Polsce

Hydrogen storage potential in Permian rock salts in Poland

Leszek LANKOF¹, Radosław TARKOWSKI²

¹ Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN; lankof@min-pan.krakow.pl

² Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN; tarkowski@min-pan.krakow.pl

¹ Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences; lankof@min-pan.krakow.pl

² Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences; tarkowski@min-pan.krakow.pl

ABSTRAKT

W artykule przedstawiono wyniki oceny potencjału podziemnego magazynowania wodoru dla pokładowych i wysadowych permjskich złóż soli kamiennej w Polsce. Przeprowadzono ją w oparciu o metodykę uwzględniającą uwarunkowania górniczo-geologiczne oraz specyficzne właściwości wodoru. Szczególną uwagę zwrócono na parametry, wpływające na ocenę potencjału magazynowania wodoru w kawernach solnych ulokowanych w permjskich pokładowych i wysadowych złożach soli w różnych częściach Polski. Zestawienie wyników oceny potencjału podziemnego magazynowania wodoru w złożach soli kamiennej z wynikami analiz zapotrzebowania na przestrzeń magazynową wskazują, że istniejący potencjał magazynowy wodoru w pokładowych wystąpieniach soli kamiennej i wysadach solnych kilkadziesiąt razy przewyższa zapotrzebowanie, nawet w przypadku założenia systemów energetycznych opartych w przeważającej części na wodorze jako nośniku energii.

Słowa kluczowe: podziemne magazynowanie wodoru, kawerny solne, wysady solne, pokłady soli kamiennej, potencjał magazynowy

WSTĘP

Większość wykorzystywanej dzisiaj energii pochodzi z paliw kopalnych, których zasoby są ograniczone, a ich rozmieszczenie na świecie jest nierównomierne. Nie bez znaczenia jest negatywny wpływ ich spalania na środowisko i klimat. Stąd potrzeba wykorzystania odnawialnych źródeł energii oraz ma-

ABSTRACT

The article presents the results of the assessment of the underground hydrogen storage potential for Permian stratiform salt formations and salt domes in Poland. The research was carried out based on the methodology considering mining and geological conditions and specific properties of hydrogen. Particular attention was paid to the parameters that affect the assessment of the hydrogen storage potential in salt caverns in Permian stratiform rock salts and salt domes, depending on their location. Comparing the assessment results with the demand for storage space shows that the existing hydrogen storage potential in salt caverns in Poland is dozens of times higher than the demand, even in the case of energy systems based mainly on hydrogen as an energy carrier.

Keywords: underground hydrogen storage (UHS), salt caverns, salt domes, stratiform formation, storage potential

INTRODUCTION

Most of the energy used today comes from fossil fuels, which are limited and unevenly occur worldwide. The negative impact of their combustion on the environment and climate is not without significance. Hence the need to use renewable energy sources and store surplus energy. The use of hydrogen as an energy carrier, produced by electrolysis from RES, is currently under consideration. Hydrogen use allows moving away from fossil fuels and toward a CO₂ - neutral economy. Today, hydrogen is one of the most environmentally friendly fuels and the most promising clean energy carrier

gazynowania nadwyżek energii. Wykorzystanie wodoru jako nośnika energii, wyprodukowanego drogą elektrolizy z OZE jest dzisiaj przedmiotem rozważań. Wodór pozwala na odejście od paliw kopalnych oraz na przejście na gospodarkę neutralną pod względem emisji CO₂. Wskazuje się go dziś za jedno z najbardziej przyjaznych dla środowiska paliw, za najbardziej obiecujący nośnik czystej energii (np. Abdin i in., 2020; Osman i in., 2022). Rozważa się różne opcje podziemnego magazynowania wodoru, z których najważniejsze to kawerny wyługowane w złożach soli kamiennych, głębokie struktury wodonośne oraz szcerpane złoża gazu ziemnego (np. Crotofino, Schneider, Evans, 2018; Olabi i in., 2021; Zivar, Kumar, Foroozesh, 2021; Muhammed i in., 2022). Własności soli kamiennych sprzyjają budowaniu w złożach soli kawern dla magazynowania gazów oraz innych substancji. Sól kamienna jest technicznie gazoszczelna oraz obojętna chemicznie względem większości magazynowanych substancji. Jej wytrzymałość oraz własności reologiczne zapewniają stabilność kawern na określonych głębokościach i w odpowiednim reżimie ciśnień magazynowania. Magazyny w kawernach solnych, ze względu na stosunkowo dużą prędkość zatłaczania i poboru magazynowanego gazu, charakteryzują się dużą elastycznością. Mogą spełniać rolę magazynów szczytowych, sezonowych oraz strategicznych. Zakres ciśnienia magazynowego oraz uwarunkowania techniczne zapewniają możliwość zatłoczenia i odebrania gazu w ilości odpowiadającej 10-12 krotności pojemności magazynowej kawerny (np. Kunstman, Poborska-Młynarska, Urbańczyk, 2009; Tarkowski, 2019). Kawerny solne ługowane są do głębokości ok. 2000 m. Osiągają wysokość 50 – 500 m, średnice 50 – 100 m, a objętość do ok. 1 mln m³ (np. Warren, 2006; Horvath i in., 2018; Hévin, 2019).

PODZIEMNE MAGAZYNOWANIE WODORU

Ważnym aspektem podziemnego magazynowania wodoru jest ocena możliwości oraz potencjału magazynowania wodoru, w różnej skali. W przypadku kawern solnych, będzie ona wymagała między innymi przeprowadzenia analizy kształtu, wielkości i ilości kawern, głębokości ich posadowienia, czy wpływu konwergencji na pojemność kawern (np. Bérest i in., 2015; Ślizowski i in., 2017; Wang i in., 2019). Nieliczne są przykłady publikacji, gdzie przedstawiono wartości pojemności wodoru dla kawern wyługowanych w złożach soli oraz prezentujących metodyczne podejście do oceny potencjału podziemnego magazynowania wodoru w kawernach solnych (Simon i in., 2015; Evans, Shaw, 2018; Juez-Larré i in., 2019; Caglayan i in. 2020; Evans, Shaw, 2021; Williams i in., 2022). Stąd wynikają różne, dyskusyjne często wyniki oszacowań, prowadzone w różnej skali: regionalnej, danego kraju, czy też konkretnej lokalizacji. Publikacja prezentująca teoretyczny potencjał kawern solnych do magazynowania wodoru w Europie (Caglayan i in., 2020) jest jedną z ważniejszych w tym

(e.g. Abdin et al., 2020; Osman et al., 2022). Various options for underground hydrogen storage are being considered, the most important of which are rock salt caverns, deep aquifers, and depleted natural gas deposits (e.g. Crotofino et al., 2018; Olabi et al., 2021; Zivar et al., 2021; Muhammed et al., 2022). The properties of rock salt favor the construction of caverns in the salt deposits to store gases and other substances. Rock salt is technically gas-tight and chemically neutral to most stored substances. Its strength and rheological properties ensure the stability of caverns at specific depths and in an appropriate storage pressure regime.

Because of the relatively high injection and withdrawal rate, storage facilities in salt caverns are characterized by high flexibility. They can be used as peak, seasonal and strategic storage facilities. The range of storage pressure and technical conditions ensure the possibility of injecting and withdrawing hydrogen in an amount corresponding to 10-12 times the storage capacity of the cavern (e.g. Kunstman et al., 2009; Tarkowski, 2019). The salt caverns are constructed to a depth of 2000 m. They reach a height of 50 – 500 m, diameters of 50 – 100 m, and a volume of up to 1 million cubic meters (e.g. Warren, 2006; Horvath et al., 2018; Hévin, 2019).

UNDERGROUND HYDROGEN STORAGE

An important aspect of underground hydrogen storage is assessing hydrogen storage potential on a different scale. In the case of salt caverns, it will require, among others, an analysis of the shape, size, and number of caverns, the depth of their foundation, or the impact of convergence on cavern capacity (e.g. Bérest et al., 2015; Ślizowski et al., 2017; Wang et al., 2019). A few examples of publications discuss the capacity of hydrogen storage caverns and a methodological approach assessing the potential of underground hydrogen storage in salt caverns (Simon et al., 2015; Evans, Shaw, 2021; Juez-Larré et al., 2019; Caglayan et al. 2020; Williams et al., 2022). Hence, different, often controversial, estimates result, carried out on a different scale: regional, country, or a specific location. The publication presenting the theoretical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe (Caglayan et al., 2020) is one of the most important in this regard. The research results presented in this article estimate the storage potential of rock salt deposits in Europe (both onshore and offshore) at 84.8 PWhH₂. The most significant potential was indicated for the area of Germany, approx. 12.5 PWhH₂. In the case of Poland, it was estimated at around 7 PWhH₂.

The hydrogen storage issue in Polish rock salt deposits has been discussed in many publications. The economic aspects of hydrogen storage in salt caverns are discussed by Kunstman and Urbańczyk (Kunstman and Urbańczyk, 2013). The concept of storing electricity excess in the form of hydrogen in caverns in salt deposits in Poland was presented by Chro-

zakresie. Wyniki badań przedstawione w tym artykule oceniają potencjał magazynowy złóż soli w Europie (zarówno na lądzie i morzu) na 84,8 PWhH₂. Największy potencjał wskazano dla obszaru Niemiec ok. 12,5 PWhH₂. W przypadku Polski oceniono go na około 7 PWhH₂.

Problematyka magazynowania wodoru w soli kamiennej w Polsce poruszana była w licznych publikacjach. Aspekty ekonomiczne magazynowania wodoru w kawernach solnych zostały omówione w pracy Kunstmana i Urbańczyka (Kunstman, Urbańczyk, 2013). Koncepcję magazynowania nadwyżek energii elektrycznej w postaci wodoru w kawernach solnych w Polsce przedstawił Chromik (Chromik, 2015, 2016). Dalsze, bardziej szczegółowe badania prezentowały wybrane aspekty termodynamiczne magazynowania wodoru w kawernach solnych (Urbańczyk, 2016), badania szczelności soli kamiennej w aspekcie magazynowania wodoru (Ślizowski i in., 2017) oraz badania pojemności kawern magazynowych dla gazu ziemnego i wodoru, dla pokładowych złóż soli kamiennej w północnej Polsce (Ślizowski i in., 2017). Tarkowski i Czapowski (Czapowski, Tarkowski, 2018, 2019; Tarkowski, Czapowski, 2018) jako najbardziej obiecujące do podziemnego magazynowania wodoru zaproponowali siedem niezagospodarowanych wysadów solnych w Polsce oraz dokonali oceny geologicznych możliwości lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowych wystąpieniach soli kamiennych górnego permu w Polsce. Przeprowadzono również badania dotyczące modelowania kształtu i optymalizacji objętości kawern solnych do magazynowania energii (Cyran, Kowalski, 2021). W najnowszych pracach (Lankof, Tarkowski, 2020; Lankof i in., 2022) została przeprowadzona ocena potencjału podziemnego magazynowania wodoru dla pokładowych wystąpień soli na monoklinie przedsudeckiej oraz w wysadach solnych.

CEL BADAŃ

Problemem badawczym prezentowanym w artykule jest pojemność magazynowa wodoru dla kawern wyługowanych w permskich wystąpieniach pokładowych oraz wysadach solnych w Polsce. Celem rozważań jest pokazanie szacunkowych wielkości pojemności magazynowania wodoru jakie oferują kawerny solne w różnych typach struktur solnych, w odniesieniu do zapotrzebowania i pokazanie istotności wpływu rozważanych parametrów geologicznych dla oceny pojemności magazynowej. Wyniki takich analiz są ważne w dyskusji dotyczącej celowości i możliwości podziemnego magazynowania wodoru w Polsce.

1. GEOLOGIA PERMSKICH WYSTĄPIEŃ SOLI KAMIENNEJ W POLSCE W ASPEKcie PODZIEMNEGO MAGAZYNOWANIA

Permskie złoża soli kamiennej w Polsce związane są z cechsztyńską formacją solonośną, uformowaną w obrębie basenu permskiego, rozciągającego się od Wielkiej Brytanii

mik (Chromik, 2015, 2016). Further, more detailed research discussed selected thermodynamic aspects of hydrogen storage in salt caverns (Urbańczyk, 2016), rock salt tightness tests in terms of hydrogen storage (Ślizowski, Smulski, et al., 2017) and the capacity of storage caverns for natural gas and hydrogen, for stratiform rock salt in North Poland (Ślizowski, Urbańczyk, et al., 2017). Tarkowski and Czapowski (Czapowski and Tarkowski, 2018, 2019; Tarkowski and Czapowski, 2018) as the most promising for underground hydrogen storage, proposed seven undeveloped salt domes in Poland and assessed the geological possibilities of siting hydrogen storage caverns in stratiform rock salts of Upper Permian in Poland. Research on shape modeling and volume optimization of salt caverns for energy storage was also carried out by (Cyran and Kowalski, 2021). The latest studies (Lankof and Tarkowski, 2020; Lankof et al., 2022) assessed the underground hydrogen storage potential for stratiform rock salts in the Fore-Sudetic Monocline and selected salt domes.

PURPOSE OF RESEARCH

The research problem presented in the article is the hydrogen storage capacity for caverns leached in Permian rock salt deposits in Poland. The considerations aim is to show the estimated values of the hydrogen storage capacity offered by salt caverns in various types of salt structures versus the demand for hydrogen storage capacities in the future. Additionally, the paper aims to show the significance of the influence of the considered geological parameters for assessing storage capacity. The results of such analyzes are important in the discussion on the validity and possibility of underground hydrogen storage in Poland.

1. GEOLOGY OF PERMIAN ROCK SALT IN POLAND IN TERMS OF UNDERGROUND STORAGE

Permian rock salt deposits in Poland are associated with the Zechstein salt formation, formed within the Permian Basin, stretching from Great Britain through the North Sea, the Netherlands, Denmark, and Germany to Poland and Lithuania (Poborski, 1976; Wagner, Peryt 1976; Gillhaus et al. in. 2006). This formation covers over half of the territory of Poland. In most of the Polish part of the Zechstein Basin, the salt formation is deposited horizontally at depths of 5 - 7 km. At lower depths, salt formation occurs as salt structures, such as salt domes or salt pillows (Poborski, 1976; Ślizowski, 1983; Czapowski, 2019), while in the marginal parts of the sedimentation basin in the form of stratiform deposits. The salt-bearing Zechstein formation is formed by an alternating set of evaporite (rock salts, potassium-magnesium salts, sulphates) and non-evaporite (carbonates and clastic rocks) formations representing 4 cyclothems (Wagner and Peryt, 1997).

przez Morze Północne, Holandię, Danię Niemcy aż po Polskę i Litwę (Poborski, 1976; Wagner, Peryt 1976; Gillhaus i in. 2006). Formacja ta pokrywa ponad połowę powierzchni Polski. Na przeważającym obszarze polskiej części basenu cechsztyńskiego, seria solna zalega w normalnym ułożeniu, na głębokościach dochodzących do ok. 5 – 7 km. Na mniejszych głębokościach utwory solone budują szereg struktur solnych, takich jak wysady czy poduszki solne (Poborski, 1976; Ślizowski, 1983; Czapowski, 2019), natomiast w brzeżnych częściach basenu sedymentacyjnego występują w formie pokładowej. Solonością formację cechsztyńską tworzy naprzemianległy zespół utworów ewaporatowych (sole kamienne, sole potasowo-magnezowe, siarczany) i nieewaporatowych, (węglany, i skały klastyczne) reprezentujących 4 cyklotemy (Wagner, Peryt, 1997).

1.1. Pokładowe wystąpienia soli kamiennej

Pokładowe złoża soli górnego permu w Polsce, występują w północnej części polskiego basenu cechsztyńskiego oraz na monoklinie przedsudeckiej. W Polsce północnej, sól kamienna występuje w postaci jednego pokładu wydzielenia najstarszej soli kamiennej (Na1). Strop soli kamiennej zalega na głębokości od 550 m p.p.t. w okolicach Łeby do ponad 1100 m p.p.t. w południowej części tego rejonu. Miąższość pokładu jest zróżnicowana i wynosi od kilku do ponad 220 m (Czapowski, 2019).

Na monoklinie przedsudeckiej, sól kamienna występuje w postaci trzech wydzieleni litostratygraficznych (Na1, Na2, Na3), uformowanych w trzech cyklotemach. Miąższość pokładów soli jest bardzo zróżnicowana i sięga od kilku do stu kilkudziesięciu metrów w północnej części, lokalnie przekraczając 300 m. Strop pokładu najstarszej soli kamiennej (Na1), o największym potencjale magazynowym, zalega na głębokości od ok. 700 m p.p.t. do ponad 2000 m p.p.t. i zapada łagodnie w kierunku NE (Wagner, 1994; Garlicki i in., 1996; Deczkowski, Gajewska, 1997).

1.2. Wysadowe struktury solne

W centralnej części polskiego basenu cechsztyńskiego występują liczne wyniesione struktury solne, w postaci poduszek i wysadów solnych, często wydłużonych w kierunku NW-SE. Wśród tych struktur występują wysady solne przebijające częściowo lub całkowicie nadkład skał mezozoicznych. Przedmiotem rozważań są niezagospodarowane wysady solne środkowej Polski: Damasławek, Dębina, Kłodawa (poza obszarem górniczym Kopalni Soli Kłodawa), Izbica Kujawska, Lubień, Łanięta i Rogoźno. Zwierciadło solne w analizowanych wysadach zalega na zróżnicowanych głębokościach od ok. 170 do 550 m p.p.t. Powierzchnia tych wysadów wynosi od 0,5 km² (wysad Dębina) do 21 km² (wysad Rogoźno) (Czapowski, Tarkowski, 2018; Tarkowski, Czapowski, 2018). Na ryc. 1 przedstawiono występowanie ana-

1.1. Stratiform rock salt

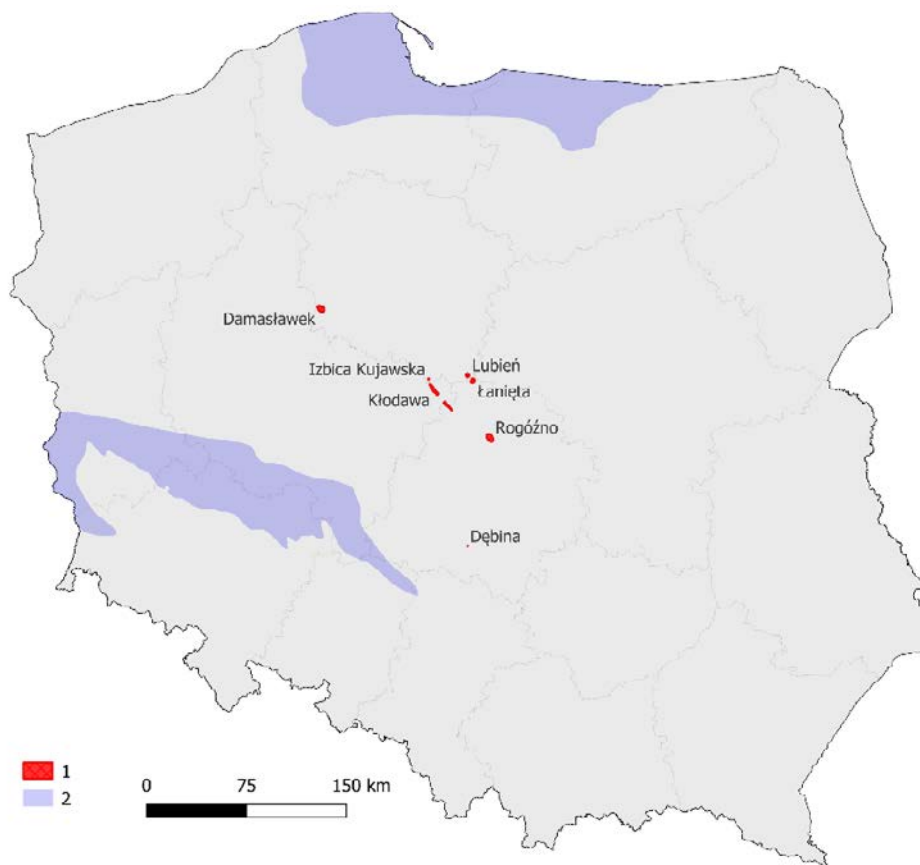
The Upper Permian stratiform rock salts in Poland occur in the northern part of the Polish Zechstein Basin and the Fore-Sudetic Monocline. In North Poland, rock salt occurs in the form of one unit of the Oldest Halite (Na1). The rock salt seam top occurs at a depth of 550 m below ground level (bgl) in the vicinity of Łeba to over 1100 m bgl in the southern part of this area. The Oldest Halite thickness varies and ranges from a few to around 220 m (Czapowski, 2019). In the Fore-Sudetic Monocline, rock salt occurs in the form of three units (Na1, Na2, Na3), formed in three following cyclothems. The salt beds' thickness varies and ranges from a few to a hundred and several dozen meters in the northern part, locally exceeding 300 m. The top of the Oldest Halite (Na1) seam, with the most outstanding storage potential, occurs at a depth of 700 m bgl up to over 2000 m bgl and dips gently towards NE. (Wagner, 1994; Garlicki et al., 1996; Deczkowski and Gajewska, 1997).

1.2. Salt domes

In the central part of the Polish Zechstein Basin, there are numerous elevated salt structures in the form of salt pillows and salt domes, often extended NW-SE. Some of these structures entirely or partially pierce the Mesozoic rocks. The subject of consideration is the undeveloped salt domes of central Poland: Damasławek, Dębina, Kłodawa (outside the mining area of the Kłodawa Salt Mine), Izbica Kujawska, Lubień, Łanięta, and Rogoźno. The salt mirrors (top of the rock salt) in the analyzed domes occur at different depths, from 170 to 550 m bgl. The surface areas of these salt domes ranges from 0.5 km² (Dębina dome) to 21 km² (Rogoźno dome) (Czapowski and Tarkowski, 2018a; Tarkowski and Czapowski, 2018). Fig. 1 shows the occurrence of the salt dome analyzed in the article and the approximate range of stratiform rock salts, the top of which is up to a depth of 1800 m bgl.

2. METHODOLOGY FOR ASSESSING HYDROGEN STORAGE CAPACITY IN ROCK SALT DEPOSITS

Estimating the hydrogen storage potential in rock salt deposits requires determining the shape and dimensions of salt caverns, determining the storage pressure, and considering the convergence of caverns resulting from the rheological properties of rock salt. While these parameters are determined similarly in the case of stratiform rock salts and salt domes, estimating their capacity requires a different approach. In the case of stratiform rock salts, structural (top) and seam thickness maps were used to develop maps of hydrogen storage capacity. In the case of salt domes, the average cavern size and the average cavern depth were determined, resulting from the statistical analysis of the depth and cavern dimensions of Underground Gas Storage (UGS) Mogilno and the geological structure of individual salt domes.



Ryc. 1. Lokalizacja wysadowych i pokładowych wystąpień soli kamiennej analizowanych pod kątem potencjału magazynowego wodoru (1 – wysady solne, 2 – pokłady solne występujące do głębokości 1800 m p.p.t.).

Fig. 1. Location of salt domes and stratiform rock salts analyzed in terms of the hydrogen storage potential (1 - salt domes, 2 - stratiform rock salt formations to a depth of 1800 m bgl).

lizowanych w artykule wysadów solnych oraz przybliżony zasięg pokładów soli kamiennej, których strop występuje do głębokości 1800 m p.p.t.

2. METODYKA OCENY POJEMNOŚCI MAGAZYNOWEJ WODORU W ZŁOŻACH SOLI KAMIENNEJ

Oszacowanie potencjału magazynowego wodoru w złożach soli kamiennej wymaga określenia kształtu i wymiarów kawern solnych, określenia ciśnienia magazynowania oraz uwzględnienia konwergencji kawern, wynikającej z właściwości reologicznych soli kamiennej. O ile te parametry określa się podobnie w przypadku pokładowych i wysadowych złóż soli kamiennej, to metody szacowania pojemności wymagają opracowania odrębnego podejścia. W przypadku pokładowych złóż soli kamiennej, w celu opracowania map pojemności magazynowej wodoru wykorzystano mapy strukturalne (stropu) i miąższości pokładu. W przypadku wysadów solnych zostały wyznaczone średnie wielkości kawern oraz średnie głębokości posadowienia kawern, wynikające z analizy statystycznej głębokości i wielkości kawern istniejącego Kawerowego Podziemnego Magazynu Gazu (KPMG) Mogilno oraz budowy geologicznej poszczególnych wysadów.

2.1. Estimation of the hydrogen storage potential in stratiform rock salt

The assessment of the underground hydrogen storage potential in the stratiform rock salt consisted in determining its storage capacity depending on the volume and spacing of caverns and the range of storage pressure versus the area of surface assigned to one cavern. The storage potential of the rock seam was thus presented in the form of the storage capacity of a single salt cavern, converted to the area assigned to this cavern. In estimations, a typical design was adopted, assuming the main cavern's part as a cylinder with the target diameter D_{max} , a conical sump with a height of about $1/6 D_{max}$, and the cavern dome as a cone with a height of about $1/3 D_{max}$. In addition, the calculations of the cavern storage capacity took into account such parameters as the thickness of protective rock salt left over and below a salt cavern, cavern neck length, maximum diameter, cavern spacing, storage pressures, and the impact of convergence. The values of the parameters and methods of their determination are presented in the publications (Lankof and Tarkowski, 2020; Lankof et al., 2022).

The methodology used allowed for developing maps of hydrogen storage capacity in rock salt seams. When constructing the maps, the minimum thickness of the seam, in

2.1. Oszacowanie zdolności magazynowania wodoru w pokładach soli kamiennnej

Ocena potencjału podziemnego magazynowania wodoru w pokładzie soli kamiennnej polegała na określeniu jego pojemności magazynowej, zależnej od objętości i rozstawu kawern oraz zakresu ciśnienia magazynowania, w stosunku do powierzchni terenu przypisanego do jednej kawerny. Potencjał magazynowy pokładu soli kamiennnej został zatem przedstawiony w postaci pojemności magazynowej pojedynczej kawerny solnej, w przeliczeniu na powierzchnię przypisaną do tej kawerny. W celu obliczenia pojemności magazynowej pojedynczej kawerny solnej przyjęto typowy projekt kawerny magazynowej zakładający, że główną część kawerny stanowi walec o średnicy docelowej D_{max} , dolną część kawerny zajmuje stożkowy wręb, o wysokości ok. $1/6 D_{max}$, a górną część kawerny zajmuje kupa, którą można przybliżyć stożkiem o wysokości ok. $1/3 D_{max}$. Ponadto w obliczeniach pojemności magazynowej kawerny uwzględniono takie parametry jak: wymiary filarów ochronnych, długość szyi kawerny, maksymalną średnicę, rozstaw kawern, wartości ciśnień magazynowania, oraz wpływ konwergencji. Wartości parametrów i metody ich wyznaczania przedstawiono w pracach (Lankof, Tarkowski, 2020; Lankof i in. 2022).

Zastosowana metodyka pozwoliła na opracowanie map pojemności magazynowej wodoru w pokładach soli kamiennnej. Przy konstrukcji map, za minimalną miąższość pokładu, w którym opłacalna jest budowa kawern przyjęto 150 m. Jako maksymalną głębokość stropu pokładu soli przyjęto 1800 m p.p.t. Za punkt wyjścia do sporządzenia map pojemności magazynowej wodoru przyjęto rastrowe mapy głębokości stropu pokładu soli oraz jego miąższości. Stosując wbudowane funkcje programu Surfer, przeprowadzono obliczenia pojemności magazynowej w każdym z punktów poszczególnych rastrów. W wyniku obliczeń otrzymano raster pojemności magazynowej wodoru obrazujący ilość zmagazynowanego wodoru w przeliczeniu na powierzchnię.

2.2. Oszacowanie pojemności magazynowej wysadów solnych

Kawerny magazynowe w złożach soli kamiennnej lokalizowane są najczęściej w przedziale głębokości 500 – 1800 m p.p.t. (Horvath i in., 2018). Biorąc pod uwagę skomplikowaną budowę geologiczną wysadów i występowanie w nich warstw soli potasowych oraz anhydrytu, analizie poddano te niezagospodarowane wysady, których zwierciadło solne nie zalega głębiej niż 1500 m p.p.t. Przyjęte kryterium głębokości lokalizacji kawern pozwala na zastosowanie prezentowanej metodyki oceny pojemności magazynowej do struktur wysadowych przedstawionych w tabeli 1.

which the construction of caverns is profitable, was assumed to be 150 m. The depth of 1800 m bgl was assumed as the maximum depth of the salt seam top. Raster maps of the salt bed top's depth and thickness were adopted as the starting point for developing maps of hydrogen storage capacity. Using the built-in functions of the Surfer program, calculations of the storage capacity were carried out at each point of the individual rasters. As a result of the calculations, a raster of hydrogen storage capacity was obtained, showing the amount of stored hydrogen per area.

2.2. Estimation of the storage capacity of salt domes

Storage caverns in rock salt domes are often located in the depth range of 500 - 1800 m below sea level. (Horvath et al., 2018). The article examines those undeveloped salt domes where the salt mirror does not lie deeper than 1500 m bgl, considering their complicated geological structure of salt domes and the presence of potassium salt and anhydrite layers. The adopted criterion of cavern location depth allows the application of the presented methodology for assessing storage capacity to the dome structures shown in Table 1.

Table 1. Zechstein salt domes selected for the assessment of hydrogen storage capacity

Salt dome	Surface area [km ²]	Salt mirror depth [m p.p.t.]
Damasławek	13,0	446,0 – 497,0
Dębina	0,5	169,3 – 215,0
Izbica	4,0	327,7 – 354,5
Kłodawa (excluding mininig area)	21,0	227,5 – 532,2
Lubień	5,9	303,0 – 441,6
Łanięta	9,5	235,4 – 303,8
Rogóżno	21,0	320,9 – 372,8

The storage potential of the selected salt domes in Poland was assessed based on the data from the UGS Mogilno. It included:

- the statistical analysis aimed at determining the probability of siting hydrogen storage cavern at a given depth and with a specific volume in the Mogilno salt dome,
- generalization of the coefficients determining the expected values (depths and volumes of caverns) for the remaining salt domes,
- calculations of the capacity of selected salt domes in Poland based on the methodology presented in the paper (Lankof et al., 2022).

Tabela 1. Cechsztyńskie wysady solne wybrane do oceny pojemności magazynowej wodoru.

Nazwa	Powierzchnia wysadu [km ²]	Głębokość zwierciadła solnego [m p.p.t.]
Damaśławek	13,0	446,0 – 497,0
Dębina	0,5	169,3 – 215,0
Izbica	4,0	327,7 – 354,5
Kłodawa (poza Kopalnią)	21,0	227,5 – 532,2
Lubień	5,9	303,0 – 441,6
Łanięta	9,5	235,4 – 303,8
Rogóżno	21,0	320,9 – 372,8

Ocena potencjału magazynowego wytypowanych wysadów solnych w Polsce została przeprowadzona w oparciu o istniejące dane z KPMG Mogilno. Obejmowała ona:

- analizę statystyczną mającą na celu wyznaczenie prawdopodobieństwa wyługowania kawerny magazynowej wodoru na danej głębokości oraz o określonej objętości w wysadzie solnym Mogilno,
- uogólnienie współczynników określających wartości oczekiwane (głębokości i objętości kawern) na pozostałe wysady solne,
- obliczenia pojemności wybranych wysadów w Polsce na podstawie wcześniej przedstawionej metodyki (Lankof i in., 2022).

3. POJEMNOŚĆ MAGAZYNOWA POKŁADÓW SOLI KAMIENNEJ

3.1. Monoklina przedsudecka

Wyniki przeprowadzonych obliczeń zostały przedstawione na mapach pojemności magazynowej wodoru oraz na mapach pochodnych – wartości opałowych i wartości ener-

3. STRATIFORM ROCK SALT STORAGE CAPACITY

3.1. Fore-Sudetic Monocline

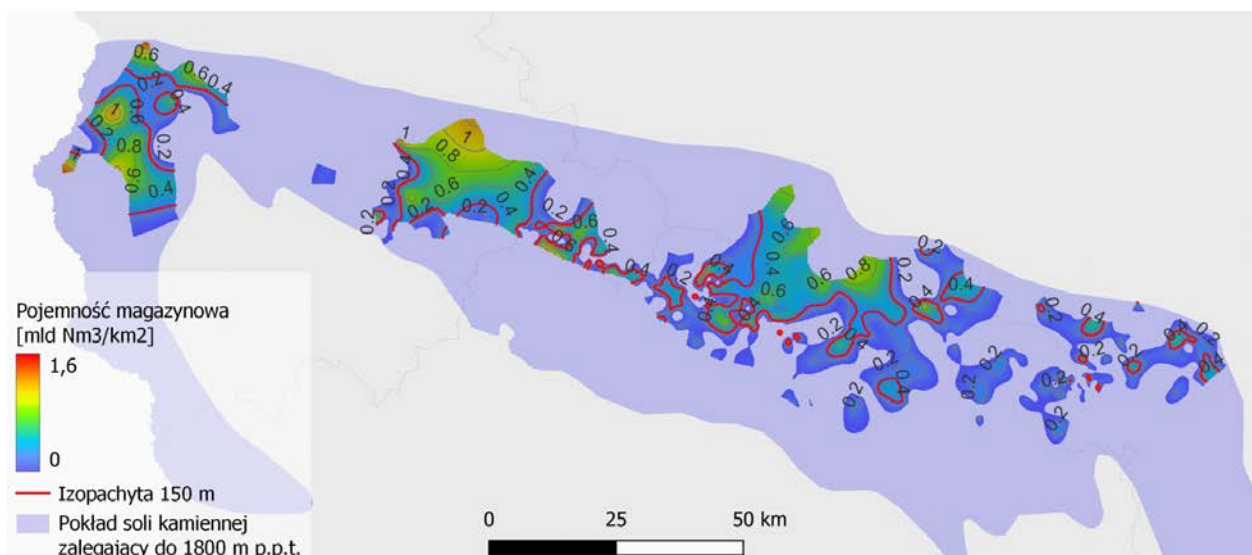
The results of the calculations were presented on the maps of the storage capacity of hydrogen and the derived map of energy values of the stored hydrogen in the Oldest Halite (Na1). The analysis of structural and the depth of rock salt top maps of cyclothem (PZ1, PZ2, PZ3) confirmed that in cyclothem PZ1, there is the most promising rock salt seam that thickness exceeds 150 m up to the top depth not exceeding 1800 m bgl. Therefore, maps of hydrogen storage capacity were presented only for the Oldest Halite (Na1) seam. (Fig. 2).

Based on the rasters of the initial hydrogen storage capacity, the energy value of the stored hydrogen was calculated, assuming the energy value of hydrogen of 3 kWh per cubic meter to determine the energy potential of the stored hydrogen. Calculations allowed for the presentation of a map of the energy value of hydrogen stored within the seam of the Oldest Halite (Na1) expressed in TWh / km² (Fig. 3).

The analysis of the unique values of the raster of the energy value of the stored hydrogen shows that the total storage potential of the analyzed area, with a rock salt thickness of more than 150 m, may reach approximately 2300 TWh.

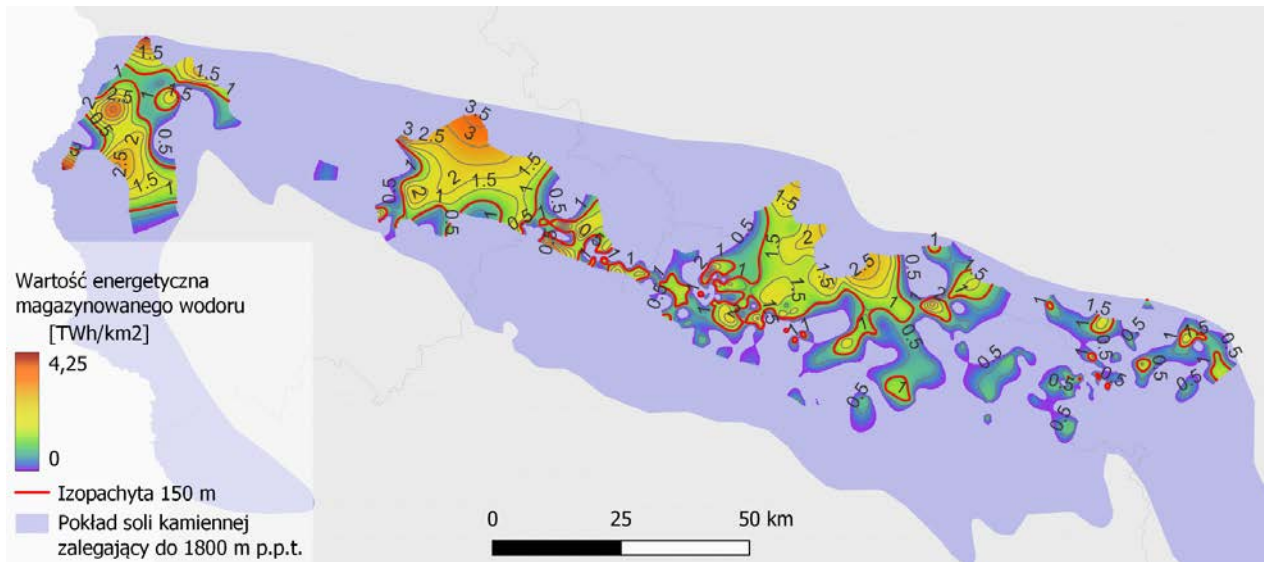
3.2. Leba Elevation

Based on the research by (Ślizowski et al., 2017) aimed at a comparative analysis of the storage capacity of hydrogen and natural gas in the rock salt seam within the best-explored fragment of the rock salt in North Poland, maps of the storage capacity and energy value of stored hydrogen were developed (Fig. 4, Fig. 5). Because of the convergence, the determined values concerned the state of cavern capacity after 15 years of cavern exploitation.



Ryc. 2. Mapa pojemności magazynowej wodoru dla pokładu najstarszej soli kamiennej (Na1) na monoklinie przedsudeckiej.

Fig. 2. The hydrogen storage capacity map in the Oldest Halite seam (Na1) the Fore-Sudetic Monocline.



Ryc. 3. Mapa wartości energetycznej wodoru dla pokładu najstarszej soli kamiennej (Na1) na monoklinie przedsudeckiej.

Fig. 3. The energy value map of hydrogen stored in the Oldest Halite seam (Na1) the Fore-Sudetic Monocline.

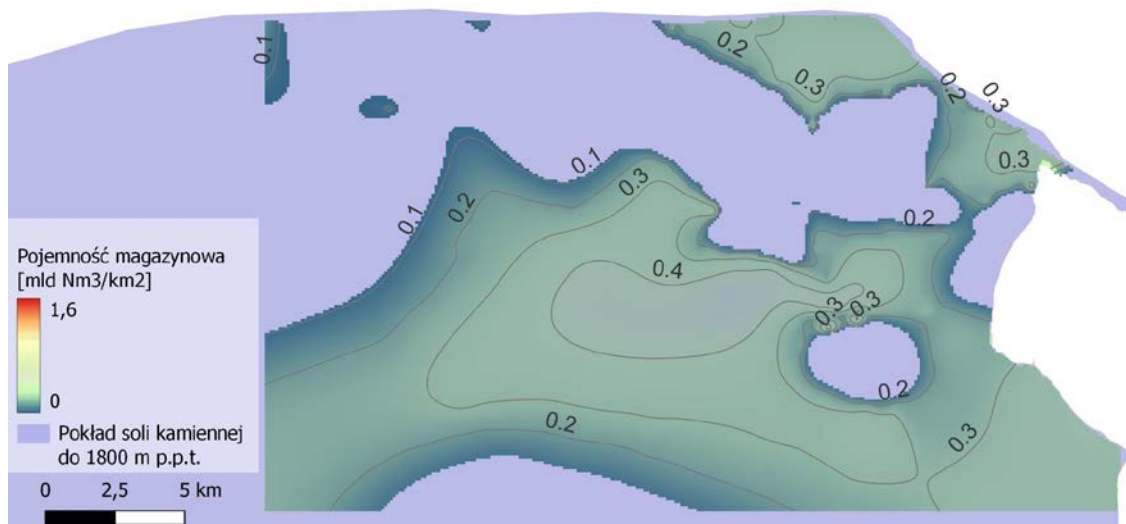
getycznych zmagazynowanego wodoru w najstarszej soli kamiennej (Na1). Przeprowadzona analiza map strukturalnych oraz map głębokości zalegania stropu warstw soli kamiennej, reprezentujących poszczególne cyklotemy (PZ1, PZ2, PZ3), potwierdziła, że w obrębie cyklotemu PZ1 występują największe obszary, gdzie miąższość pokładu soli kamiennej przekracza przyjętą w analizie wartość 150 m do głębokości stropu nie przekraczającego wartości 1800 m p.p.t. W związku z tym, tylko dla pokładu najstarszej soli kamiennej (Na1) przedstawiono mapy pojemności magazynowej wodoru (ryc. 2).

W celu określenia potencjału energetycznego zmagazynowanego wodoru, na podstawie rastrów początkowej pojemności magazynowej wodoru, obliczono wartość energetyczną zmagazynowanego wodoru, przyjmując wartość energetyczną wodoru na poziomie 3 kWh/m^3 . Pozwoliło to na przedstawienie mapy wartości energetycznej wodoru zmagazyno-

The calculations show that the maximum amount of energy stored in the case of hydrogen is about 1.2 TWh/km^2 , corresponding to a value of over 400 million Nm^3/km^2 . The analysis of the unique values of the raster shows that the total storage potential of the analyzed area (after 15 years of cavern exploitation) is approximately 250 TWh.

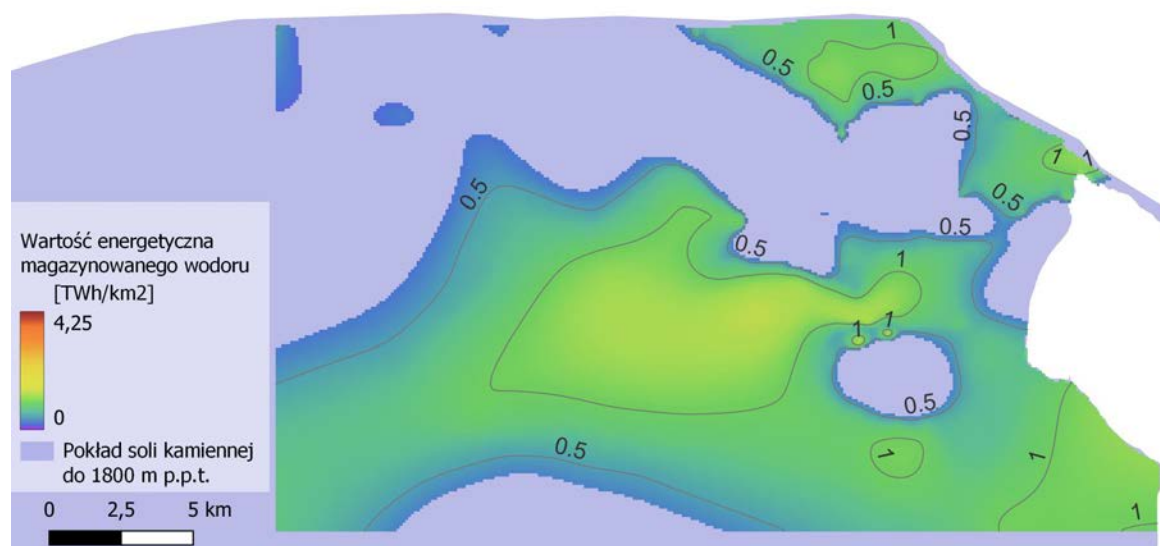
4. SALT DOMES STORAGE CAPACITY

The storage capacity of salt domes was presented in the form of stored hydrogen energy (TWh). The calculations were based on the assumption presented in the methodology (Lankof et al., 2022). When calculating the storage capacity, a linear temperature increase in the rock mass and a pessimistic variant of convergence were adopted, determined based on experiments and calculations conducted by (Ślizowski et al., 2011).



Ryc. 4. Mapa pojemności magazynowej wodoru w pokładzie najstarszej soli kamiennej (Na1) w rejonie Zatoki Gdańskiej.

Fig. 4. The hydrogen storage capacity map in the Oldest Halite seam (Na1) Gdansk Bay region.



Ryc. 5. Mapa wartości energetycznej wodoru dla fragmentu pokładu najstarszej soli kamiennej (Na1) w rejonie Zatoki Gdańskiej.
Fig. 5. The energy value map of hydrogen stored in the Oldest Halite seam (Na1) Gdańsk Bay region.

wanej w obrębie pokładu najstarszej soli kamiennej (Na1) wyrażonej w TWh/km² (ryc. 3).

Analiza wartości unikalnych rastra pojemności magazynowej w postaci wartości energetycznej zmagazynowanego wodoru wskazuje, że całkowity potencjał magazynowy analizowanego obszaru wynosi około 2300 TWh.

3.2. Wyniesienie Łeby

Na podstawie przeprowadzonych w 2017 r. prac (Ślizowski i in., 2017), mających na celu analizę porównawczą pojemności magazynowej wodoru i gazu ziemnego w pokładzie soli kamiennej w obrębie najlepiej rozpoznanego fragmentu pokładu soli kamiennej, opracowano mapy pojemności magazynowej oraz energetycznej zmagazynowanego wodoru w przeliczeniu na jednostkę powierzchni (ryc. 4 i 5). Ze względu na konwergencję wyznaczone wartości dotyczyły stanu pojemności kawern po 15 latach eksploatacji kawerny.

Table 2 shows the average volumes and depths of caverns resulting from the statistical analysis, the calculation results covering the average capacity of individual caverns in each analyzed salt dome, and the average storage capacity of the dome expressed in TWh.

The projected capacity of each salt dome was converted into the energy of stored hydrogen in TWh. Fig. 6 shows the changes in salt domes' average storage capacity, expressed as the energy of stored hydrogen over 30 years from the first filling.

The analysis shows that the Rogóżno salt dome has the most significant storage capacity (from 34.27 TWh after the first filling to 24.94 TWh after 30 years. These values are because of the dome's large size and the cavern's depth, ensuring moderate cavern convergence. In the case of the Kłodawa salt dome with a similar area as the Rogóżno dome, we can observe a much lower storage capacity (from 22.98 TWh af-

Tabela 2. Rezultaty obliczeń pojemności magazynowej analizowanych wysadów.

Wysad	Objętość średnia kawerny [tys.m ³]	Głębokość średnia [m p.p.t.]	Pojemność średnia kawerny [tys. Nm ³]	Pojemność średnia wysadu [TWh]w czasie [lata]		
				0	15	30
Mogilno	354,0	1161	32 300,9	13.4	12.28	11.29
Damaśławek	295,5	1409	27 619,8	25.20	20.73	17.05
Kłodawa	263,9	1705	19 797,3	22.98	14.34	8.95
Izbica Kujawska	450,5	1200	43 801,4	9.59	8.36	7.29
Lubień	409,1	1200	39 776,1	13.01	11.34	9.89
Łanięta	370,1	1200	35 984,2	18.89	16.47	14.36
Rogóżno	302,3	1345	29 522,0	34.27	29.24	24.94
Dębina	673,5	1200	65 483,3	1.77	1.54	1.34

Jak wynika z obliczeń maksymalna ilość energii, jaką można zmagazynować w przypadku wodoru wynosi ok. 1,2 TWh/km², co odpowiada wartości ponad 400 mln Nm³/km². Analiza wartości unikalnych rastra wskazuje, że całkowity potencjał magazynowy analizowanego obszaru (po 15 latach eksploatacji kawern) wynosi około 250 TWh.

4. POJEMNOŚĆ MAGAZYNOWA WYSADÓW SOLNYCH

Potencjał magazynowy wysadów solnych został przedstawiony w postaci energii zmagazynowanego wodoru (TWh). W obliczeniach przyjęto założenie przedstawione w metodycie (Lankof i in. 2022). Przy obliczeniach potencjału magazynowego przyjęto liniowy przyrost temperatury w górotworze oraz pesymistyczny wariant konwergencji określony na podstawie eksperymentów i obliczeń prowadzonych przez (Ślizowski i in., 2011).

W tabeli 2 przedstawiono średnie objętości i głębokości posadowienia kawern wynikające z analizy statystycznej oraz wyniki obliczeń, obejmujące średnią pojemność pojedynczych kawern w poszczególnych wysadach oraz średnią pojemność magazynową wysadów wyrażoną w TWh.

Prognozowana pojemność poszczególnych wysadów została przeliczona na energię zmagazynowanego wodoru w TWh. Na ryc. 6 przedstawiono zmiany średniej zdolności magazynowej wysadów wyrażoną w postaci energii zmagazynowanego wodoru na przestrzeni 30 lat od pierwszego napełniania.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że największą zdolność magazynową osiąga wysad solny Rogóżna (od 34,27 TWh po pierwszym napełnianiu do 24,94 TWh po 30 latach). Wynika to zarówno z dużych rozmiarów wysadu jak również głębokości posadowienia kawerny zapewniającej umiarkowaną konwergencję kawern. W przypadku części wysadu Kłodawy, o podobnej powierzchni jak wysad Rogóżno, obserwujemy znacznie mniejszą zdolność magazynową (od 22,98 TWh po pierwszym napełnianiu do zaledwie 9,95 TWh

ter the first filling to only 9.95 TWh after 30 years) which is caused by the deeper location of salt caverns. Fig. 7 shows the forecast of the total storage capacity of the analyzed salt domes over time.

According to the forecast, the total storage capacity in individual years ranges from 125.7 TWh after the first filling to 83.8 TWh after 30 years of caverns exploitation.

5. ROCK SALT STORAGE POTENTIAL IN TERMS OF HYDROGEN DEMAND

Research carried out under the EU Hystories grant for underground hydrogen storage included, i.a., an estimation of the demand for hydrogen storage capacities in the European Union countries. The demand was identified in eight scenarios, considering different configurations of hydrogen energy systems. Research indicates that in the case of Poland, the expected storage space will have to ensure hydrogen storage with an energy value of 2.2 to 55.5 depending on the accepted scenario TWh per year (Michalski et al., 2021).

The results of the research indicated that the storage potential of the analyzed stratiform rock salts should be estimated at 2550 TWh and the analyzed salt domes at about 125 TWh after the first filling. Moreover, it should be remembered that the average salt cavern can be filled and emptied 10-12 times a year. Assuming that most of the underground hydrogen storage facilities will be used as the peak demand facilities, it can be assumed that the annual storage potential of the analyzed salt domes may be about ten times higher. The values shown indicate that the existing potential disproportionately exceeds the demand for storage space even in the scenario assuming the highest share of hydrogen in the future energy system. The demand for storage capacity can be shown in the form of the number of caverns covering this demand, knowing the values of the average cavern capacity in individual salt domes resulting from the presented esti-

Table 2. Results of calculations of the storage capacity of the analyzed salt domes.

Salt dome	Cavern's average volume [thousand m ³]	Cavern's average depth [m bgl]	Cavern's average capacity [thousand Nm ³]	Salt dome's average capacity [TWh] in time [years]		
				0	15	30
Mogilno	354,0	1161	32 300,9	13.37	12.28	11.29
Damaśławek	295,5	1409	27 619,8	25.20	20.73	17.05
Kłodawa	263,9	1705	19 797,3	22.98	14.34	8.95
Izbica Kujawska	450,5	1200	43 801,4	9.59	8.36	7.29
Lubień	409,1	1200	39 776,1	13.01	11.34	9.89
Łanięta	370,1	1200	35 984,2	18.89	16.47	14.36
Rogóżno	302,3	1345	29 522,0	34.27	29.24	24.94
Dębina	673,5	1200	65 483,3	1.77	1.54	1.34

po 30 latach). Przyczyną jest znacznie głębsze (o ponad 350 m) posadowienia kawern. Na ryc. 7 przedstawiono prognozę łącznej pojemności magazynowej analizowanych wysadów w czasie.

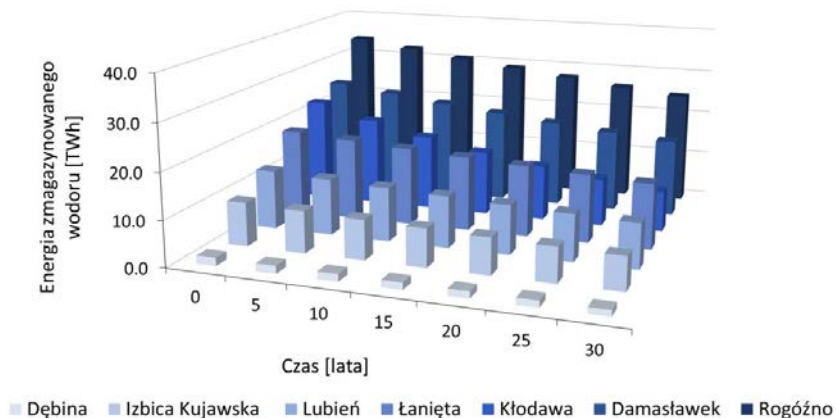
Według prognozy łączna zdolność magazynowa w poszczególnych latach wynosi od 125,7 TWh po pierwszym napełnieniu do ok. 83,8 TWh po 30 latach eksploatacji kawern.

5. POTENCJAŁ MAGAZYNOWY ZŁÓŻ SOLI KAMIENNEJ W ASPEKCIE ZAPOTRZEBOWANIA NA WODÓR

Badania prowadzone w ramach grantu UE Hystories, dotyczącego podziemnego magazynowania wodoru, obejmowały m.in. oszacowanie zapotrzebowania na pojemności magazynowe wodoru w krajach Unii Europejskiej. Zapotrzebowanie zostało określone w zależności od ośmiu scenariuszy, uwzględniających różne konfiguracje systemów energetycznych wykorzystujących wodór. Badania wskazują, że w przypadku Polski przewidywana przestrzeń magazynowa będzie musiała zapewnić zmagazynowanie wodoru o wartości energetycznej od ok. 2,2 do 55,5 TWh w cyklu rocznym (Michalski i in., 2021).

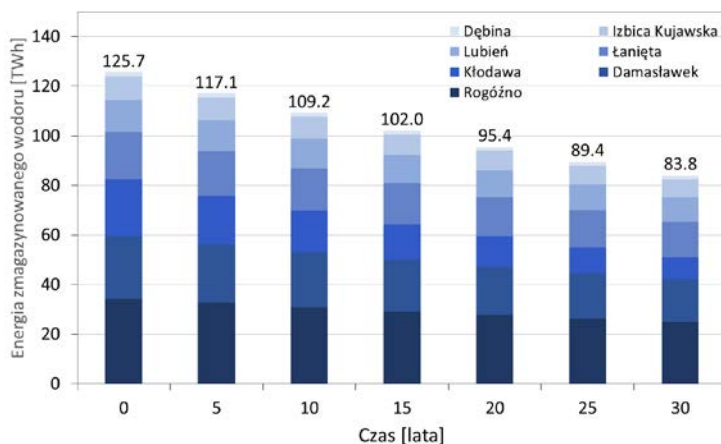
Przedstawione powyżej wyniki badań pojemności magazynowej złóż soli kamiennej w Polsce wskazują, że potencjał magazynowy analizowanych pokładów należy szacować na około 2550 TWh, a analizowanych wysadów na około 125 TWh po pierwszym napełnieniu. Ponadto należy pamiętać, że przeciętna kawerna solna może być w ciągu roku napełniana i opróżniana 10 – 12 razy. Przy założeniu, że większość podziemnych magazynów wodoru będzie miało charakter magazynów wyrównujących szczytowe zapotrzebowanie na energię, można przyjąć, że roczny potencjał magazynowy analizowanych struktur może być około dziesięciokrotnie wyższy od początkowo określonej pojemności. Przedstawione wartości wskazują, że istniejący potencjał niewspółmiernie przekracza zapotrzebowanie na przestrzeń magazynową nawet w przypadku scenariusza zakładającego największy udział wodoru w przyszłym systemie energetycznym.

Znając wartości średniej pojemności kawern w poszczególnych wysadach, wynikające z prezentowanych szacunków, zapotrzebowanie na pojemność magazynową można przedstawić w postaci ilości kawern w poszczególnych wysadach. W przypadku wysadów solnych ilości kawern potrzebnych do zaspokojenia zapotrzebowania na przestrzeń magazynową w minimalnym i maksymalnym scenariuszu przedstawia ryc. 8.



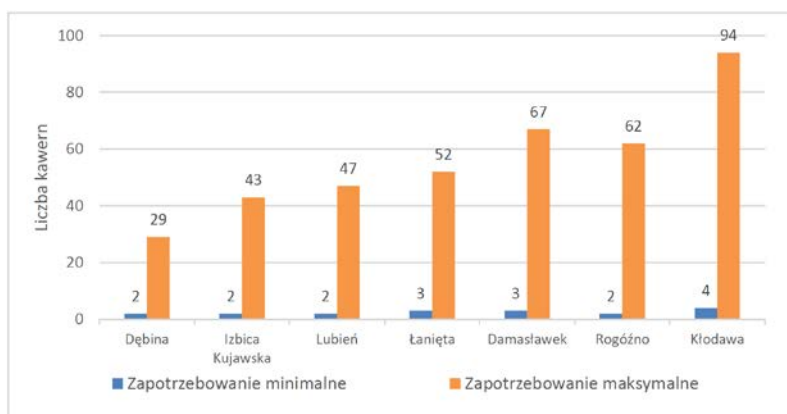
Ryc. 6. Średnia wartość energii wodoru zmagazynowanego w analizowanych wysadach solnych.

Fig. 6 Average value of hydrogen energy stored in analyzed salt domes.



Ryc. 7. Prognoza średniej łącznej pojemności magazynowej analizowanych wysadów.

Fig. 7. The forecast of the total storage capacity of the analyzed salt domes over time.



Ryc. 8. Porównanie zapotrzebowanie na przestrzeń magazynową w wybranych wysadach solnych.

Fig. 8. Comparison of the storage space demand in selected salt domes.

Wyniki szacunków wskazują, że najkorzystniejsze warunki ze względu na pokrycie zapotrzebowania magazynowego, występują w mniejszych wysadach, które teoretycznie zapewniają możliwość wybudowania kawern o dużych rozmiarach, na głębokościach zapewniających uzyskanie dużej pojemności. W przypadku dużych wysadów takich jak Damasławek czy Kłodawa, panujące warunki geologiczno-górnictwa wymuszają budowę kawern o mniejszej pojemności. Prowadzi to do sytuacji, w której na pokrycie tego samego zapotrzebowania potrzeba do 4 razy więcej kawern niż w przypadku pozostałych wysadów. Duże wysady zapewniają z kolei większy potencjał odnośnie wyboru dogodnej lokalizacji podziemnych magazynów.

Analizując możliwości pokrycia zapotrzebowania na ilość kawern można zauważyć, że w przypadku wysadów solnych rozpiętość zapotrzebowania na kawerny magazynowe waha się w granicach od 2 do 94 kawern, w zależności od przyjętego scenariusza zapotrzebowania i rozważanego wysadu. Szacunki przeprowadzone w analizie pojemności magazynowej wysadów wskazują, że przy założeniu rozstawu kawern co 250 m można teoretycznie zbudować około 1100 kawern w analizowanych wysadach, co wskazuje, że 10% ich powierzchni może zabezpieczyć maksymalne potrzeby magazynowe.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W oparciu o przedstawioną metodykę badawczą, zaprezentowano wyniki oszacowań pojemności wodoru dla kawern solnych w pokładzie najstarszej soli kamiennej na monoklinie przedsudeckiej, w obrębie najlepiej rozpoznanego fragmentu pokładu najstarszej soli kamiennej w rejonie Zatoki Gdańskiej oraz dla siedmiu niezagospodarowanych wysadów środkowej Polski. W przypadku pokładów solnych wyniki szacunków przedstawiono w postaci map pojemności magazynowej oraz w postaci map wartości energetycznej zmagazynowanego wodoru. Analiza unikalnych wartości rastrów pojemności magazynowej pozwoliła na określenie całkowitego potencjału magazynowego pokładów. W przypadku wysadów solnych szacunki pojemności magazynowej oparto na analizie statystycznej pozwalającej określić średnie wielkości i głębokości posadowienia kawern w poszczególnych wysadach.

Wyniki przeprowadzonej analizy wskazują, że potencjał magazynowy analizowanych pokładów wynosi ok. 2550 TWh, natomiast wysadów ok. 125 TWh. Łączny potencjał magazynowy analizowanych wystąpień soli kamiennej przewyższa w znaczący sposób zapotrzebowanie na przestrzeń magazynową, bez względu na przyjęty scenariusz określonego zapotrzebowania. Przy założeniu, że większość podziemnych magazynów wodoru będzie miało charakter magazynów wyrównujących szczytowe zapotrzebowanie na energię, można przyjąć, że do pokrycia rocznego zapotrzebowania na przestrzeń magazynową wystarczą kawerny o pojemności dziesięciokrotnie niższej niż roczne zapotrzebowanie magazynowe. Spowodowane jest dużą elastycznością magazynową kawern solnych,

mates. The number of caverns needed to meet the demand for storage space in the minimum and maximum scenarios is shown in Fig. 8.

The results of the estimates indicate that the most favorable conditions in terms of covering the storage demand are found in smaller salt domes, which theoretically provide the possibility of building large caverns at depths ensuring high capacity. In the case of large salt domes such as Damasławek or Kłodawa, the prevailing geological and mining conditions force the construction of caverns with a smaller capacity. This leads to a situation where up to 4 times more caverns are needed to cover the same demand than in the case of the remaining salt domes. In turn, they provide convenient site selection for underground storage facilities.

When analyzing the possibilities of covering the demand for the number of caverns, it can be noticed that in the case of salt domes, the demand for storage caverns ranges from 2 to 94, depending on the adopted demand scenario and the considered salt dome. Estimates in the analysis indicate that assuming a cavern spacing of 250 m, theoretically, about 1100 caverns can be constructed in analyzed salt domes.

6. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Based on the presented research methodology, the results of the estimation of hydrogen capacity for salt caverns are presented for the oldest rock salt seam in the Fore-Sudetic Monocline, the best-recognized part of the Oldest Halite seam in the Gulf of Gdańsk region, and seven undeveloped salt domes of central Poland. In the case of stratiform rock salts, the results of the estimates were presented on the maps of storage capacity and energy value of the stored hydrogen. Analyzing the unique values of the storage capacity rasters allowed us to determine the total storage capacity of the analyzed salt seams. In the case of salt domes, the storage capacity estimates were based on a statistical analysis that allows for determining the average size and depth of caverns in individual salt domes.

The analysis results show that the stored potential of the analyzed stratiform rock salts is about 2550 TWh, while the storage potential of salt domes is about 125 TWh. The total storage potential of the analyzed rock salt deposits significantly exceeds the demand for storage space, regardless of the adopted scenario of storage demand. Assuming that most of the underground hydrogen storage facilities will work as peak energy demand facilities, it can be assumed that caverns with a capacity ten times lower than the annual storage demand will be sufficient to cover the yearly demand for storage space. It is caused by the high flexibility of storage caverns ensuring the yearly flow of working gas in the amount corresponding to 10-12 times the cavern capacity.

It should be noted that the presented assessment of the storage potential does not consider the factors that exclude

zapewniającą roczny przepływ gazu roboczego w ilości odpowiadającej 10-12 krotnej pojemności kawerny.

Należy zwrócić uwagę, że przedstawiona ocena potencjału magazynowego nie uwzględnia czynników wykluczających dostęp do istniejących pokładów i struktur solnych, takich jak formy ochrony przyrody czy zagospodarowanie terenu. Czynniki te mogą znacząco wpływać na ostateczną ocenę możliwości budowy podziemnych magazynów wodoru. Z drugiej strony nie zostały uwzględnione w analizie słabo rozpoznane struktury w obrębie niecki szczecińskiej takie jak Goleniów, Przytór, Wickowo i Wapnica pokłady młodszej i najmłodszej soli kamiennej na monoklinie przedsudeckiej oraz znaczna część pokładu soli kamiennej na północy Polski, które mogą również zapewnić dodatkową, znaczną przestrzeń magazynową.

Wykorzystana metodyka badawcza, upoważnia do przeprowadzenia podobnych oszacowań na innych obszarach, przy uwzględnieniu wymaganych danych geologicznych i górniczych. Przedstawione wyniki badań mogą być pomocne dla decydentów/inwestorów w podjęciu decyzji wykorzystania wystąpień soli w Polsce do budowy kawern solnych w celu magazynowania wodoru, w celach strategicznych lub sezonowych.

access to stratiform rock salts and structures, such as forms of nature protection or land use. These factors can significantly influence the final assessment of the feasibility of constructing underground hydrogen storage facilities. On the other hand, poorly explored structures within the Szczecin basin, such as Goleniów, Przytór, Wickowo, and Wapnica, the part of the rock salt seam in North Poland and the older (PZ2) and younger (PZ3) salt seams in the Fore-Sudetic Monocline, which may also provide additional storage space, were not included in the analysis.

The research methodology allows for similar assessments in other areas, considering the required geological and mining data. The presented research results may be helpful for decision-makers and investors in Poland for underground hydrogen storage.

LITERATURA/REFERENCES

- ABDIN Z., ZAFARANLOO A., RAFIEE A., MÉRIDA W., LIPÍŃSKI W., KHALILPOUR, K.R., 2020. Hydrogen as an energy vector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 120: 109620.
- BÉREST P., BROUARD B., FAVRET F., HÉVIN G., KARIMI-JAFARI M., 2015. Maximum Pressure in Gas Storage Caverns. SMRI Spring 2015 Technical Conference, Rochester New York, USA.
- CAGLAYAN D.G., WEBER N., HEINRICHS H.U., LINBEN J., ROBINIUS M., KUKLA P.A., STOLTEN D., 2020. Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe. *International Journal of Hydrogen Energy* 45(11): 6793–6805.
- CHROMIK M., 2015. Możliwości magazynowania energii elektrycznej w soli kamiennej w postaci wodoru w regionie nadbałtyckim. *Przegląd Solny* (11): 44–50.
- CHROMIK M., 2016. Koncepcja magazynowania nadwyżek energii elektrycznej w postaci wodoru w kawernach w złożach soli kamiennej w Polsce – wstępne informacje. *Przegląd Solny* (12): 11–18.
- CROTOGINO F., SCHNEIDER G.S., EVANS D.J., (2018). Renewable energy storage in geological formations. *Journal of Power and Energy* 232(1): 100–114.
- CYRAN K., KOWALSKI M., 2021. Shape Modelling and Volume Optimisation of Salt Caverns for Energy Storage. *Applied Sciences* 11(423): 1–24.
- CZAPOWSKI G., (2019). Perspektywy lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowych wystąpieniach soli kamiennych górnego permu (cechsztyń) w Polsce – ocena geologiczna Prospects of Hydrogen Storage Caverns Location in the Upper Permian (Zechstein). *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* (477): 21–54.
- CZAPOWSKI G., TARKOWSKI R., 2018a. Geology of selected salt domes in Poland and their usefulness in constructing hydrogen storage caverns. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* (472): 53–82.
- CZAPOWSKI G., TARKOWSKI R., 2019. Ocena geologicznych możliwości lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowych wystąpieniach soli kamiennych górnego permu (cechsztyń) w Polsce. XXIV International Salt Symposium Quo Vadis Sal, 60–64.
- DECZKOWSKI Z., GAJEWSKA I., 1997. Charakterystyka starokimeryjskich i laramijskich struktur blokowych monokliny przedsudeckiej. *Kwartalnik Geologiczny* 23(1): 467–481.
- EVANS J., SHAW T., 2021. Storage of Hydrogen in Solution Mined Salt Caverns for Long Duration Energy Storage. SMRI Spring 2021 Virtual Technical Conference. Solution Mining Research Institute.
- GARLICKI A., KIJEWSKI P., SZYBIST A. 1996. Sól kamienna na obszarze przedsudeckim. Lubin: KGHM Polska Miedź S.A.
- GILLHAUS A., CROTOGINO F., ALBES D. VAN SAMBEEK L., 2006. Compilation and evaluation of bedded salt deposit and bedded salt cavern characteristics important to successful cavern sealing and abandonment.- SMRI Research Report No. 2006-2-SMRI, 131 p., Clarks Summit (PA), USA.
- HÉVIN G., 2019. Underground storage of Hydrogen in salt caverns. European Workshop on Underground Energy Storage. November 2019, Paris.
- HORVATH P.L., MIRAU S., SCHNEIDER G., HEIKE B., WEILER C., BÖDEKER J., WIPPICH M., TANGERMANN T., RATIGAN J., 2018. Update of SMRI's Compilation of Worldwide Salt Deposits and Salt Cavern Fields. Solution Mining Research Institute Report.
- JUEZ-LARRÉ J., GESSEL S. VAN, DALMAN R., REMMELTS G., GROENENBERG R., 2019. Assessment of underground energy storage potential to support the energy transition in the Netherlands. *First Break* (37): 57–66.

- KUNSTMAN A., POBORSKA-MŁYNARSKA K., URBAŃCZYK K., 2009. Geologiczne i górnicze aspekty budowy magazynowych kawern solnych. *Przegląd Geologiczny* 57(9): 819–828.
- KUNSTMAN A., URBAŃCZYK K., 2013. Podziemne magazynowanie energii: wodór w kawernach solnych – aspekty ekonomiczne. *Przegląd Solny* (9): 20–25.
- LANKOF L., TARKOWSKI R., 2020. Assessment of the potential for underground hydrogen storage in bedded salt formation. *International Journal of Hydrogen Energy* 45(38): 19479–19492.
- LANKOF L., URBAŃCZYK K., TARKOWSKI R., 2022. Assessment of the potential for underground hydrogen storage in salt domes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (160): 112309.
- MICHALSKI J., ZERHUSEN J., BUNGER U., 2021. Histories - Expected techno-economic requirements for underground renewable hydrogen storage. Deliverable D5.2 31.
- MUHAMMED N.S., HAQ B., AL SHEHRI D., AL-AHMED A., RAHMAN M.M., ZAMAN E., 2022. A review on underground hydrogen storage: Insight into geological sites, influencing factors and future outlook. *Energy Reports* (8): 461–499.
- OLABI A.G., BAHRI A. SALEH ABDELGHAFAR A.A., BAROUTAJI A., SAYED E.T., ALAMI A.H., REZK, H., ABDELKAREEM, M.A., 2021. Large-scale hydrogen production and storage technologies: Current status and future directions. *International Journal of Hydrogen Energy* 46(45): 23498–23528.
- OSMAN A.I., MEHTA N., ELGARAHY A.M., HEFNY M., AL-HINAI A., AL-MUHTASEB A.H., ROONEY D.W., 2022. Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. *Environmental Chemistry Letters* 20(1): 153–188.
- POBORSKI J., 1976. Nowa mapa stosunków litofacjalnych w zagłębiu cechsztyńskim w Polsce. *Przegląd Geologiczny* (24): 255–257.
- SIMON J., FERRIZ A.M., CORREAS L.C., 2015. HyUnder - Hydrogen underground storage at large scale: Case study Spain. *Energy Procedia* (73): 136–144.
- ŚLIZOWSKI J., LANKOF L., URBAŃCZYK K., SERBIN K., 2017. Potential capacity of gas storage caverns in rock salt bedded deposits in Poland. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* (43): 167–178.
- ŚLIZOWSKI J., SMULSKI R., NAGY S., BURLIGA S., POLAŃSKI K., 2017. Tightness of Hydrogen Storage Caverns in Salt Deposits. *AGH DRILLING, OIL, GAS* 34(2): 397–409.
- ŚLIZOWSKI J., URBAŃCZYK K., CZAPOWSKI G., LANKOF L., SERBIN K., ŚLIZOWSKI K., TOMASZCZYK M., 2011. Możliwości magazynowania gazu ziemnego w polskich złożach soli kamiennej w zależności od warunków geologiczno-górnictwowych. Wydawnictwo IGSMiE PAN.
- ŚLIZOWSKI J., URBAŃCZYK K., ŁACIAK M., LANKOF L., SERBIN K., 2017. Efektywność magazynowania gazu ziemnego i wodoru w kawernach solnych. Effectiveness of natural gas and hydrogen storage in salt caverns. *Przemysł Chemiczny* 96(5): 994–998.
- ŚLIZOWSKI K., 1983. Warunki geologiczno-górnictwowe w cechsztyńskich złożach soli w Polsce dla wykonywania podziemnych zbiorników cieczy i gazu. Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo, 121.
- TARKOWSKI R., 2019. Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (105): 86–94.
- TARKOWSKI R., CZAPOWSKI G., 2018. Salt domes in Poland – Potential sites for hydrogen storage in caverns. *International Journal of Hydrogen Energy* 43(46): 21414–21427.
- URBAŃCZYK K., 2016. Wybrane aspekty termodynamiczne magazynowania wodoru w kawernach solnych. *Przegląd Solny* (12): 92–97.
- WAGNER R., 1994. Stratygrafia osadów i rozwój basenu cechsztyńskiego na Niżu Polskim. *Prace PIG* (146). Wydawnictwo PIG.
- WAGNER R., PERYT T. M., 1997. Possibility of sequence stratigraphic subdivision of the Zechstein in the Polish Basin. *Geological Quarterly* 41(4): 457–474.
- WANG T., LI J., JING G., ZHANG Q., YANG C., DAEMEN J.J.K., 2019. Determination of the maximum allowable gas pressure for an underground gas storage salt cavern – A case study of Jintan, China. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 11(2): 251–262.
- WARREN J. K., 2006. *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- WILLIAMS J.D.O., WILLIAMSON J.P., PARKES D., EVANS D.J., KIRK K.L., SUNNY N., HOUGH E., VOSPER H., AKHURST M. C. 2022. Does the United Kingdom have sufficient geological storage capacity to support a hydrogen economy? Estimating the salt cavern storage potential of bedded halite formations. *Journal of Energy Storage* (53):105109.
- ZIVAR D., KUMAR S., FOROOZESH J., 2021. Underground hydrogen storage: A comprehensive review. *International Journal of Hydrogen Energy* 46(45): 23436–23462.