

UWARUNKOWANIA GEOLOGICZNE WYBRANYCH WYSADÓW SOLNYCH W POLSCE I ICH PRZYDATNOŚĆ DO BUDOWY KAWERN DO MAGAZYNOWANIA WODORU

GEOLOGY OF SELECTED SALT DOMES IN POLAND AND THEIR USEFULNESS IN CONSTRUCTING HYDROGEN STORAGE CAVERNS

GRZEGORZ CZAPOWSKI¹, RADOSŁAW TARKOWSKI²

Abstrakt. Podziemne magazynowanie wodoru stanowi alternatywną formę magazynowania energii. Zatłoczony gaz w sytuacji nadwyżek energetycznych może być uwalniany i spalany w odpowiednich instalacjach w momencie wzrostu zapotrzebowania na energię. Do najbardziej efektywnych form takiego magazynowania należą kawerny w wysadach zbudowanych z soli cechsztynu, które na obszarze Niżu Polskiego intrudowały w nadległe utwory mezozoiku.

Siedem spośród 27 wysadów solnych spełnia parametry geologiczne (minimalna grubość serii solnej rzędu 1 km, maksymalna głębokość występowania zwierciadła solnego <1 km), pozwalające je wskazać jako przydatne do budowy kawern magazynowych wodoru. Do najlepszych/optimalnych struktur należą wysady Rogóźno i Damasławek oraz w równym stopniu przydatne są dwa bliźniacze wysady – Lubień i Łanięta. W świetle obecnej wiedzy geologicznej mniej perspektywicznymi strukturami są wysady Goleniów i Izbica Kujawska (wysad Izbica Kujawska wymaga kompleksowego rozpoznania geologicznego). Ostatnią z analizowanych struktur, wysad Dębina, ulokowaną w centrum eksploatowanego odkrywkowo złoża węgla brunatnego „Bełchatów”, uznano za nieprzydatną dla tej formy magazynowania. Opisane wysady solne są również przydatne do magazynowania innych gazów np. gazu ziemnego czy powietrza, gdyż ich magazynowanie wymaga spełnienia podobnych warunków geologicznych.

Słowa kluczowe: podziemne magazynowanie wodoru, wysady solne, parametry geologiczne, Niż Polski.

Abstract. Underground hydrogen gas storage might be the alternative energy supplier. Filled-up during energy surplus could be utilized during energy shortage by combustion in special installations. Salt caverns within the salt domes are being considered as one of the optimal places for such energy storage. Caverns within the domes of Zechstein salts that intruded into the surrounding Mesozoic strata of the Polish Lowlands are among the most effective underground storages.

Seven out of 27 analyzed salt domes have been recommended for hydrogen storage construction based on the geological parameters (*i.e.* minimum thickness of the salt body should be about 1 km and its top at a depth less than 1 km). The best structures are the Rogóźno and Damasławek domes and two twin-forms – the Lubień and Łanięta domes of equal usefulness. Less perspective structures, based on the present geological knowledge, are the Goleniów and Izbica Kujawska domes. The latter would still require basic geological work. The last analyzed structure, the Dębina dome, located in the centre of the active lignite open-pit “Bełchatów”, has been excluded from future consideration. These salt domes are also suitable for the storage of other gases, *i.e.* natural gas and air, as their storage requires similar geological setting.

Key words: underground hydrogen storage, salt domes, geological setting, Polish Lowlands.

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; e-mail: grzegorz.czapowski@pgi.gov.pl.

² Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, ul. Wybickiego 7 A, 31-261 Kraków; e-mail: tarkowski@min-pan.krakow.pl.

WSTĘP

Światowe zapotrzebowanie za tzw. czyste źródła energii, które nie oddziałują negatywnie na środowisko, zwiększyło zainteresowanie wykorzystywaniem wodoru do produkcji energii na skalę przemysłową.

Celem pracy jest przedstawienie aktualnego stanu wiedzy geologicznej o cechsztyńskich strukturach solnych na obszarze Niziny Polskiej, od okolic Zalewu Szczecińskiego po rejon Bełchatowa na południe od Łodzi oraz ocena, które spośród nich mogą być najbardziej przydatne do zagospodarowania przez budowę kawern do magazynowania wodoru.

PODZIEMNE MAGAZYNOWANIE ENERGII W POSTACI WODORU

Podziemne magazynowanie energii w postaci ciepła, sprężonego powietrza czy wodoru jest dziś przedmiotem dużego zainteresowania popartego coraz licznymi publikacjami naukowymi. Jest ono uznawane za kluczowy element nowoczesnego łańcucha dostaw energii, przyczyniający się do: poprawy wydajności systemów energetycznych, zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii, ochrony kopalnych źródeł energii, zmniejszenia wpływu produkcji energii na środowisko. Podziemne magazynowanie pozwala przechowywać energię w zróżnicowanej ilości przez tygodnie czy nawet miesiące.

W sytuacji wahających się dostaw energii, w tym i tej pochodzącej ze źródeł odnawialnych, wodór konwertowalny na elektryczność lub ciepło może stać się wydajnym nośnikiem energii, pozwalającym na jej transport i magazynowanie. Obecnie rozważa się wykorzystanie pustek podziemnych w strukturach geologicznych do magazynowania wodoru w dużych ilościach. Taka forma przechowywania energii pozwoliłaby na regulowanie podaży i popytu w przypadkach, w których ilość wytwarzanej energii przekracza potrzeby konsumentów, umożliwiłaby kontrolowanie cen energii czy też oferowanie dla przemysłu natychmiastowej rezerwy wodoru (Marzec, 2007; Mokrzycki, 2011; Jacquelin, Bader, 2013; Kaliski, Sikora, 2013; Kunstman, Urbańczyk, 2013; Mirowski i in., 2015; Amid i in., 2016; Delmastro i in., 2016; Miecznik, 2016; Panfilov, 2016; Sgobbi i in., 2016; Zhang i in., 2016). Budowa podziemnych magazynów wodoru umożliwia różne komercyjne sposoby jego wykorzystania w przemyśle i transporcie, stanowi ona element cyklu energetycznego (Tarkowski, 2017a, b), na który składają się: produkcja energii → konwersja do wodoru → magazynowanie wodoru → rekonwersja wodoru na inne rodzaje energii → zużycie energii (fig. 1).

WODÓR JAKO NOŚNIK ENERGII

Wodór jest atrakcyjnym przekaznikiem energii, wolnym od zanieczyszczeń, o dużej entalpii spalania. Charakteryzuje się możliwością elastycznego i efektywnego przekształcania

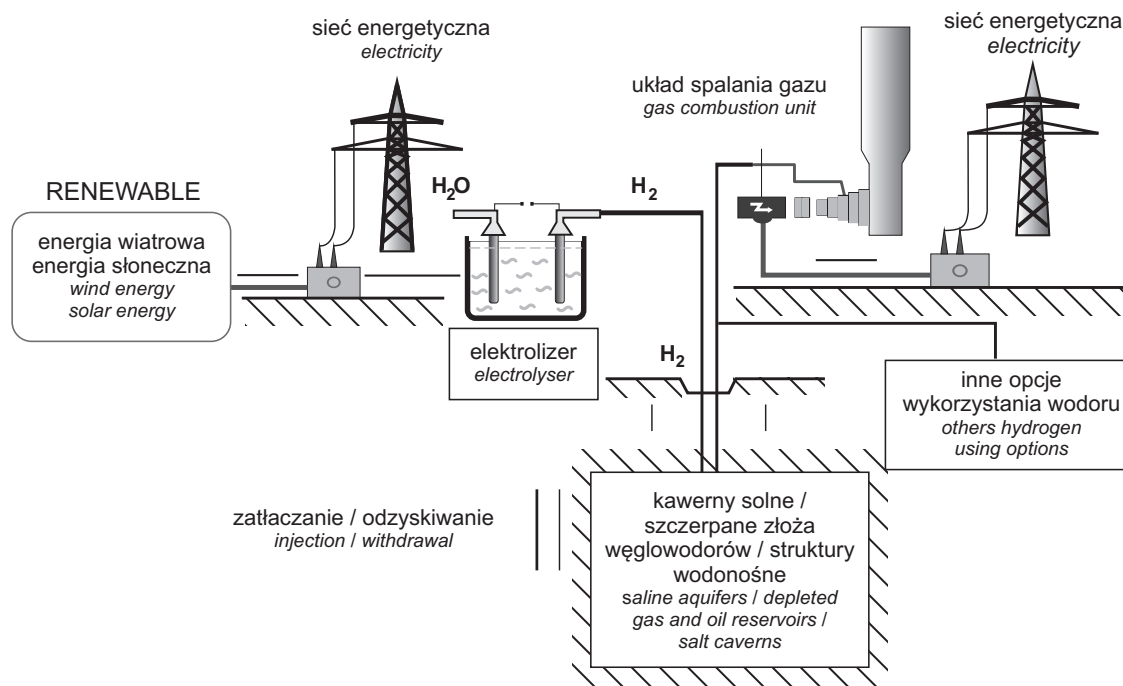


Fig. 1. Idea podziemnego magazynowania wodoru w strukturach geologicznych (wg Ozarlan, 2012; zmienione)

Idea of underground hydrogen storage in geologic structures (after Ozarlan, 2012; modified)

energii. Technologia jego produkcji jest dobrze rozwinięta, ciągle udoskonalana i ma zaletę praktycznie nieograniczonej dostępności podstawowego surowca (woda) do jego wytwarzania. Problematyka wykorzystania wodoru jako nośnika energii (energetyka wodorowa), w tym: przegląd źródeł surowcowych, technologie produkcji, wykorzystanie zgazowania węgla do produkcji wodoru, magazynowanie i transport, szanse i bariery rozwoju energetyki wodorowej, była w Polsce wielokrotnie poruszana (np. Kijewski, 2005; Marzec, 2007; Zarebska, Pernak-Miśko, 2007; Tomczyk, 2009; Kochański i in., 2013; Chmielniak i in., 2017; Tarkowski, 2017b).

PODZIEMNE MAGAZYNOWANIE WODORU

Istotą magazynowania energii w postaci wodoru, wyprodukowanego w okresach nadwyżek energetycznych, 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 ucieczką.

Podziemne magazynowanie wodoru nie różni się znacząco od podziemnego magazynowania gazu ziemnego, praktykowanego na szeroką skalę przez firmy naftowe od ok. stu lat. Podziemne magazyny gazów (PMG) posiadają wiele zalet, takich jak (np. Czapowski, 2006; Karnkowski, Czapowski, 2007; Kunstman i in., 2009; Pieńkowski, 2009):

- bezpieczeństwo magazynowania – podziemny magazyn jest mniej wrażliwy na pożar, atak terrorystyczny czy działania wojenne,
- ochrona terenu – tradycyjne zbiorniki na powierzchni zajmują duże obszary do pomieszczenia podobnej ilości produktu,
- aspekty ekonomiczne – koszty budowy podziemnych magazynów w porównaniu z kosztami budowy tradycyjnych powierzchniowych zbiorników podobnej pojemności są dużo mniejsze,
- dostępność struktur geologicznych – przydatne do tej formy magazynowania struktury występują powszechnie w wielu krajach i na wielu obszarach.

Ostatnio obserwuje się trend wskazujący na rosnące znaczenie podziemnych magazynów w kawernach solnych. Według CEDIGAZ (The International Association for Natural Gas; <http://www.cedigaz.org>) w 2010 r. z planowanych 202 projektów budowy nowych i rozbudowy już istniejących podziemnych magazynów na całym świecie, 82 dotyczyło właśnie magazynów w kawernach solnych. Według tego samego źródła (Natural Gas..., 2016), z końcem 2015 r. było 680 podziemnych magazynów gazu. Większość z nich (80%) jest ulokowanych w szcerpanych złożach węglowodorów. W mniejszym stopniu na magazyny wykorzystywane są poziomy wodonośne (12%) i kawerny solne (8%) (Carnot-Gandolphe, 2016).

Uwarunkowania geologiczne, technologiczne i ekonomiczne możliwości podziemnego magazynowania gazów

(PMG) oraz omówienie działających w Polsce PMG zaprezentowano w monograficznych opracowaniach Reinischa (2000) i Gąska i in. (2012) oraz w licznych publikacjach (np. Ślizowski i in., 2004; Kłeczek i in., 2005; Maciejewski, 2008; Laskowska i in., 2009; Pieńkowski, 2009; Ślizowski, Urbańczyk, 2011; Kaliski, Sikora, 2013). Geologiczne i górnicze aspekty budowy magazynowych kawern solnych scharakteryzowali Kunstman i in. (2009), a możliwości magazynowania wodoru w kawernach solnych, wykonanych w pokładzie cechsztyńskiej soli kamiennej w rejonie nadbałtyckim przedstawił Chromik (2012, 2015, 2016). Wyniki modelowania termodynamicznych procesów związanych z taką formą magazynowania zawiera praca Urbańczyka (2016).

Strukturami geologicznymi przydatnymi do przechowywania wodoru i innych gazów mogą być (a) szcerpane złoża węglowodorów (ropy naftowej i gazu ziemnego), (b) głębokie poziomy wodonośne i (c) kawerny solne. Pierwsze dwa rodzaje struktur są obiektami typu porowo-szczelinowatego, gdzie decydującą rolę w magazynowaniu odgrywają aspekty geologiczne górotworu. W przypadku kawern w soli istotna jest rola czynników technicznych. Wspomniane struktury geologiczne muszą spełniać określone warunki, aby mogły zostać zaadoptowane na podziemny magazyn wodoru (patrz: Tarkowski, 2017a, b, z literaturą).

Podziemne kawerny solne, będące sztucznymi komorami utworzonymi przez wylugowanie 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 chronią je przed pojawieniem się i rozprzestrzenianiem pęknięć groźących 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 wylugować kilka kawern. W zależności od potrzeb i sposobu eksploatacji kawernowego magazynu, możliwa jest liczba do dziesięciu „obrotów” zatłoczonego gazu w ciągu roku. Podziemne magazynowanie wodoru (*Hydrogen Underground Storage* – HUS) w kawernach solnych jest dzisiaj technicznie wykonalne i poparte kilkoma przykładami na skalę przemysłową.

GEOLOGICZNE, TECHNICZNE I EKONOMICZNE UWARUNKOWANIA MAGAZYNOWANIA WODORU W KAWERNACH SOLNYCH

Wybór danego złoża/struktury solnej z przeznaczeniem na podziemny magazyn wodoru następuje po przeprowadzeniu wnikliwej analizy geologicznej obiektu z wykorzystaniem inżynierii złożowej (por. Kłeczek i in., 2005; Kanazaki i in., 2008; Gąska i in., 2012; Bauer i in., 2013; Ebigbo i in., 2013; Kaliski, Sikora, 2013; Kruck i in., 2013; Bai i in., 2014; Górowska, 2014; Iordache i in., 2014; Pfeiffer, Bauer,

2015; Panfilov, 2016). Istotnymi parametrami są: budowa geologiczna struktury, właściwości geomechaniczne soli oraz odpowiednia charakterystyka skał uszczelniającego nadkładu. W dalszej kolejności istotne są kryteria techniczne, środowiskowe, prawne, ekonomiczne. Ważna jest szczelność techniczna instalacji, obejmująca otwory wykonane na złożu, urządzenia napowierzchniowe, w tym rurociągi transportujące gaz. Kluczowy jest odpowiedni dobór warunków eksploatacji, uwzględniający specyfikę złoża oraz właściwego ciśnienia zatłaczania i odbioru gazu. Należy wykazać, że obiekt jest potrzebny z punktu widzenia strategii energetycznej kraju, a jego budowa jest ekonomicznie opłacalna. Lokalizacja podziemnego magazynu wodoru musi uwzględniać ograniczenia w możliwościach przestrzennego zagospodarowania terenu (występowanie obszarów chronionych, możliwości zagospodarowania solanki itp.) oraz koncepcję zrównoważonego rozwoju regionu, obejmującą ograniczenia przyrodnicze, potrzeby gospodarki oraz oczekiwania społeczności lokalnej.

Sól kamienna jest idealnym ośrodkiem skalnym do wykonania w jej obrębie wysokociśnieniowych kawern gazowych. Specyficzne właściwości lepko-sprężyste soli powodują zablźnianie możliwych pęknięć oraz bardzo powolne odkształcenie górotworu solnego pod wpływem wysokich ciśnień i temperatury. Te właściwości gwarantują szczelność kawern przy magazynowaniu gazów pod wysokim ciśnieniem i możliwość budowy dużych pustek bez ich sztucznego wspierania. Istotne są relatywnie niskie koszty otworowego wyługowania kawern i niewielka instalacja powierzchniowa obsługująca magazyn.

Pokładowe wystąpienia soli kamiennej występują zwykle na bardzo dużych obszarach, a ich miąższość może dochodzić do kilkuset metrów. W tym przypadku optymalne dla budowy PMG są obszary niezaburzone tektonicznie. Z kolei struktury solne, powstałe dzięki mobilności soli, mogą mieć wysokość od kilkuset metrów (poduszki solne) do kilku kilometrów (grzebień, mury i wysady solne), a ich budowa wewnętrzna, szczególnie w wysadach, jest bardzo skomplikowana. W przypadku tych struktur kluczowe jest maksymalne rozpoznanie ich budowy wewnętrznej, by prawidłowo wybrać do lokalizacji kawern magazynowych odpowiednio miększy, rozprzestrzeniony i w marę jednorodny

kompleks soli kamiennej. Dla budowanego w pokładowym złożu soli kamiennej Mechelinki PMG Kosakowo przewiduje się (Gąska i in., 2012), że w planowanych kawernach magazynowych, dla których głębokość stropu ustalono na 1010–1050 m, maksymalne ciśnienie magazynowania wyniesie 17,1 MPa, a minimalne – 3,0 MPa. Z kolei Kłęczek z zespołem (Kłęczek i in., 2005) przewidują występowanie maksymalnego ciśnienia ok. 16 MPa w przypadku, gdy strop kawerny jest ulokowany na głębokości ok. 1000 m.

Czysty wodór dotychczas był magazynowany od 1972 r. w trzech kawernach solnych w Teesside w Wielkiej Brytanii oraz w dwóch pojedynczych kawernach w pobliżu US Gulf Coast w Teksasie. W Teksasie w okolicach Clemens Conoco Phillips przechowywał od lat 80. XX w. wodór w cylindrycznej kawernie o średnicy 49 m i wysokości 300 m (jej użyteczna pojemność to ok. 30 mln m³). Podobny magazyn w Wielkiej Brytanii składa się z trzech kawern o stosunkowo niewielkiej pojemności, gdzie przechowuje się łącznie ok. 1 mln m³ czystego wodoru. Podstawowe parametry istniejących magazynów wodoru w kawernach solnych przedstawiono w tabeli 1.

W minionym stuleciu stosowano podziemne magazynowanie mieszanin wodorowych. W Niemczech, w Kolonii, przemysłowy gaz z udziałem 62% wodoru przechowywano od 1971 r. w kawernie solnej o objętości 32 000 m³ i pod ciśnieniem 80–100 barów. We Francji, w Beynes, w latach 1956–1972 Gaz de France (GDF) przechowywał wyprodukowany gaz zawierający 50% wodoru w poziomach wodonośnych. W Republice Czeskiej, w Lobodicach, gaz miejski zawierający 50% wodoru i 25% metanu przechowywano w poziomie wodonośnym (Kruck i in., 2013; Bai i in., 2014; Reitenbach i in., 2015).

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 jedynie prace studialne nad oceną przydatności do tego celu wystąpienia soli kamiennej w północnej części województwa pomorskiego, gdzie bliskość Morza Bałtyckiego ułatwia zrzut wyługowanej solanki (np. Pieńkowski, 2009; Górowska, 2014; Chromik, 2016).

Tabela 1

Podstawowe parametry istniejących kawernowych magazynów wodoru (Kruck i in., 2013; zmienione)

Basic parameters of existing hydrogen cavern storages (after Kruck *et al.*, 2013; modified)

Parametr	Rejon		
	Clemens (USA)	Moss Bluff (USA)	Teesside (UK)
Forma wystąpienia soli	wysad solny	wysad solny	złożo pokładowe
Operator	Conoco Phillips	Praxair	Sabie Petroleum
Rok powstania	1983	2007	1972
Pojemność geometryczna [m ³]	580 000	566 000	3–70 000
Głębokość stropu kawern [m]	930	>822	>350
Ciśnienie maksymalne [MPa]	13,5	15,2	4,6
Ciśnienie minimalne [MPa]	7	4,5	0
Temperatura [K]	318	318	300

STRUKTURY WYSADOWE NIŻU POLSKIEGO JAKO OBIEKTY GEOLOGICZNE DO LOKALIZACJI KAWERN MAGAZYNOWYCH WODORU

Utwory cechsztyńskie Niżu Polskiego – szczególnie utwory solne – były w ostatnim półwieczu przedmiotem intensywnych badań stratygraficzno-genetycznych, tektonicznych i złożowych, prowadzonych w znacznym stopniu przez Państwowy Instytut Geologiczny (por. Czapowski i in., 2005, 2006 z literaturą; Kasiński i in., 2002, 2009). Badania te pozwoliły określić obecny zasięg i geologiczne warunki występowania osadów ewaporatowych, ich wykształcenie i zróżnicowanie genetyczno-facjalne, pozycję stratygraficzną w profilu polskiego cechsztynu oraz potencjał złożowy (np. Czapowski i in., 2015; Czapowski, Bukowski, 2016; Mikulski i in., 2016; Czapowski, 2017).

Lokalizację różnych typów struktur solnych (poduszki, grzbiety i wysady solne w różnym stopniu przebijające się przez utwory nadkładu) w utworach cechsztynu Polski przedstawiono na mapach i szkicach różnej skali (np. Garlicki, Szybist, 1988; Dadlez, 1998; Dadlez i in., 2000). Uproszczoną wersję zaktualizowanej mapy wystąpień tych struktur (Czapowski i in., 2017) z podaniem nazw wszystkich wysadów przedstawiono na figurze 2.

Oprócz licznych poduszek solnych, stwierdzonych głębokimi profilowaniami sejsmicznymi, dotychczas na obszarze Niżu Polskiego okonturowano 27 wysadów solnych (fig. 2), z których 10 przebija się przez utwory nadkładu mezozoicznego, docierając do pokrywy kenozoicznej. Dziewięć wysadów ma udokumentowane zasoby geologiczne soli kamiennej, w tym w trzech wysadach (Góra, Kłodawa i Mogilno) jest prowadzona aktualnie eksploatacja soli, a w dwóch (Inowrocław i Wapno) kopalnie podziemne za-

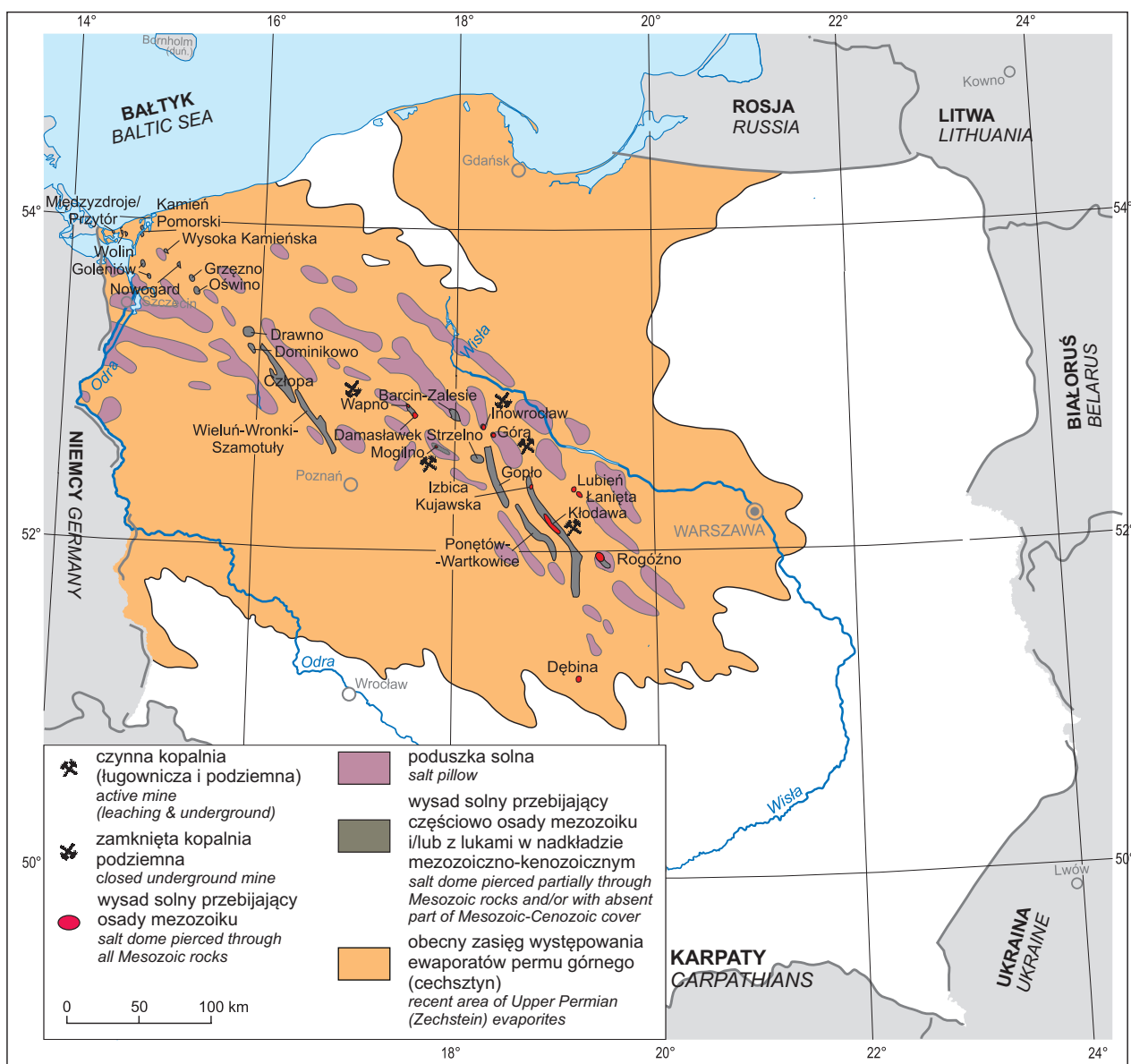


Fig. 2. Struktury solne w utworach cechsztynu w Polsce (wg Czapowskiego i in., 2017, zmienione)

Salt structures in the Upper Permian (Zechstein) deposits in Poland (after Czapowski *et al.*, 2017, modified)

mnęto. W jednym wysadzie (Goleniów) oszacowano zasoby soli w kategorii D (Czochal, 2013).

Stwierdzenie występowania i okonturowanie struktur solnych, szczególnie tych zalegających głębiej, było możliwe dzięki licznym głębokim profilowaniom sejsmicznym, a w przypadku form występujących płycej – zdjęciom gravimetrycznym. Dane o ilości wykonanych profilowań sejsmicznych na wybranych wysadach zaczerpnięto z bazy informacyjnej Narodowego Archiwum Geologicznego oraz dokumentacji i projektów badań geologicznych. W pracy wykorzystano wyniki wcześniej prowadzonych podobnych analiz, zawarte w publikacjach (Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2012) i opracowaniach archiwalnych (Czapowski i in., 2005, 2006).

Litostratygię utworów cechsztynu, budujących struktury wysadowe w Polsce, przedstawiono w tabeli 2.

Podstawowym kryterium geologicznym przyjętym przy wyborze struktur wysadowych z obszaru Nizy Polskiego, przydatnych do wykonania w ich obrębie wspomnianych ka-

wern magazynowych, była maksymalna głębokość występowania zwierciadła solnego, ustalona jako mniejsza niż 1000 m. Warunek ten spełnia funkcjonujący magazyn gazu w wysadzie solnym Mogilno oraz planowane do zagospodarowania w tym celu wysady Goleniów i Damasławek (Czapowski i in., 2005). Mniejszą rolę odgrywa miąższość serii solnej, ustalona tu na min. 1000 m, gdyż w strukturach wysadowych – w odróżnieniu od poduszek solnych – jest ona zwykle wielokrotnie większa, bo składa się na nią wysokość całego słupa solnego.

Podczas selekcji wysadów celowo pominięto zagospodarowane już górniczo wysady Mogilno, Góra i Kłodawa (funkcjonujące wydobywanie soli lub magazyny węglowodórów) oraz zlikwidowane kopalnie podziemne w wysadach, np. wysady Inowrocław i Wapno, gdyż wykonywanie nowych wyrobisk w górotworze, zawierającym wypełnione solanką dawne pustki, może być zbyt ryzykowne. Ponadto funkcjonujące kopalnie mają doskonałą znajomość budowy eksploatowanego górotworu oraz własne długofalowe plany

Tabela 2

Jednostki litostratygraficzne permu górnego (cechsztynu) w osiowej i północnej części Polskiego Basenu Permskiego (wg Wagnera, 1994, 2001; Wagnera, Peryta, 1997; Czapowskiego i in., 2007)

Upper Permian (Zechstein) lithostratigraphic units in the axial and northern part of the Polish Permian Basin (after Wagner, 1994, 2001; Wagner, Peryt, 1997; Czapowski *et al.*, 2007)

Litologia		Subcyklotem	Cyklotem
węglany + ewaporaty + klastyki	zubry		
stropowa seria terygeniczna (PZt)	formacja Piława	PZ4c – PZ4e	PZ4
najmłodsza sól kamienna stropowa (Na4b2)	formacja Ina		
czerwony il solny górny – część górna (T4b2)	formacja Korytnica	PZ4b	
sól rozdzielająca (Na4b1)			
czerwony il solny górny – część dolna (T4b1)			
najmłodsza sól kamienna górna ilasta (Na4a2t)			
najmłodsza sól kamienna górna (Na4a2)	formacja Parsęta	PZ4a	
anhydryt pegmatytowy górny (A4a2)			
najmłodsza sól kamienna dolna (Na4a1)			
anhydryt pegmatytowy dolny (A4a1)			
sól podścielająca (Na4a0)			
czerwony il solny dolny (T4a)	formacja Gwda	PZ3	
młodsza sól kamienna ilasta = Zuber brunatny (Na3t)	brak utworów zubrowych		
młodsza sól kamienna + młodsza sól potasowa (Na3) + (K3)			
anhydryt główny (A3)			
dolomit płytowy (Ca3)			
szary il solny (T3)			
anhydryt kryjący (A2r)	PZ2		
starsza sól kamienna kryjąca (Na2r)			
starsza sól kamienna + starsza sól potasowa (Na2) + (K2)			
anhydryt podstawowy (A2)			
dolomit główny (Ca2)			
łupek cuchnący (T2)	PZ1		
anhydryt górny (A1g)			
najstarsza sól kamienna (Na1)			
anhydryt dolny (A1d)			
wapień cechsztyński (Ca1)			
łupek miedzionośny (T1)			
zlepieniec podstawowy (Zp1)			

zagospodarowania i mogą w przyszłości same wybrać funkcje magazynowe lub składowiskowe dla wykonanych lub planowanych wyrobisk. Ocena przydatności wysadów do celów kawernowego magazynowania dotyczy zatem jedynie struktur dotychczas niezagospodarowanych górnictwo, o różnym stopniu rozpoznania geologicznego.

STAN ROZPOZNANIA GEOLOGICZNEGO WYBRANYCH WYSADÓW SOLNYCH

Spośród 27 wysadów solnych, zlokalizowanych na obszarze Niżu Polskiego w utworach cechsztynu, jedynie 7 niezagospodarowanych wysadów uznano w świetle dotychczasowego rozpoznania geologicznego za spełniające podane powyżej kryteria. Są to kolejno wysady (licząc od obszaru Pomorza Zachodniego w kierunku Mazowsza i Łodzi): Goleniów, Damasławek, Izbica Kujawska, Lubień, Łanięta, Rogóźno i Dębina. Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę budowy geologicznej wymienionych struktur na podstawie dostępnej informacji geologicznej.

WYSAD SOLNY GOLENIÓW

Wysad Goleniów występuje na NW od Goleniowa (fig. 2), na mapie kompleksu permio-mezozoicznego R. Dadleza (1998) w tym rejonie przedstawiono 2 małe diapiry solne. Diapir północny – Goleniów o osi NNW–SSE – ma wymiary $4,5 \times 2,0$ km. Strukturę tę rozpoznano w 1962 r. otworem Goleniów IG 1 (Kicman, 1993). Późniejsze badania (Czochal, 2013) wykazały, że cały wysad Goleniów ma długość ok. 13 km i szerokość ok. 3 km (szacowana powierzchnia to $30,6 \text{ km}^2$). Z niego wylaniają się 2 kulminacje: północna o wymiarach $8,7 \times 3,0$ km oraz południowa o wymiarach $1,6 \times 1,0$ km.

Struktura solna Goleniów w interpretacji Dadleza (2001) jest wysadem nie przebijającym się w pełni przez utwory mezozoiczne i ma formę asymetrycznego słupa solnego o stosunkowo regularnych ścianach (fig. 3). Późniejsze dane (Czapowski i in., 2005; Czochal, 2013) wskazują na dużo bardziej skomplikowaną budowę tej formy, charakteryzującej się występowaniem znacznej liczby deformacji o charakterze kompresyjnym, związanymi z późnokredową inwersją bruzdy. Na podstawie interpretacji 17 profili sejsmicznych opracowano (Czochal, 2013) model 3D kształtu wysadu, który posłużył do obliczenia zasobów kopaliny.

Aktualnie (Czochal, 2013) udokumentowano ok. 4,9 mld ton zasobów w kategorii D (w tym 3,8 mld t zasobów bilansowych i 1,1 mld t pozabilansowych) soli kamiennej.

Parametry i budowa wewnętrzna wysadu

Na obszarze wysadu odwiercono 1 głęboki otwór wiertniczy Goleniów IG 1 do głęb. 3649,0 m. Serię ewaporatową cechsztynu nawiercono na głęb. 888,0 m i sięga ona do głęb. 3649,0 m, osiągając grubość $>2761,0$ m. Ponad ewaporata-

mi występuje na głębokości 702,2 m gipsowa czapa wysadu o grubości 185,8 m.

W świetle zaktualizowanej interpretacji stratygrafii utworów cechsztynu w otworze wiertniczym Goleniów IG 1 (Czochal, 2013) nad wysadem północnym występują następujące utwory o miąższości (fig. 3; tab. 3):

- czwartorzęd – 35,0 m,
- paleogen i neogen – 404,0 m,
- kreda – 182,0 m,
- jura – 87,0 m.

Pod wspomnianymi utworami czapy gipsowej występuje seria ewaporatowa cechsztynu (seria solna), złożona z następujących wydzieleni o miąższości (tab. 3):

- starsza sól kamienna (Na₂) – 2074,4 m z 2 poziomami starszej soli potasowej (K₂) o sumarycznej miąższości 35 m,
- anhydryt główny (A₃) – 32,3 m,
- dolomit płytowy (Ca₃) – 4,3 m,
- anhydryt kryjący (A_{2r}) – 0,6 m,
- ponownie starsza sól kamienna (Na₂) – $>629,0$ m, z 5 poziomami starszej soli potasowej (K₂) o sumarycznej miąższości 47 m.

Geologia otoczenia i nadkładu wysadu

Ponad wysadem występują (fig. 3) utwory jury o grubości 87 m (poza wysadem do kilkuset metrów), wykształcone jako piaskowce, iłowce, mułowce, wapienie i margle. Powyżej przewiercono utwory kredy (miąższość 182 m), reprezentujące kampan górny (otwór Goleniów IG 2) i mastrycht (otwór Goleniów IG 1), wykształcone jako wapienie margliste, margle, piaskowce, iłowce i mułowce. Utwory te poza wysadem osiągają miąższości >1500 m.

Poza wysadem ponad osadami permu występują utwory triasu, reprezentowane przez piaskowce, wapienie, margle, dolomity, anhydryty, iłowce i mułowce.

Ponad utworami kredy nad wysadem (profil otworu Goleniów IG 2) występują utwory paleogenu (miąższość 404 m), wykształcone jako wapienie organodetrytyczne, piaskowce, węgliste piaski kwarcowe i kwarcowo-glaukonitowe, mułowce, iłowce oraz pokłady węgla brunatnego (Czapowski i in., 2005).

Na osady czwartorzędu – ponad wysadem o miąższości 35 m, poza nim ich grubość sięga 35 m – składają się (Piotrowski, 1982):

- utwory plejstoceniowe w nadkładzie wysadu, reprezentowane przez gliny zwałowe, piaski, żwiry, mułki i ły,
- osady holocenu – piaski i torfy.

Stosunki hydrogeologiczne w otoczeniu i nadkładzie wysadu

W utworach osadowych ponad wysadem Goleniów i w jego otoczeniu występują prawdopodobnie cztery piętra wodonośne, ułożone odpowiednio w utworach czapy wysadu, kredy, paleogenu i plejstocenu (Czochal, 2013).

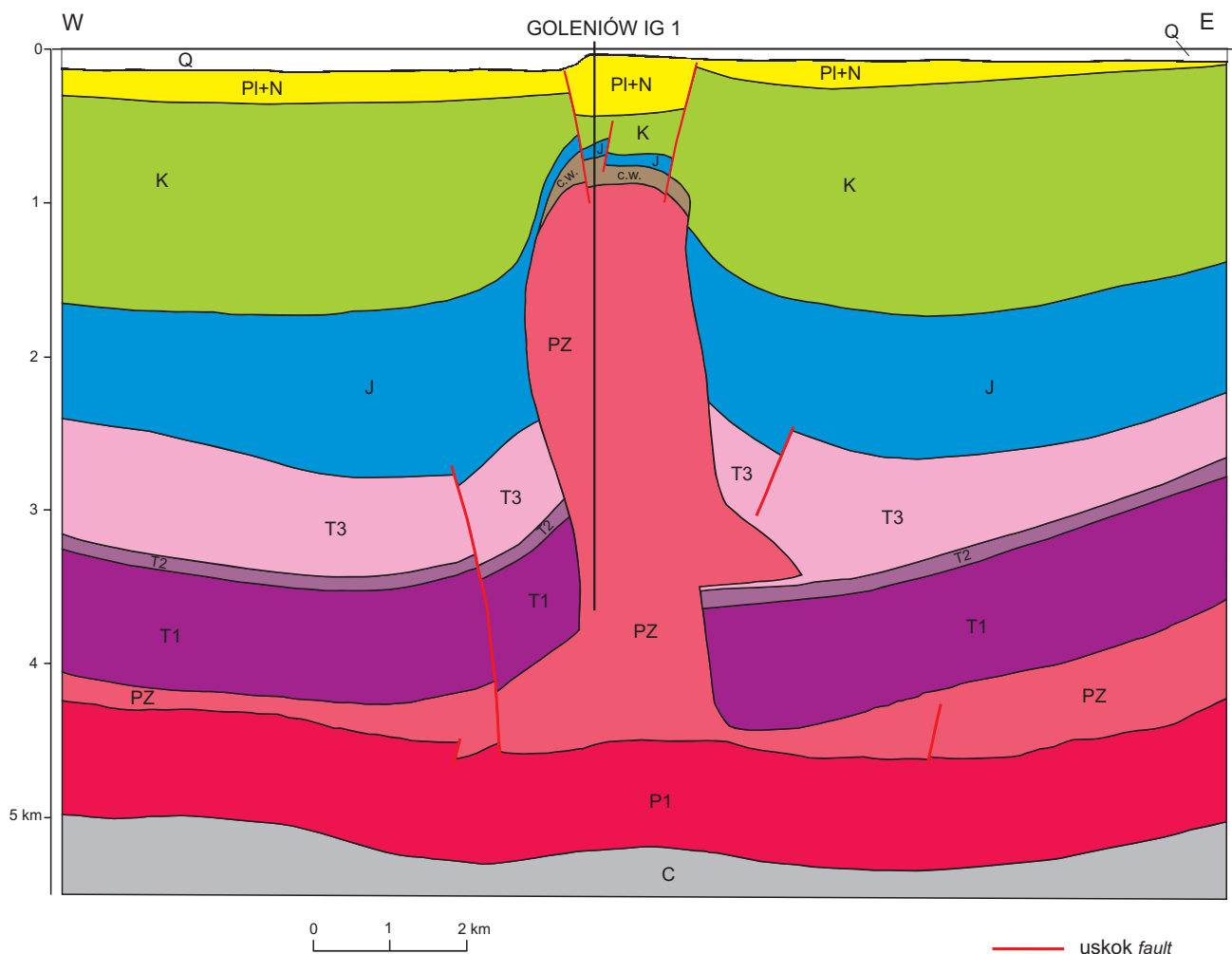


Fig. 3. Uproszczony przekrój przez wysad solny Goleniów na podstawie danych sejsmicznych (wg Czochoła, 2013, zmienione)

Q – czwartorzęd, Pl+N – paleogen + neogen, K – kreda, J – jura, T3 – trias górny, T2 – trias środkowy, T1 – trias dolny, PZ – utwory cechsztynu z ewaporatami, P1 – perm dolny, C – karbon, c.w. – utwory czapy wysadu, Goleniów IG 1 – otwór wiertniczy

Simplified section of the Goleniów salt dome based on seismic data (after Czochoł 2013, modified)

Q – Quaternary, Pl+N – Paleogene + Neogene, K – Cretaceous, J – Jurassic, T3 – Upper Triassic, T2 – Middle Triassic, T1 – Lower Triassic, PZ – Zechstein deposits with evaporites, P1 – Lower Permian, C – Carboniferous, c.w. – cap rock, Goleniów IG 1 – borehole

WYSAD SOLNY DAMASŁAWEK

Wysad solny Damasławek znajduje się na obszarze województwa kujawsko-pomorskiego, na SE od wysadu solnego Wapno (fig. 2), ok. 60 km na zachód od PMRiP Góra i ok. 30 km na NW od kopalni soli Mogilno. Należy on do ciągu struktur solnych Piła–Wapno–Damasławek–Mogilno o przebiegu z NW na SE (Tarka, 1992). Wysad Damasławek wraz z położonym ku NW wysadem Wapno wyrasta z częściowo przebiegającej się antykliny solnej, stanowiącej prawdopodobnie południowo-wschodnią kontynuację poduszki solnej Piły (Garlicki, Szybist, 1988). Spąg utworów cechsztynu w rejonie wysadu znajduje się na głębokości ok. 6 km, a wspólną cechą wszystkich trzech wysadów tej strefy jest elipsoidalny kształt, o biegu dłuższej osi NW–SE, podobnie jak większości struktur wysadowych na Niziu Polskim (Tarka, 1992).

Wysad Damasławek odkryto w 1958 r. dzięki badaniom sejsmicznym (patrz: Werner, 1974a, b; Kornowska, 1983). Wiercenia wykonane w latach 1960–1961 oraz dodatkowe badania geofizyczne pozwoliły wstępnie rozpoznać budowę wysadu (Mrozek i in., 1961), opracować dokumentację geologiczną zasobów soli (Werner, 1974b; Kornowska, 1983) oraz dokumentację hydrogeologiczną (Brożek, Tatarski, 1983). Wysad Damasławek budził zainteresowanie jako potencjalne miejsce przyszłego podziemnego składowiska odpadów promieniotwórczych (np. Garlicki, 1997, 1998; Jaroński i in., 2000; Krzywiec i in., 2000; Rasała, 2000; Twarogowski i in., 2002). W ostatnich latach sejsmiczne i otworowe rozpoznanie budowy wysadu, ukierunkowane na budowę kavern magazynowych, jest prowadzone przez firmę Gaz-System S.A. w ramach uzyskanej koncesji (dane wyników tych badań nie są dotąd ogólnie dostępne).

Tabela 3

Zaktualizowany syntetyczny profil otworu wiertniczego Goleniów IG 1 (Czochal, 2013)

Simplified profile of the Goleniów IG 1 borehole (Czochal, 2013)

Nazwa i symbol otworu wiertniczego	Głębokość końcowa otworu [m]	Utwory mezo-kenozoiku											
		czwartorzęd			paleogen i neogen			kreda			jura		
		strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Goleniów IG 1	3649,00	0,00	35,00	35,00	35,00	439,00	404,00	439,00	621,00	182,00	621,00	708,00	87,00

Nazwa i symbol otworu wiertniczego	Czapa wysadu			Seria solna			Utwory permu – cyklotem PZ3					
	strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość	A3			Ca3		
							strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość
1	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Goleniów IG 1	702,20	888,00	185,80	888,00	3649,00	2761,00	2962,40	2994,70	32,30	2994,70	2999,00	4,30

Nazwa i symbol otworu wiertniczego	Utwory permu – cyklotem PZ2								
	A2r			Na2			K2		
	strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość
1	27	28	29	30	31	32	33	34	35
Goleniów IG 1	2999,00	2999,60	0,60	888,00	2962,40	2074,40	1720,00	1736,00	16,00
				2999,60	3649,00	629,00	1781,00	1800,00	19,00
							2999,60	3020,00	20,40
							3291,00	3298,00	7,00
							3348,50	3354,90	6,40
							3404,00	3410,70	6,70
							3460,70	3467,20	6,50

Wysad solny Damasławek zbadano za pomocą geoelektryki (Twarogowski i in., 2002), sejsmiki refrakcyjnej, przeświełań sejsmicznych, naftowych danych sejsmicznych (por. Wolnowski, 1993; Dadlez, 2001) oraz za pomocą płytkiej wysokorozdzielczej sejsmiki (Krzywiec i in., 2000). Łącznie od 1958 do 1998 r. wykonano 31 profili sejsmicznych, przechodzących przez teren wysadu. Firma Gaz-System S.A. w ramach uzyskanej koncesji rozpoznawczej wykonała w latach 2014–2015 osiem przekrojów sejsmicznych (Czapowski i in., 2013) w celu dokładnego określenia kształtu wysadu oraz opracowała jego model 3D.

Wysad w świetle dostępnych danych ma kształt rozszerzającego się nieco ku górze słupa solnego, którego strop jest położony stosunkowo blisko powierzchni (fig. 4A). W interpretacji Dadleza (2001) wysad Damasławek ma bardzo regularny strop, jednak dane płytkiej sejsmiki refleksyjnej jednoznacznie pokazały, że jego czapa wraz z nadkładem kredowo-kenozoicznym jest pocięta systemem uskoków. Wysad ewoluował począwszy od triasu, a swoją obecną formę zawdzięcza syninwersyjnej kompresji (Czapowski i in., 2005).

Zasoby soli kamiennej w wysadzie Damasławek określono w 1983 r. (Kornowska, 1983) w kategorii C₂ jako bilansowe w ilości 17,69 mld ton (Szuflicki i in., 2017).

Parametry i budowa wewnętrzna wysadu

Wysad Damasławek jest jednym z największych wysadów w Polsce. W planie poziomym – na głębokości zwierciadła solnego (średnio ok. 475 m p.p.t.) – ma kształt nieregularnej elipsy o powierzchni ok. 16,5 km², której dłuższa oś ma długość 5,5 km, a krótsza – ok. 3,5 km (Kornowska, 1983). W przekroju pionowym ma on formę słupa przechylonego w kierunku południowo-zachodnim (Kornowska, 1983; Śliżowski, Saługa, 1996), otoczonego głównie przez utwory jury i kredy górnej oraz paleogenu i neogenu.

Słup solny – podobnie jak w większości wysadów na Niżu Polskim – budują ewaporaty cyklotemów PZ2, PZ3 i PZ4 (fig. 4B). Czapę gipsowo-iłową wysadu nawiercono na głębokości 184,0–835,5 m, a jej miąższość waha się od 84 do 294 m (Kornowska, 1983). Zwierciadło solne stwierdzono na głęb. 446,0–538,8 m, a grubość nawierconej serii solnej wyniosła >154,0 m. Wysokość wysadu Damasławek waha się od 4,5 do 5,5 km, licząc od podłoża cechsztynu do spągu utworów paleogenu–neogenu (Wolnowski, 1993).

Na obszarze struktury do 1983 r. odwiercono 17 otworów, w tym 15 otworów wiertniczych o głębokości >400 m do maksymalnej głębokości 1050,0 m (tab. 4). Firma Gaz-System S.A. w ramach uzyskanej koncesji rozpoznawczej wy-

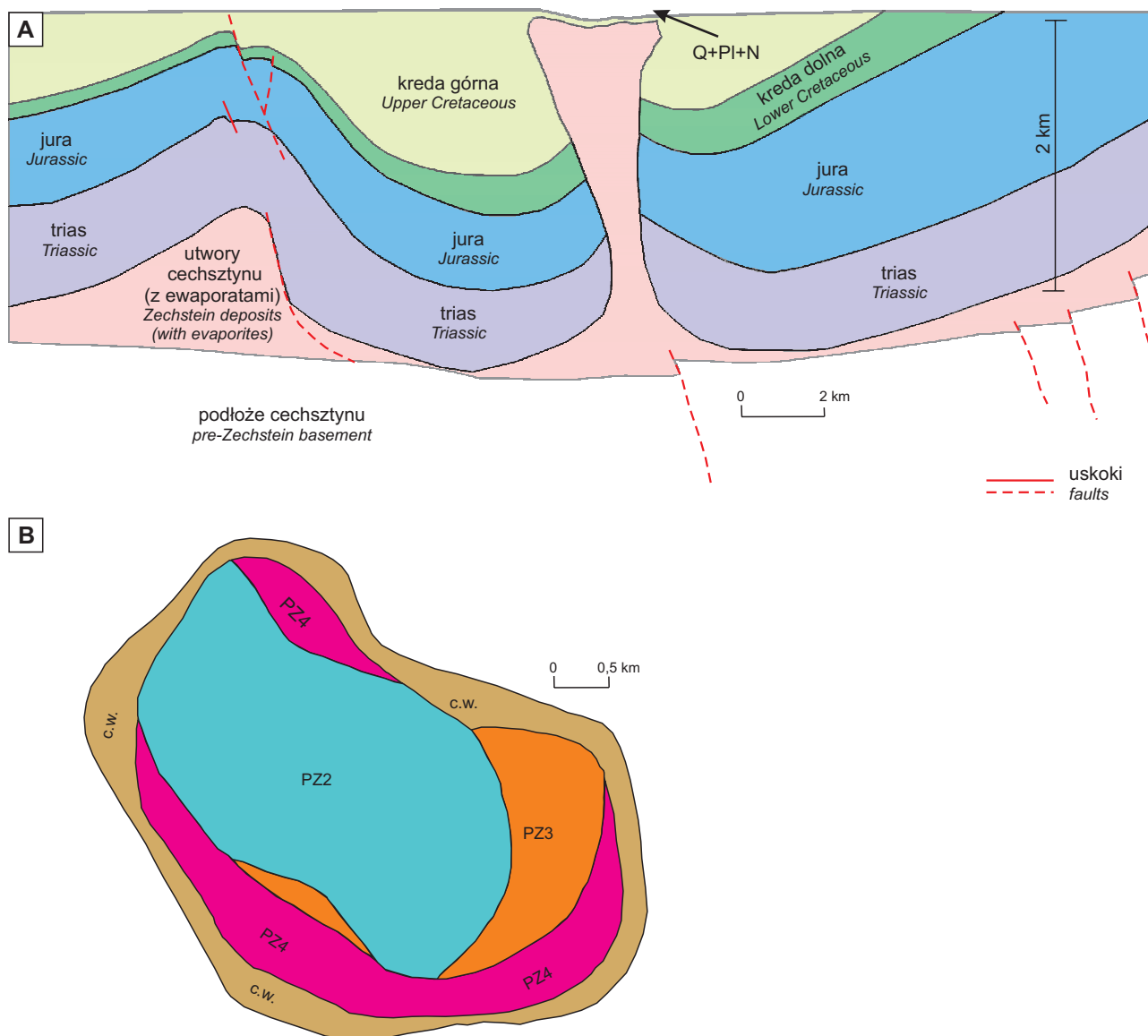


Fig. 4. Schematyczny przekrój pionowy (A) przez wysad solny Damasławek na podstawie danych sejsmicznych (wg Krzywca, 2000, 2009, zmienione) i przekrój poziomy (B) wysadu na głęb. 400 m (wg Kornowskiej, 1983, zmienione)

Q+PI+N – czwartorzęd + paleogen + neogen, utwory cechsztynu: PZ4 – cyklotem PZ4 (najmłodsza sól kamienna [Na4]), PZ3 – cyklotem PZ3 (młodsza sól kamienna [Na3] + młodsza sól potasowa [K3] + zuber brunatny [Na3t] + anhydryt główny [A3]), PZ2 – cyklotem PZ2 (starsza sól kamienna [Na2]), c.w. – utwory czapy wysadu

Schematic vertical section (A) of the Damasławek salt dome based on seismic data (after Krzywiec, 2000, 2009, modified) and the horizontal cross-section of the dome (B) at a depth of 400 m (after Kornowska, 1983, modified)

Q+PI+N – Quaternary + Paleogene + Neogene, Zechstein deposits: PZ4 – PZ4 cyclothem (Youngest Halite [Na4]), PZ3 – PZ3 cyclothem (Younger Halite [Na3] + Brownish Zuber [Na3t] + Younger Potash [K3] + Main Anhydrite [A3]), PZ2 – PZ2 cyclothem (Older Halite [Na2]), c.w. – cap rocks

konala dotąd 2 otwory wiertnicze do głęb. 2 km (dane wynikowe z tych odwiertów nie są dotąd ogólnie dostępne).

W świetle dostępnych danych wiertniczych (Kornowska, 1983) nad strukturą występują następujące utwory o grubości:

- czwartorzęd – 25,0–81,0 m,
- paleogen i neogen – 109,6–154,0 m,

– utwory czapy gipsowo-łowej wysadu nawiercono na głębokości 184,0–835,5 m i grubość jej sięga 321,2 m.

Na profil ewaporatów, budujących pień solny składają się następujące wydzielenia cechsztynu, dla których podano (tab. 4) sumaryczną miąższość:

- najmłodsza sól kamienna (Na4) – 0,0–77,7 m,

- zuber brunatny (Na3t) – 0,0–51,2 m,
- młodsza sól kamienna (Na3) – 0,0–106,5 m,
- anhydryt główny (A3) – 0,0–9,0 m,
- starsza sól kamienna (Na2) – >154,0 m.

Tabela 4

Największy zasięg na powierzchni zwierciadła solnego pod czapą wysadu wydają się mieć sole cyklotemu PZ2, a najmniejszy – PZ3 (Kornowska, 1983). W świetle dotychczasowych danych (Tarka, 1992; Ślizowski, Saługa, 1996; Marek, Pajchłowa, 1997) spośród trzech wysadów (Wapno, Damasławek, Mogilno) omawianej strefy słup solny Damasławek wydaje się mieć najprostszą budowę (fig. 4B). Jego środkową część zajmuje starsza sól kamienna (Na2), a otulinę stanowią kolejno ku zewnątrz wydzielenia solne cyklotemów PZ3 (młodsza sól kamienna [Na3] i młodsza sól potasowa [K3] oraz zubry) i PZ4 (najmłodsza sól kamienna [Na4]).

Budowa czapy wysadu

Wyniki badań sejsmicznych wykazują (Jarosiński i in., 2000), że w stropie czapy wysadu zaznacza się linijne podniesienie w części osiowej wysadu (tzw. wyniesienie centralne, o elewacji do 100 m, gdzie czapa osiąga maksymalną miąższość do 300 m) oraz ciąg mniej regularnych wyniesień wzdłuż północno-wschodniej krawędzi wysadu, zorientowanych wzdłuż linii NW–SE, zgodnie z wydłużeniem wysadu. Wyniesienia te lokują się nad wystąpieniami starszej soli kamiennej (Na2) w zwierciadle solnym. Spąg czapy wysadu jest bardziej wyrównany.

Utwory czapy wysadu Damasławek osiągają największą grubość rzędu 300 m w centrum struktury i w odróżnieniu od innych wysadów na Nizu brak tu wyraźnej przewieszki czapy nad pniem solnym, czapa otula pień stopniowo, zmniejszając swą miąższość ku brzegom struktury i zalegając coraz głębiej.

Badania Wernera (1974a, b) i Kornowskiej (1983) wskazywały na dużą różnorodność wykształcenia czapy ilowo-gipsowej wysadu. Budują ją gipsy, anhydryty, ily i ilowce szare i szaro-niebieskie, lokalnie piaskowce szare, brunatno-szare i brązowe oraz mułowce. Sporadycznie spotykane są wapienie i margle.

Zestawienie danych stratygraficznych z otworów wiertniczych wykonanych na wysadzie solnym Damasławek

Stratigraphic data from the boreholes drilled in the Damasławek salt dome

Lp.	Nazwa i symbol otworu wiertniczego	Głębokość końcowa otworu [m]	Utwory mezo-kenozoiku												Czapa wysadu			Seria solna			
			czwartorzęd						paleogen i neogen						kreda	strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość
			strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość							
			4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18				
1	Damasławek Geo-01 (Uścikowo)	473,20	0,00	33,00	33,00	33,00	245,00	112,00				245,00	466,00	221,00	466,00	473,20	7,20				
2	Damasławek Geo-08 (Ustaszewo)	494,50	0,00	50,00	50,00	50,00	279,00	115,00				279,00	488,00	209,00	488,00	494,50	6,50				
3	Damasławek Geo-09 (Junczewo)	487,80	0,00	58,00	58,00	58,00	215,00	120,00	215,00	242,00	27,00	242,00	485,00	243,00	485,00	487,80	2,80				
4	Damasławek Geo-11 (Świątkowo)	186,50	0,00	30,00	30,00	30,00	184,00	154,00				184,00	186,50	2,50							
5	Damasławek Geo-13 (Uścikowo)	491,00	0,00	44,00	44,00	44,00	211,00	110,00	211,00	263,40	52,40	263,40	486,00	222,60	486,00	491,00	5,00				
6	Damasławek Geo-17 (Świątkowo)	306,40	0,00	29,00	29,00	29,00	219,00	115,00				219,00	306,40	87,40							
7	Damasławek IG-01 (Bogdarka)	639,00	0,00	35,00	35,00	35,00	231,00	117,50	231,00	337,50	106,50	337,50	485,00	147,50	485,00	639,00	154,00				
8	Damasławek IG-02 (Świątkowo)	650,00	0,00	40,00	40,00	40,00	208,50	118,60	208,50	217,60	9,10	217,60	538,80	321,20	538,80	650,00	111,20				
9	Damasławek IG-03 (Ustaszewo)	649,00	0,00	47,00	47,00	47,00	228,00	113,60	228,00	284,50	56,50	284,50	497,00	212,50	497,00	649,00	152,00				
10	Damasławek IG-04 (Świątkowo)	601,20	0,00	81,00	81,00	81,00	235,00	115,80	235,00	315,90	80,90	315,90	448,50	132,60	448,50	601,20	152,70				
11	Damasławek IG-05 (Świątkowo)	650,00	0,00	28,60	28,60	28,60	189,40	110,40	189,40	202,20	12,80	202,20	496,30	294,10	496,30	650,00	153,70				
12	Damasławek IG-06 (Ustaszewo)	638,30	0,00	50,00	50,00	50,00	259,50	117,80	259,50	291,50	32,00	291,50	485,50	194,00	485,50	638,30	152,80				
13	Damasławek IG-07 (Uścikowo)	600,00	0,00	42,00	42,00	42,00	230,00	117,10	230,00	285,00	55,00	285,00	447,00	162,00	447,00	600,00	153,00				
14	Damasławek IG-08 (Uścikowo)	600,00	0,00	50,00	50,00	50,00	229,70	114,10	229,70	230,50	0,80	230,50	446,00	215,50	446,00	600,00	154,00				
15	Damasławek IG-09 (Uścikowo)	608,80	0,00	25,00	25,00	25,00	218,50	109,60	218,50	245,00	26,50	245,00	459,00	214,00	459,00	608,80	149,80				
16	Damasławek IG-11 (Junczewo)	1050,00	0,00	50,00	50,00	50,00	196,00	117,30	196,00	835,50	639,50	835,50	1050,00	214,50							
17	Damasławek IG-12 (Podobowice)	584,50	0,00	35,00	35,00	35,00	253,00	115,40	253,00	398,50	145,50	398,50	482,50	84,00	482,50	584,50	102,00				

Tabela 4 cd.

Lp.	Nazwa i symbol otworu wiertniczego	Utworthy permu – cyklotem PZ4						Utworthy permu – cyklotem PZ3									Utworthy permu – cyklotem PZ2		
		Na4			Na3t+(A3r)			Na3			A3+(Ca3+T3)			Na2					
		strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość			
1	2	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33			
1	Damaśławek Geo-01 (Uścikowo)																		
2	Damaśławek Geo-08 (Ustaszewo)	*488,00	*494,50	*6,50										*466,00	*473,20	*7,20			
3	Damaśławek Geo-09 (Junczewo)	*485,00	*487,80	*2,80															
4	Damaśławek Geo-11 (Świątkowo)																		
5	Damaśławek Geo-13 (Uścikowo)	*486,00	*491,00	*5,00															
6	Damaśławek Geo-17 (Świątkowo)																		
7	Damaśławek IG-01 (Bogdarka)													485,00	639,00	154,00			
8	Damaśławek IG-02 (Świątkowo)													538,80	650,00	111,20			
9	Damaśławek IG-03 (Ustaszewo)													538,80	649,00	110,20			
10	Damaśławek IG-04 (Świątkowo)	448,50	526,20	77,70	*550,00	*601,20	*51,20 [Na3t]	*526,20	*550,00	*23,80									
11	Damaśławek IG-05 (Świątkowo)							*496,30	*504,60	*8,30				*504,60	*650,00	*145,40			
12	Damaśławek IG-06 (Ustaszewo)				*566,50	*569,50	*3,00 [Na3t]	*562,00	*566,50	*4,50	*553,00	*562,00	*0,00 [A3]	*485,50	*638,30	*136,30 [2]			
13	Damaśławek IG-07 (Uścikowo)													447,00	600,00	153,00			
14	Damaśławek IG-08 (Uścikowo)	446,00	478,00	32,00	*478,00	*493,50	*15,50 [Na3t]	*493,50	*600,00	*106,50									
15	Damaśławek IG-09 (Uścikowo)							*459,00	*485,80	*26,80				*485,80	*608,80	*123,00			
16	Damaśławek IG-11 (Junczewo)																		
17	Damaśławek IG-12 (Podobowice)							*482,50	*484,00	*1,50				*484,00	*584,50	*100,50			

136,30 [2] – sumaryczna grubość serii solnych, w nawiasie – ilość serii solnych / total thickness of salt, in brackets number of repetitions; * – zweryfikowana stratygrafia / verified stratigraphy (G. Czapowski)

Tektonika słupa solnego i czapy wysadu

Owalny zarys wysadu o wymiarach $5,5 \times 3,5$ km przy wysokości ok. 5,5 km wskazuje, że ławice serii solnej powinny zalegać stromo, przyjmując rozkład koncentryczny, zgodny z zarysem wysadu (Czapowski i in., 2005). Z nielicznych analiz upadów warstw w rdzeniach (Tarka, 1992) wynika, że utwory cechsztyńskie zalegają obecnie pod zmiennym kątem od ok. 40 do 90° i wykazują różną orientację względem granic wysadu. Większe zróżnicowanie przestrzennej orientacji warstw zanotowano w obrębie soli cyklotemu PZ2 w centralnej części wysadu, a bardziej regularne, strome upady stwierdzono w strefach brzeżnych, budowanych przez sól cyklotemu PZ4.

Powyższe zmienności jednoznacznie wskazują na intensywne wewnętrzne pośladowanie warstw serii solnej. Oboczne sąsiedztwo soli cyklotemów PZ2 i PZ4 dokumentuje ponadto tektoniczną nieciągłość między strefą jądrową a brzeżną wysadu, wynikającą najprawdopodobniej z diapiryzmu wtórnego, czyli przebijania się soli cyklotemu PZ2 przez utwory soli cyklotemu PZ4 (Czapowski i in., 2005).

Zdecydowana większość spośród stwierdzonych uskoków w czapie wysadu (Jarosiński i in., 2000; Krzywiec i in., 2000) to uskoki wygasające w strefie zewnętrznej czapy (przedneogeńskie i wczesnomioceniczne), niektóre zaś o największych zrzutach, penetrujące nadkład i całą czapę, mogą wygasać dopiero w najwyższej partii pnia solnego. Przeważnie dyslokacje grupują się w czterech strefach, z których dwie lokują się na obrzeżach wysadu wzdłuż jego rozciągłości, a dwie przecinają wysad w poprzek.

Sam wysad jest założony na udokumentowanej sejsmicznie głębokiej dyslokacji w podłożu permu (Jarosiński i in., 2000). Należy przypuszczać, że ta dyslokacja była odpowiedzialna też za inicjację powstania dwóch pozostałych wysadów: Wapna i Mogilna.

Geologia otoczenia i nadkładu wysadu

Wysad Damaśławek obramowują strefy dyslokacyjne, wygasające w pokrywie kenozoicznej, a wzdłuż dyslokacji południowej na skraju czapy gipsowej zaklinowane

są stromo nachylone osady kredy. W planie strukturalnym zalegania stropu utworów jury górnej obie te dyslokacje o orientacji NW–SE (północna) i N–S (zachodnia) zbiegają się w okolicy otworu Sielec IG 1 (Kasiński i in., 2002, 2009). Wysad otaczają utwory jury górnej i kredy (Kicman, 1993). Ponad samym wysadem utwory kredy występują w postaci płatów o różnej grubości, pociętych skomplikowaną siecią uskoku normalnych i odwróconych (*op. cit.*). Powyżej zalegają utwory kenozoiczne o zmiennej miąższości, złożone z utworów paleogenu i neogenu (Kicman, 1993), wykształcone jako piaski kwarcowo-glaukonitowe, mułowce, piaski i mułki, węgle brunatne i „pstre” ily.

Osady plejstocenu (gliny zwałowe, piaski i żwiry) w strefie wysadu Damasławek charakteryzują się dość stałą grubością ok. 40 m (Włodek, 2004). Osady holocenu są wykształcone w postaci piasków rzecznych oraz mad i namułów organicznych.

Stosunki hydrogeologiczne w otoczeniu i nadkładzie wysadu

Nad wysadem i w jego otoczeniu stwierdzono (Kornowska, 1983) cztery piętra wodonośne: plejstocenijskie, paleogeneo-neogeneo (eocen i miocen), kredowe i cechsztyńskie (w utworach czapy wysadu), o silnej więzi hydraulicznej między sobą.

WYSAD SOLNY IZBICA KUJAWSKA

Wysad solny Izbica Kujawska jest zlokalizowany w północno-zachodnim krańcu wielkiego grzebienia/wału solnego Izbica Kujawska–Kłodawa–Łęczycza (*fig. 2*). Na mapie kompleksu permio-mezozoicznego Dadleza (1998) oznaczony jest on jako owalny wysad o wymiarach 3×2 km i osi NNE–SSW, przebijający się całkowicie przez utwory mezozoiku i obciążony od NE uskokiem.

Struktura ta nie była szerzej opisywana, stratygrafię i wykształcenie utworów nadkładu i cechsztynu omawiali Poborski (1955) i Sękiewicz (1960). Strukturę solną i jej otoczenie rozpoznano dotychczas dwoma profilami sejsmicznymi (por. Czapowski i in., 2005). Struktura ta ma podobny styl budowy do wysadu Kłodawa (por. Krzywiec, 2004a, b).

Obecny stan rozpoznania nie pozwala na określenie zasobów soli kamiennej w wysadzie.

Parametry i budowa wewnętrzna wysadu

Czapę gipsowo-iłową wysadu nawiercono na głębokości 144,0–412,0 m, jej miąższość waha się od 27,7 do 207,2 m. Zwierciadło solne stwierdzono na głębokości 224,5–563,5 m, a grubość nawierzonej serii solnej wynosi $>857,8$ m. W przekroju pionowym (*fig. 5*) wysad ma kształt asymetrycznego słupa o niemal pionowej ścianie zachodniej i łagodniej nachylonej wschodniej (Ślizowski, Saługa, 1996).

Na obszarze i w bliskim sąsiedztwie wysadu odwiercono 8 otworów wiertniczych do maksymalnej głębokości 1212,3 m,

w tym 6 otworów o głębokości >400 m (*tab. 5*). Nad wysadem występują następujące utwory o miąższości:

- czwartorzęd – 20,5–201,6 m,
- paleogen i neogen – 0,0–138,7 m,
- lokalnie (otwór K-71) stwierdzono utwory jury – 51,0 m.

Poniżej czapy wysadu, na głębokości od 224,5 do 556,5 m nawiercono nierozdzieloną serię solną cechsztynu o nawierzonej miąższości 857,8 m.

Brak jest danych o budowie wewnętrznej tej struktury solnej. Ze względu na położenie i wznoszenie się z tego samego grzbiecia solnego, co wysad solny Kłodawa, można wnioskować, że na utwory cechsztyńskie budujące wysad składają się podobne wydzielienia litostratygraficzne co w wysadzie kłodawskim, są one podobnie intensywnie wewnętrznie pofałdowane, nieciągłe i zapadają bardzo stromo.

Geologia otoczenia i nadkładu wysadu

W otoczeniu wysadu Izbica Kujawska w podłożu osadów kenozoicznych rozpoznano utwory najwyższej jury i kredy (*fig. 5*) reprezentowane przez margle i mułowce (Ślizowski, Saługa, 1996).

W okolicy struktury i w jej nadkładzie występują osady paleogenu i neogenu (*fig. 5*) wykształcone (Ciuk, 1974; Czapowski i in., 2005) jako mułowce piaszczyste i ilaste, mułki, piaski glaukonitowe, mułki, węgle brunatne i ily pstre. Sumaryczna miąższość tych osadów dochodzi do 100 m.

Utwory plejstocenijskie są wykształcone jako gliny zwałowe, ily, mułki i piaski oraz żwiry, a utwory holocenu to głównie torfy i namuły organiczne.

Stosunki hydrogeologiczne w otoczeniu i nadkładzie struktury solnej nie są bliżej rozpoznane.

WYSAD SOLNY LUBIEŃ/LUBIEŃ KUJAWSKI

Wysady solne Lubień i Łanięta, dwa prawie koncentryczne słupy solne (*fig. 2*), wyrastają z jednej większej struktury solnej, zwanej poduszką Wojszyc (por. Krzywiec, 2004a). Zostały one zidentyfikowane przez E. Janczewskiego za pomocą badań grawimetrycznych w latach 1937–1939 (por. Czapowski i in., 2005).

Wysad Lubień (nazwa potoczna, często też używa się określenia „Lubień Kujawski”) znajduje się w południowo-wschodniej części województwa kujawsko-pomorskiego, w odległości ok. 3,5 km na południowy wschód od Lubienia Kujawskiego. Został on okonturowany badaniami grawimetrycznymi i sejsmicznymi w latach: 1943–1944 oraz 1953–1961 (por. Czapowski i in., 2005). W latach 1955–1958 odwiercono otwór badawczy L-01 o głębokości 461 m, który wszedł na głębokości 217,6 m w czapę wysadu, a na głęb. 307,0 m – w sól (Ślizowski i in., 2004). Wykonano wówczas szereg opracowań geologicznych (np. Orska, 1958; Waczkowska, 1958; Werner, 1958) oraz pierwszą dokumentację geologiczną jego zasobów (Werner, 1955). W następnych latach odwiercono dalsze cztery otwory geologiczne, sięgające poniżej zwierciadła solnego, a przemysł naftowy wyko-

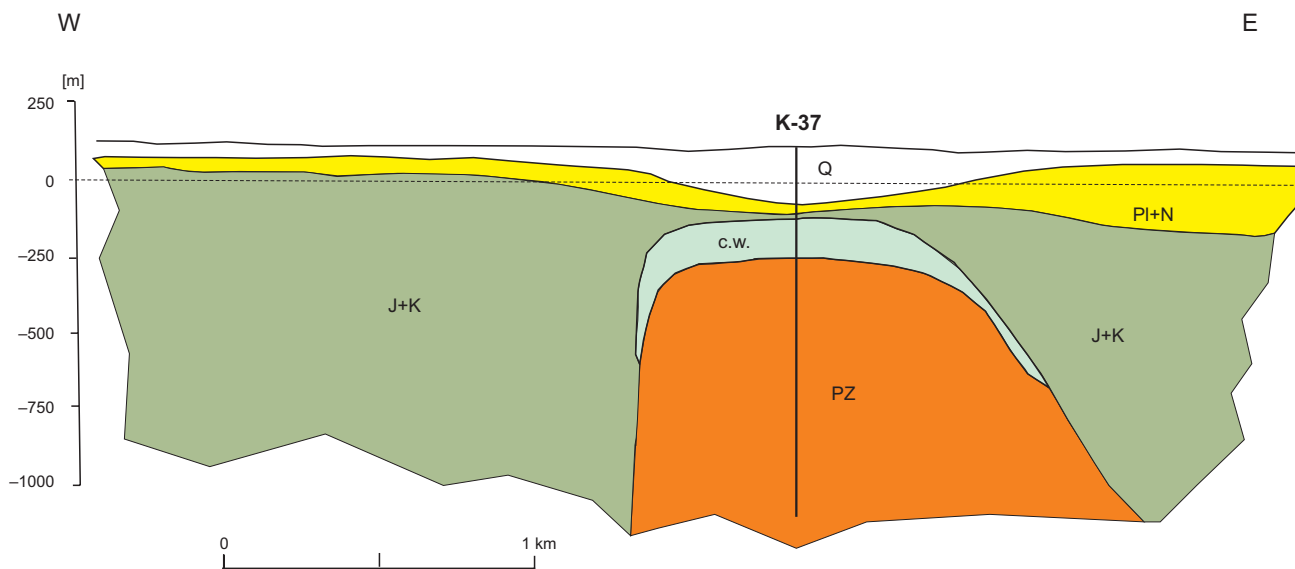


Fig. 5. Schematyczny przekrój przez wysad solny Izbica Kujawska (wg Z. Wernera w: Ślizowski i in., 2004, zmienione)

Q – czwartorzęd, Pl+N – paleogen + neogen, J+K – jura + kreda, PZ – utwory cechsztynu z ewaporatami, c.w. – czapa wysadu, K-37 – otwór wiertniczy

Simplified geological section of the Izbica Kujawska salt dome (after Z. Werner in: Ślizowski *et al.*, 2004)

Q – Quaternary, Pl+N – Paleogene + Neogene, J+K – Jurassic + Cretaceous, PZ – Zechstein deposits with evaporites, c.w. – cap rock, K-37 – borehole

Tabela 5

Zestawienie danych stratygraficznych z otworów wiertniczych wykonanych na wysadzie solnym Izbica Kujawska

Stratigraphic data from the boreholes drilled in the Izbica Kujawska salt dome

Lp.	Nazwa i symbol otworu wiertniczego	Głębokość końcowa otworu [m]	Utwory mezo-kenozoiku									
			czwartorzęd			paleogen i neogen			jura			
			strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość	
			[m]									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	K-71 (Zdrojówka)	510,00	0,00	99,00	99,00				99,00	150,00	51,00	
2	K-33 (Marcjanowo)	1002,70	0,00	289,00	289,00 [Q+Tr]							
3	K-37 (Izbica Kujawska)	1212,30	0,00	201,60	201,60	201,60	233,60	32,00				
4	K-39 (Augustynowo)	630,00	0,00	55,40	55,40	55,40	123,00	67,60				
5	K-61 (Rysiny)	357,00	0,00	72,30	72,30	72,30	211,00	138,70				
6	K-64 (Kamionka)	372,00	0,00	60,70	60,70	60,70	143,00	82,30				
7	K-67 (Izbica Kujawska)	521,00	0,00	20,50	20,50	20,50	151,00	130,50				
8	K-69 (Podtymień)	600,10	0,00	139,00	139,00	139,00	160,50	21,50				

Lp.	Nazwa i symbol otworu wiertniczego	Czapa wysadu			Seria solna		
		strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość
		[m]					
1	2	13	14	15	16	17	18
1	K-71 (Zdrojówka)	150,00	224,50	74,50	224,50	510,00	285,50
2	K-33 (Marcjanowo)	334,70	407,20	72,50	407,20	1002,70	595,50
3	K-37 (Izbica Kujawska)	233,60	354,50	120,90	354,50	1212,30	857,80
4	K-39 (Augustynowo)	300,00	327,70	27,70	327,70	630,00	302,30
5	K-61 (Rysiny)	260,40	352,20	91,80	352,20	357,00	4,80
6	K-64 (Kamionka)	143,00	350,20	207,20	350,20	372,00	21,80
7	K-67 (Izbica Kujawska)	310,10	503,50	193,40	503,50	521,00	17,50
8	K-69 (Podtymień)	412,00	556,50	144,50	556,50	600,10	43,60

[Q+Tr] – nierozdzielone utwory czwarto- i paleogeńsko-neogeńskie / undivided Cenozoic deposits

nał w otoczeniu wysadu 8 odwiertów poszukiwawczych. W 1958 r. w ramach projektu budowy kopalni solankowej (Werner, 1958) wykonano trzy odwierty hydrogeologiczne nad złożem soli w celu zbadania możliwości poboru wody z nadkładu dla kopalni. W 1975 r. w ramach projektu budowy zbiorników na etylen i produkty naftowe odwiercono 4 otwory badawczo-doświadczalne (L-17, L-18, L-19 i L-20) do głębokości 1200 m.

Wykonane w latach 50. i 60. badania refrakcyjne pozwoliły na pierwsze, wstępne okonturowanie wysadów Lubień i Łanięta (por. Czapowski i in., 2005). W latach 70. wykonano badania sejsmikią refleksyjną. Pod koniec lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku wykonano nową dokumentację geologiczną złoża soli kamiennej (Orska, 1979) wraz z dokumentacją hydrogeologiczną (Duchnowski, 1979). W obrębie i otoczeniu wysadu wykonano łącznie 27 otworów wiertniczych. W ostatnich trzech latach firma Orlen S.A. w ramach uzyskanej koncesji rozpoznawczej wykonała dotąd 3 głębokie otwory wiertnicze (dane wynikowe z tych odwiertów nie są dotąd ogólnie dostępne).

Zasoby soli kamiennej w wysadzie Lubień oceniono:

- w 1955 r. (Werner, 1955) w kategorii C₂: bilansowe – 2,49 mld ton, pozabilansowe – 1,34 mld ton;
- w 1979 r. (Orska, 1979) w kategorii C₁: bilansowe – 4,07 mld ton i jako bilansowe są ujmowane w aktualnym bilansie zasobów (Szufficki i in., 2017).

Parametry i budowa wewnętrzna wysadu

Wysad solny Lubień jest wysadem średniej wielkości. W przekroju pionowym ma on formę pionowego słupa solnego (fig. 6), a w przekroju poziomym kształt nerkowaty, o orientacji NW–SE i długości ok. 2,6 km i szerokości ok. 2,2 km. Na poziomie zwierciadła solnego dłuższa oś owalu ma długość ok. 2,5 km, a krótsza – ok. 2 km (Werner, 1955). Powierzchnię zwierciadła solnego ocenia się na ok. 3,7 km².

Czapa wysadu o grubości 81,5–169,0 m zalega na głębokości 151,5–358,0 m, a na otwory solne cechsztynu natrafiono na głębokości 303,0–441,6 m (zał. 1³) i ich nawiercona miąższość wynosi 893,0 m.

Na obszarze wysadu odwiercono 15 otworów wiertniczych (w tym 8 otworów o głębokości > 400 m) do maksymalnej głębokości 1201,0 m, nie przewiercając całej serii solnej (zał. 1). Nad wysadem występują następujące otwory o miąższości:

- czwartorzęd – 33,5–117,4 m,
- paleogen i neogen – 68,6–169,0 m,

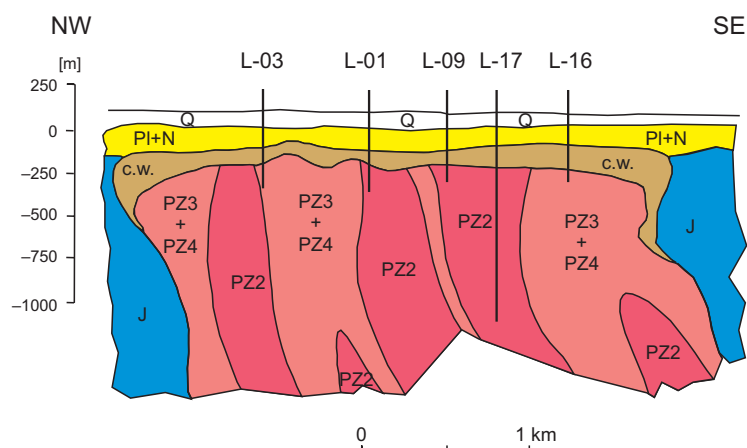


Fig. 6. Uproszczony przekrój przez wysad solny Lubień (wg K. Poborskiej-Młynarskiej w: Ślizowski i in., 2004, zmienione)

Q – czwartorzęd, PI+N – paleogen + neogen, J – jura, otwory cechsztynu: PZ4+PZ3 – cyklotem PZ4 (zuber czerwony [Na4t] + najmłodsza sól kamienna [Na4]) + cyklotem PZ3 (młodsza sól kamienna [Na3] + anhydryt główny [A3] + ew. dolomit płytowy [Ca3] + szary il solny [T3]), PZ2 – cyklotem PZ2 (starsza sól kamienna [Na2] + starsza sól potasowa [K2] + anhydryt kryjący [A2r] + anhydryt podstawowy [A2]), c.w. – otwory czapy wysadu, L-01 – otwór wiertniczy

Simplified cross-section of the Lubień salt dome (after K. Poborska-Młynarska in: Ślizowski *et al.*, 2004, modified)

Q – Quaternary, PI+N – Paleogene + Neogene, J – Jurassic, Zechstein deposits: PZ4+PZ3 – PZ4 cyclothem (Red Zuber [Na4t] + Youngest Halite [Na4]) + PZ3 cyclothem (Younger Halite [Na3] + Main Anhydrite [A3] + Platy Dolomite [Ca3] + Grey Pelite [T3]), PZ2 – PZ2 cyclothem (Older Halite [Na2] + Older Potash [K2] + Screening Anhydrite [A2r] + Basal Anhydrite [A2]), c.w. – cap rock, L-01 – borehole

- jura – 0,0–201,2 m.

Poniżej czapy wysadu występuje seria solna cechsztynu (fig. 6; zał. 1), na którą składają się następujące wydzielenia litostratygraficzne, dla których podano sumaryczną miąższość z zaznaczeniem liczby powtórzeń tektonicznych:

- zuber czerwony (Na4t) – 0,0–95,6 m,
- najmłodsza sól kamienna (Na4) – 0,0–61,4 m,
- młodsza sól kamienna (Na3) – 0,0–254,1 m, 16 powtórzeń,
- anhydryt główny (A3) i ew. dolomit płytowy (Ca3) i szary il solny (T3) – 0,0–78,7 m, 11 powtórzeń,
- anhydryt kryjący (A2r) – 0,0–10,2 m, 1–3 powtórzenia,
- starsza sól kamienna (Na2) – 0,0–359,4 m, 1–18 powtórzeń,
- starsza sól potasowa (K2) – 0,0–6,7 m,
- anhydryt podstawowy (A2) – 0,0–103,4 m, 10–15 powtórzeń.

Powyższa sukcesja dowodzi wybitnie silnych zaburzeń tektonicznych w wysadzie i jego dużej aktywności po triasie i kredzie, skutkującej usunięciem osadów obu okresów z nadkładu struktury (fig. 6).

³ Załączniki są zamieszczone w wersji online artykułu (<https://biuletynpig.pl>).

Budowa czapy wysadu

Czapa wysadu reprezentuje 2 główne typy litologiczne (Waczkowska, 1958; Werner, 1958; Orska, 1979): (a) czapa siarczanowa, pokrywająca północno-wschodnią i południową część wysadu i (b) czapa ilasta nad zachodnią częścią wysadu w obrębie wychodni utworów zubru czerwonego (Na4t). Silnie spękana czapa wysadu ma nieznacznie zróżnicowaną morfologię stropu i spągu, co odzwierciedla różnice w litologii wysadu oraz tempie erozji czapy. Najmniejsze miąższości czapa osiąga po południowo-zachodniej stronie wysadu, a największe – przy jego południowym skraju.

Tektonika słupa solnego i czapy wysadu

Dotychczasowe rozpoznanie wysadu wskazuje, że ma on postać pnia solnego pochylonego pod kątem ok. 60–70° z SE ku NW (por. Czapowski i in., 2005). Od strony NW–N na głębokości od 400 m do 600 m występuje przewieszka solna (Orska, 1979). W profilach otworów wiertniczych stwierdzono zmienną orientację warstw zarówno w przekroju poziomym, jak i pionowym przez wysad. Największe upady – zbliżone do pionowych – stwierdzono w centralnej części wysadu, a łagodniejsze – do 50° – w najwyższych partiach wysadu i przy jego obrzeżach (Tarka, 1992). Ławice soli wykazują różną orientację względem granic wysadu, co świadczy o wewnętrznym pofałdowaniu mas solnych. W centralnej części wysadu przeważają sole cyklotemu PZ2 o stromym i rosnącym z głębokością upadzie warstw. Utwory cyklotemów PZ3 i PZ4 nawiercono jedynie w 2 otworach w SW części wysadu, lecz ich pozycja strukturalna jest nieokreślona – przypuszczalnie zachowały się w szczątkowej postaci i okalają sole cyklotemu PZ2 jedynie od strony południowo-zachodniej (por. Czapowski i in., 2005).

Geologia otoczenia i nadkładu wysadu

Wysad solny leży w środkowej części antyklinorium śródpolskiego (segment kujawski – por. Żelaźniewicz i in., 2011). W nadkładzie środkowej części wysadu nie występują utwory starsze od paleogenu, natomiast na jego brzegach i w bezpośrednim sąsiedztwie pojawiają się utwory jurajskie (Orska, 1979), wykształcone jako utwory piaszczyste, ilaste i węglanowe.

Profil utworów paleogenu, nad wysadem i w jego otoczeniu, budują piaski kwarcowe i kwarcowo-glaukonitowe, z wkładkami drobnego żwirku, węgle brunatne, mułowce, ily i mułki. Sumaryczna miąższość utworów paleogenu i neogenu waha się w granicach 70–170 m, co jest związane z urozmaiconą morfologią stropu czapy wysadu, gdzie pas największych obniżzeń stropu wysadu przebiega przez środek struktury w kierunku NW–SE (por. Czapowski i in., 2005).

Osady plejstocenu są na obszarze i w otoczeniu wysadu reprezentowane przez różnoziarniste piaski i żwiry, często z otoczkami skał magmowych, metamorficznych i osadowych, mułki piaszczyste oraz przez gliny zwałowe ze żwirem i otoczkami skał skandynawskich. Miąższość osadów

plejstocenijskich jest bardzo zmienna i waha się w granicach 33,0–117,0 m, osiągając maksimum w bruzdzie depresyjnej o orientacji NW–SE w centralnej części wysadu.

Stosunki hydrogeologiczne w otoczeniu i nadkładzie wysadu

W utworach nadkładu wysadu występują dwa piętra wodonośne (Duchnowski, 1979): plejstocenijskie i neogeńskie, a poza wysadem piętro jurajskie. W obrębie czapy wysadu odnotowano występowanie piętra cechsztyńskiego (1 poziom wodonośny).

WYSAD SOLNY ŁANIĘTA

Wysad Łanięta jest nieco większy i oddalony zaledwie o 4 km na SE od wysadu Lubień (fig. 2). Został on zidentyfikowany przez E. Janczewskiego za pomocą badań grawimetrycznych w latach 1937–1939. Wysad i jego rejon rozpoznano 16 otworami wiertniczymi, nawiercającymi serię solną na odcinku 100–200 m, z których tylko 5 otworów przekroczyło głębokość 400 m. Ze względu na brak głębokich wierceń, wysad ten dotychczas nie był tak dobrze rozpoznany jak wysad Lubień.

W latach 50. i 60. wykonano na wysadzie badania refrakcyjne, które pozwoliły na pierwsze, wstępne jego okonturowanie. W latach 70. wykonano badania sejsmikią refleksyjną (Czapowski i in., 2005).

Dla struktury wykonano dwie dokumentacje geologiczne zasobów soli kamiennej (Dębski, 1963; Parecka, 1980), opisujące budowę wewnętrzną, nadkład i otoczenie struktury oraz właściwości kopaliny.

Zasoby soli kamiennej w wysadzie Łanięta oceniono w 1963 r. (Dębski, 1963), a zaktualizowano je do kategorii C₁ w 1980 r. (Parecka, 1980), podając zasoby bilansowe – 2,13 mld ton i pozabilansowe – 1,06 mld ton.

Parametry i budowa wewnętrzna wysadu

W świetle danych wiertniczych (zał. 2) czapa wysadu grubości 29,6–241,4 m zalega na głębokości 90,0–308,6 m, a serię solną cechsztynu nawiercono na głębokości 235,4–282,5 m i jej rozpoznana miąższość wynosi 257,4 m.

Na obszarze wysadu odwiercono 16 otworów wiertniczych do maksymalnej głębokości 550,0 m, nie przewiercając całej serii solnej. Nad wysadem (fig. 7) przewiercono następujące utwory o miąższości:

- czwartorzęd – 43,2–104,0 m,
- paleogen i neogen – 0,0–252,4 m.

Poniżej czapy wysadu występuje seria solna cechsztynu, na której rozpoznany profil składają się następujące wydzielienia litostratygraficzne, dla których podano sumaryczną miąższość z zaznaczeniem ilości powtórzeń tektonicznych (zał. 2):

- zuber czerwony (Na4t) – 0,0–100,8 m, 1–2 powtórzenia,
- najmłodsza sól kamienna (Na4) – 0,0–40,7 m, 1–2 powtórzenia,

- zuber brunatny (Na3t) – 0,0–104,0 m,
- młodsza sól kamienna (Na3) – 0,0–86,0 m,
- anhydryt główny (A3)– 0,0–121,6 m, 1–7 powtórzeń,
- starsza sól kamienna (Na2) – 0,0–257,4 m, 1–8 powtórzeń,
- starsza sól potasowa (K2) – 0,0–7,0 m,

Zwierciadło solne wysadu zalega dość płasko w części SE i nachyla się od połowy struktury w kierunku NW (Dębski, 1963; Parecka, 1980).

Budowa czapy wysadu

Wysad Łanięta jest przykryty czapą typu gipsowo-anhydrytowego bądź gipsowo-iłowego (Dębski, 1963; Parecka, 1980). Ma ona prawie południkowy przebieg, w jej obrębie w środkowej części wysadu częste są zjawiska krasowe.

Czapa gipsowo-iłowa występuje w partiach wysadu przylegających do granicy wysadu od wewnątrz i budują ją ropy zwietrzelinowe z niewielką zawartością gipsu w postaci przerostów, żył, gniazd oraz okruców (Dębski, 1963).

Tektonika słupa solnego i czapy wysadu

Wysad Łanięta wznosi się ku powierzchni z głębokości ok. 6,5 km z tej samej poduszki solnej co wysad Lubień, stąd domniemanie o podobnym stylu budowy wewnętrznej, szczególnie że stopień rozpoznania wiertniczego wysadu jest zbliżony. Zewnętrzne granice wysadu są niemal pionowe (fig. 7), co przy niewielkiej średnicy – ok. 3,5 km – sugeruje obecność również stromego ustawienia ławic solnych (por. Czapowski i in., 2005). Z danych otworowych wynika, że w górnej części wysadu ławice zapadają pod kątem 30–90° (Dębski, 1963), przy czym bardziej strome upady i większą ich zmienność notowano w NW części struktury. Różnicowanie orientacji warstw soli w części NW wysadu oraz obecność soli cyklotemu PZ2 o dużej miąższości w jego części E i SE wskazują na obecność w nich licznych fałdów, a także ich przebieg przez utwory młodsze i diapiryzm drugiego rzędu (por. Czapowski i in., 2005).

Geologia otoczenia i nadkładu wysadu

W nadkładzie wysadu Łanięta nie występują osady starsze od paleogenu, a w jego otoczeniu pod utworami kenozoiku nawiercono utwory jurajskie (fig. 7).

Profil osadów paleogenu i neogenu jest niemal kompletny i budują go osady węgliste z wkładkami ilastymi i piaszczystymi oraz piasków kwarcowych z glaukonitem i żwirkiem kwarcowym, mułowce, węgle brunatne, piaski i mułki oraz ropy (por. Czapowski i in., 2005).

Osady plejstocenu ponad wysadem budują piaszczyste gliny zwałowe z otoczkami skandynawskich skał magmowych i metamorficznych, rozdzielone pakietami piasków różnoziarnistych i żwirów (*op. cit.*).

Stosunki hydrogeologiczne w otoczeniu i nadkładzie wysadu

W utworach nadkładu występują dwa piętra wodonośne (Parecka, 1980): plejstocenijskie i neogenijskie, a poza jego obrębem piętro jurajskie. W czapie wysadu zarejestrowano jeden poziom wodonośny, tworzący piętro cechsztyńskie.

WYSAD SOLNY ROGÓŻNO

Wysad solny Rogóźno występuje na północ od Zgierza i na SE od Łęczycy (fig. 2), pod udokumentowanym złożem węgla brunatnego „Rogóźno”. Posiada on obszerną dokumentację, opartą o wyniki odwiertów wykonanych w ramach prac poszukiwawczych za wystąpieniami węgla. Zdaniem Ślizowskiego i in. (2004) wysad stanowi północny fragment długiej antykliny solnej (ok. 48 km długości), który przebiegał cały nadkład młodszych utworów mezozoicznych (fig. 8). Na mapie kompleksu permio-mezozoicznego Dadleza (1998) wysad ma w planie kształt owalu o wymiarach 6,7 × 4,1 km i orientacji NNW–SSE.

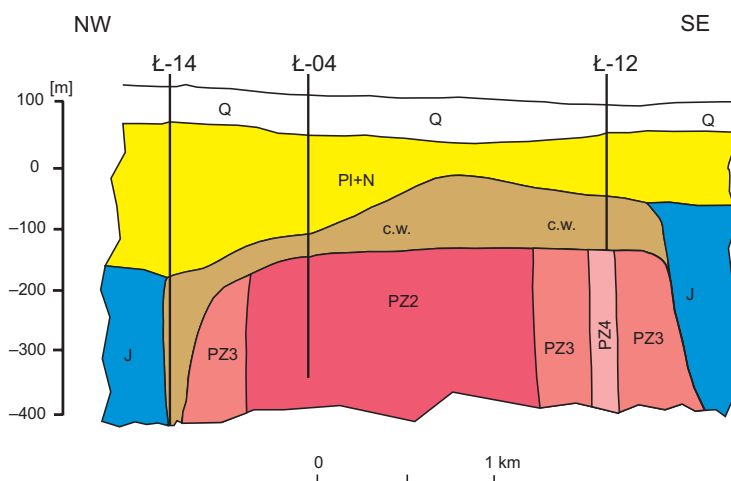


Fig. 7. Uproszczony przekrój przez wysad solny Łanięta (wg K. Pareckiej, 1980 w: Ślizowski i in., 2004, zmienione)

Q – czwartorzęd, Pl+N – paleogen + neogen, J – jura; utwory cechsztynu: PZ4 – cyklotem PZ4 (najmłodsza sól kamienna [Na4] + zuber czerwony [Na4t]), PZ3 – cyklotem PZ3 (młodsza sól kamienna [Na3] + zuber brunatny [Na3t] + anhydryt główny [A3]), PZ2 – cyklotem PZ2 (starsza sól kamienna [Na2] + starsza sól potasowa [K2] + anhydryt podstawowy [A2]), c.w. – utwory czapy wysadu, Ł-14 – otwór wiertniczy

Simplified cross-section of the Łanięta salt dome (after K. Parecka, 1980 in: Ślizowski *et al.*, 2004, modified)

Q – Quaternary, Pl+N – Paleogene + Neogene, J – Jurassic, Zechstein deposits: PZ4 – PZ4 cyclothem (Youngest Halite [Na4] + Red Zuber [Na4t]), PZ3 – PZ3 cyclothem (Younger Halite [Na3] + Brownish Zuber [Na3t] + Main Anhydrite [A3]), PZ2 – PZ2 cyclothem (Older Halite [Na2] + Older Potash [K2] + Basal Anhydrite [A2]), c.w. – cap rock, Ł-14 – borehole

Wysad solny Rogóżna (początkowo nazywany strukturą Rogóżna i stąd nazwy otworów w tym rejonie) odkryto w połowie XX wieku za pomocą badań grawimetrycznych. Początkowo prace poszukiwawcze i kartograficzne prowadzono za pomocą otworów, dopiero w latach 70. wykonano nieliczne badania refleksyjne (por. Dadlez, 2001).

Analizę pozyskanych w toku prac wiertniczych (12 otworów) materiałów rdzeniowych wykonał Jaworski (1961, 1962), omawiając również wyniki badań geofizycznych, przeprowadzonych w wybranych otworach: karotaże gamma, elektryczny, pomiary średnicy i krzywizny otworu oraz profilowanie termiczne. Wymienione materiały rdzeniowe i geofizyczne stały się podstawą do opracowania przez Charysza (1962) modelu budowy wysadu Rogóżna, wykorzystanego następnie przy sporządzeniu dokumentacji geologicznej złoża soli kamiennej w wysadzie (Dębski i in., 1963).

Zasoby soli kamiennej w wysadzie Rogóżna oszacowano w 1963 r. (Dębski i in., 1963) do głębokości 1000 m w kategorii C₂ jako zasoby bilansowe rzędu 8,6 mld ton i w tej wielkości jako bilansowe przyjęto je w aktualnym bilansie zasobów kopalin Polski (Szuflicki i in., 2017).

Parametry i budowa wewnętrzna wysadu

Wysad Rogóżna jest drugim co do wielkości – po wysadzie Kłodawa – rozpoznany wysad w Polsce, o powierzchni ok. 21 km². Ma on kształt pnia przechylonego z SW na NE i wznosi się z głębokości ok. 6 km (Dębski i in., 1963; Orska, Werner, 1987).

Na obszarze wysadu odwiercono, celem rozpoznania złoża węgla brunatnego, 181 otworów wiertniczych do maksymalnej głębokości 506,8 m. 18 otworów przekroczyło głębokość 400 m (zał. 3), nie przewiercając całej serii solnej.

Czapa wysadu grubości 12,8–286,3 m zalega na głębokości 54,5–328,8 m (Czapowski i in., 2005), a serię solną cechsztynu nawiercono na głębokości 320,9–427,0 m i jej miąższość wynosi >196,3 m. Zwierciadło solne wykazuje deniwelację powierzchni rzędu 100 m.

W świetle danych wiertniczych (Charysz, 1962; Dębski i in., 1963) nad wysadem występują następujące utwory o miąższości:

- czwartorzęd – 2,6–241,6 m,
- paleogen i neogen – 9,2–294,7 m.

Poniżej czapy wysadu występuje seria solna cechsztynu, na której rozpoznany profil składają się następujące wydzielienia litostratygraficzne, dla których podano sumaryczną miąższość z zaznaczeniem ilości powtórzeń tektonicznych (fig. 8):

- zuber brunatny (Na3t) – 13,65–196,30 m,
- młodsza sól kamienna (Na3) – 34,7–91,9 m,
- anhydryt główny (A3) i ew. dolomit płytowy (Ca3) i szary il solny (T3) – 12,5–119,4 m, 1–4 powtórzenia,
- starsza sól kamienna (Na2) – >143,65 m, 1–5 powtórzeń,
- starsza sól potasowa (K2) – 0,0–63,4 m.

Powyższa sukcesja dowodzi wybitnie silnych zaburzeń tektonicznych w strukturze solnej.

Budowa czapy wysadu

Grubość utworów czapy wysadu solnego Rogóżna zmienia się od 50 do 202 m bezpośrednio w centralnej partii struktury i osiąga ponad 500 m na jej N i SE skraju. Początkowo wyróżniono (Jaworski, 1961, 1962) cztery główne typy litologiczne utworów czapy: czapa ilowa, czapa ilowo-

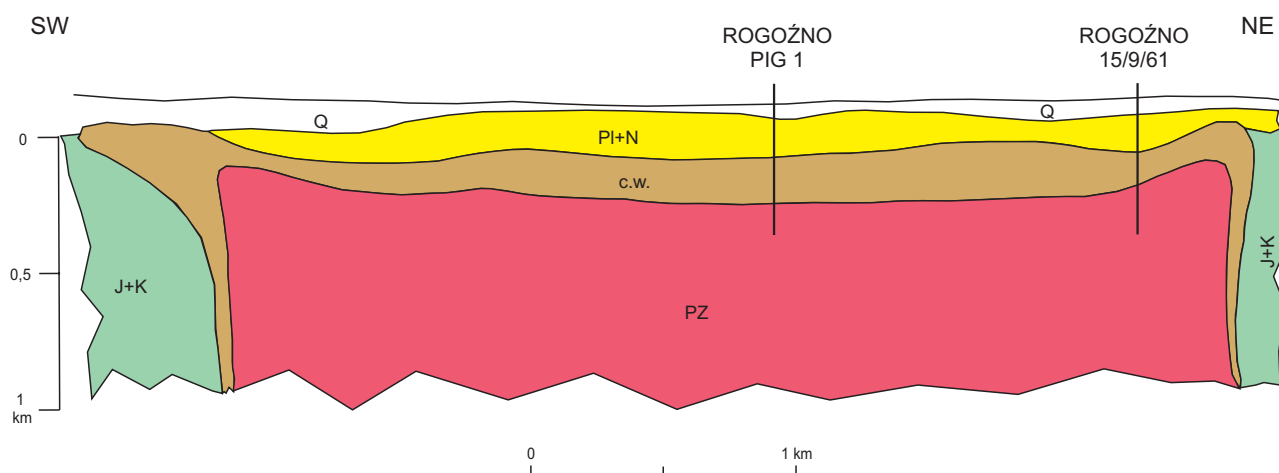


Fig. 8. Uproszczony przekrój przez wysad solny Rogóżna (wg Z. Wernera w: Ślizowski i in., 2004, zmienione)

Q – czwartorzęd, Pl+N – paleogen + neogen, J+K – jura + kreda, PZ – utwory cechsztynu z ewaporatami, c.w. – czapa wysadu, Rogóżna PIG 1 – otwór wiertniczy

Simplified geological cross-section of the Rogóżna salt dome (after Z. Werner in: Ślizowski *et al.*, 2004, modified)

Q – Quaternary, Pl+N – Paleogene + Neogene, J+K – Jurassic + Cretaceous, PZ – Zechstein deposits with evaporites, c.w. – cap rock, Rogóżna PIG 1 – borehole

-gipsowa, czapa anhydrytowa i czapa gipsowo-anhydrytowa. Typy gipsowo-anhydrytowy i anhydrytowy występują w centralnej części wysadu, a w partiach brzeżnych dominuje typ ilowy i ilowo-gipsowy (*op. cit.*). W dokumentacji złożowej wysadu Rogoźno (Dębski i in., 1963) wydzielono jedynie dwa typy czapy: ilową i gipsową.

Tektonika słupa solnego i czapy wysadu

Wewnętrzna struktura wysadu jest słabo rozpoznana, gdyż jedynie 14 otworów nawierciło na niewielką głębokość skały cechsztynu (fig. 8). Na podstawie tych informacji stwierdzono jedynie, że utwory starsze występują w centrum wysadu, są one wewnętrznie pofałdowane i najprawdopodobniej okolone utworami młodszych serii cechszyńskich. Pomiar orientacji warstw wskazuje na zróżnicowanie nachylenia ławic w obrębie wysadu od 45 do 90° (Jaworski, 1962). W ujęciu statystycznym bardziej stromo ustawione ławice występują w północnej części wysadu (średni upad ok. 70°), a łagodniej zapadające (ok. 50°) w południowej części (Tarka, 1992). Utwory serii solnych młodszych cyklotemów w strefach zewnętrznych uległy silnej redukcji, jak się przypuszcza, podczas przebijania się przez nie soli kamiennej cyklotemu PZ2.

Wyinterpretowany na podstawie otworów wiertniczych obraz czapy gipsowej ponad wysadem Rogoźno wskazuje na zróżnicowanie miąższości czapy (od 42,8 do 202 m), morfologii jej stropu oraz spągu. Według Dębskiego i in. (1963) i Charysza (1962) czapa wysadu i jego najwyższy fragment po stronie SW jest częściowo przewieszona nad ogólnym piem wysadu.

Geologia otoczenia i nadkładu wysadu

W nadkładzie wysadu Rogoźno nie występują utwory starsze od paleogenu, natomiast od strony NE i E przylegają do pnia solnego osady jury górnej, przykryte ku N przez kredę dolną, a po zachodniej stronie wysadu – także przez kredę środkową i górną.

Profil paleogenu i neogenu budują ropy węgliste, piaski kwarcowe, miejscami zawęglone, mułki i ropy, pokłady węgla brunatnego i łupki węgliste (Czapowski i in., 2005).

Utwory plejstocenu, o miąższości przeważnie od 22,0 do 60,0 m (maksymalnie 118 m) to piaski i żwiry, mułki i ropy oraz gliny zwałowe (Ciuk, Marzec, 1960).

Osady holocenu to piaski oraz podrzędnie torfy i namuły organiczne.

Stosunki hydrogeologiczne w otoczeniu i nadkładzie wysadu

W rejonie wysadu Rogoźno występuje kilka pięter wodonośnych (Bieniewski, 1962; Dębski i in., 1963):

- piętro holoceno-plejstoceno (3 poziomy wodonośne),
- piętro neogeno (3 poziomy wodonośne),
- piętro paleogeno (2 poziomy wodonośne),

- piętro kredowe (występujące poza wysadem, z jednym górnokredowym poziomem wodonośnym),
- piętro jurajskie (występujące poza wysadem, z jednym poziomem wodonośnym),
- piętro cechszyńskie w utworach czapy wysadu.

WYSAD SOLNY DĘBINA

Wysad Dębina (fig. 2) zlokalizowany jest na obszarze złoża węgla brunatnego „Belchatów”, dzieląc je na dwie części: pole Szczerców po zachodniej stronie wysadu oraz pole Belchatów po wschodniej (Frankowski i in., 2001).

Wysad wznosi się ok. 70 m nad skrzydłem wiszącym głównego uskoku ograniczającego rów Kleszczowa od południa i prawie 500 m nad stropem utworów mezozoicznych w dnie rowu (por. Czapowski i in., 2005). Wykryto go w latach 60. za pomocą badań grawimetrycznych przy poszukiwaniach złóż węgla brunatnego (*op. cit.*). W latach następnych badania grawimetryczne były kontynuowane, a obecność wysadu potwierdził odwiert nr 45/18 w 1964 r. (Ślizowski i in., 2004). Przy opracowywaniu udostępnienia złoża węgla brunatnego w polu Belchatów wykonano w 1972 r. trzy odwierty badawcze w celu okonturowania złoża soli.

Na początku lat 70. wykonano badania sejsmiczne (badania refrakcyjne, refleksyjne oraz prześwietlenie otworowe), które określiły generalną geometrię wysadu, stwierdzając, że jego N, W i NE ściany są strome, prawie pionowe, a wysad wydłuża się w kierunku południowym (Czapowski i in., 2005). W 2000 r. wykonano badania sejsmiki refleksyjną oraz przeprowadzono zintegrowaną interpretację danych geologiczno-geofizycznych (por. Frankowski i in., 2001). Przypuszczalnie przez obszar wysadu poprowadzono dotychczas ok. 10 przekrojów sejsmicznych (J.R. Kasiński – inf. ustna).

Ponieważ wysad Dębina nie ma odrębnej dokumentacji geologicznej zasobów soli kamiennej i złoża nie jest ujmowane w bilansie zasobów (Szufficki i in., 2017), więc ich ocena jest oparta o dotychczasowe rozpoznanie struktury (np. Werner, 1974a, 1980) i ma charakter szacunkowy – ok. 0,5 mld ton wg Ślizowskiego (Ślizowski i in., 2004).

Parametry i budowa wewnętrzna wysadu

Wysad Dębina rozpoznano do głębokości ok. 500 m i ma kształt nieregularnej elipsy o dłuższej osi w kierunku W–E (zgodnie z osią rowu Kleszczowa) o wymiarach 0,6 × 0,8 km (Czapowski i in., 2005). Na tej głębokości zajmuje powierzchnię ok. 0,5 km² (Ślizowski i in., 2004). W przekroju pionowym jest to słup solny o stromo zapadających ścianach od północy, wschodu i zachodu (fig. 9). Ściana południowa jest nachylona w kierunku południowym ok. 40°. Wysad przebił utwory jury górnej i podniósł fragmenty skał kredy tak, że osłaniają one nie tylko boki wysadu, lecz całą czapę ilowo-gipsową od góry.

Serię solną cechsztynu nawiercono w 3 otworach (tab. 6) na głębokości 169,3–215,0 m i jej nawiercona grubość sięga

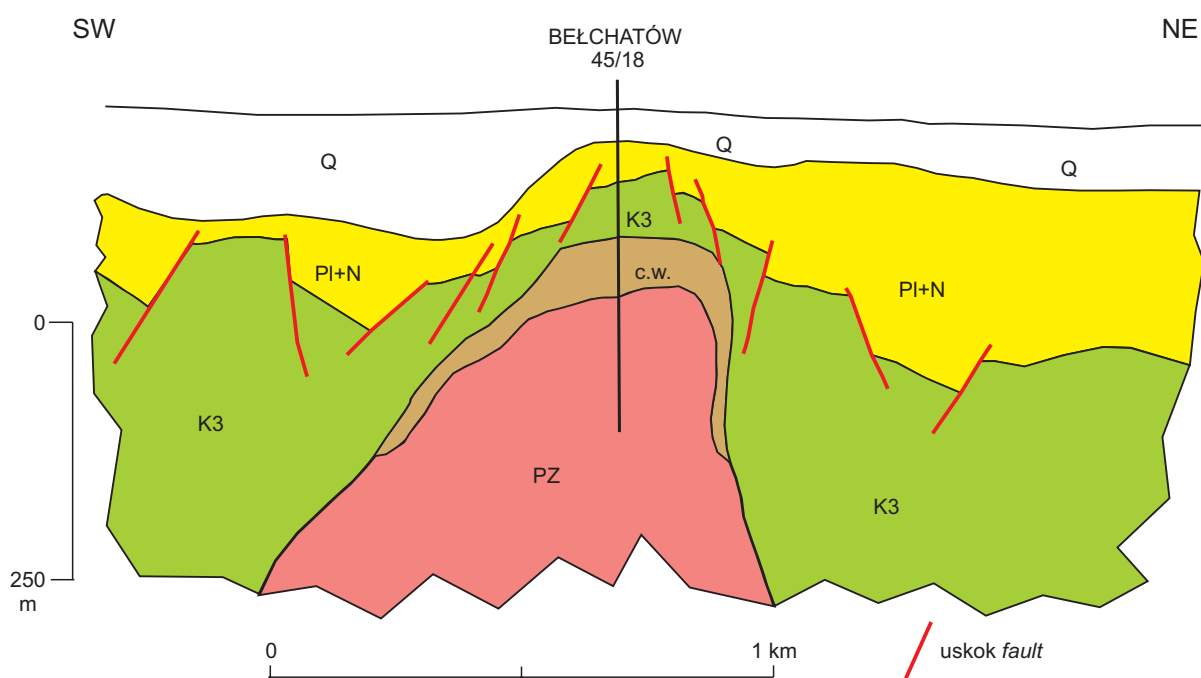


Fig. 9. Uproszczony przekrój przez wysad solny Dębina (wg A. Szybista w: Ślizowski i in., 2004, zmienione)

Q – czwartorzęd, PI+N – paleogen + neogen, K3 – kreda górna, PZ – utwory cechsztynu z ewaporatami, c.w. – czapa wysadu

Simplified geological cross-section of the Dębina salt dome (after A. Szybista in: Ślizowski *et al.*, 2004, modified)

Q – Quaternary, PI+N – Paleogene + Neogene, K3 – Upper Cretaceous, PZ – Zechstein deposits with evaporites, c.w. – cap rock

Tabela 6

Zestawienie danych stratygraficznych z otworów wiertniczych wykonanych na wysadzie solnym Dębina

Stratigraphic data from the boreholes drilled in the Dębina salt dome

Lp.	Nazwa i symbol otworu wiertniczego	Głębokość końcowa otworu [m]	Utwory mezo-kenozoiku									
			czwartorzęd			paleogen i neogen			kreda			
			strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość	
			[m]									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	Bełchatów-45/19	502,00	0,00	47,30	47,30							
2	Bełchatów-45/18	250,00	0,00	61,00	*63,00							
3	Bełchatów-45,5/17	219,30	0,00	62,00	62,00	62,00	78,00	16,00	78,00	121,00	43,00	
4	Bełchatów-46/18	147,40	0,00	*19,20	*19,20	*19,20	*80,00	*60,80	*60,80	*121,00	*60,20	

Lp.	Nazwa i symbol otworu wiertniczego	Czapa wysadu			Seria solna			Utwory permu – cyklotem PZ2 /					
								Na2			K2		
		strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość
		[m]											
1	2	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	Bełchatów-45/19	47,30	169,30	122,00	169,30	502,00	332,70	*200,10	*502,00	*222,80 [3]	*169,30	*492,50	*109,90 [3]
2	Bełchatów-45/18	*63,00	170,00	*107,00	170,00	250,00	80,00	*170,00	*250,00	*80,00			
3	Bełchatów-45,5/17	121,00	215,00	94,00	215,00	219,30	4,30	*215,0	*219,30	*4,30			
4	Bełchatów-46/18	*121,00	*147,40	*26,40									

109,90 [2] – sumaryczna grubość serii solnych, w nawiasie – liczba serii solnych / total thickness of salt, in brackets number of repetitions

* – zweryfikowana stratygrafia / verified stratigraphy (G. Czapowski)

332,7 m. Ilasto-siarczanowa czapa wysadu występuje na głębokości 47,3–121,0 m, osiągając grubość 26,4–122,0 m.

Utwory wysadu rozpoznano 4 otworami wiertniczymi (tab. 6), z których tylko jeden przekroczył głębokość 400 m. W otworach tych nad strukturą stwierdzono następujące utwory o miąższości:

- czwartorzęd – 19,2–63,0 m,
- paleogen i neogen – 0,0–60,8 m,
- kreda – 0,0–60,2 m,

Na obszarze wysadu Dębina nawiercono utwory permu w 4 otworach (zał. 3) i utwory czapy wysadu stwierdzono na głębokości od 47,3 do 121,0 m. W 3 otworach nawiercono serię solną do głębokości maksymalnie 502 m. Po weryfikacji opisu materiału rdzeniowego (patrz: Werner, 1974a) stwierdzono występowanie w przewierconych profilach głównie utworów starszej soli kamiennej (Na2), przewarstwionych się 3-krotnie – wskutek zaburzeń tektonicznych – z kompleksem starszej soli potasowej (K2). Sumaryczna nawiercona miąższość starszej soli kamiennej wynosi 222,8 m. Łączna grubość przewierconych utworów potasowych (wykształconych podobnie jak seria starszej soli potasowej [K2] wraz z tzw. warstwami przejściowymi [Na2-K2] w wysadzie kłodawskim – por. Poborska-Młynarska i in., 2004, z literaturą) wynosi 109,9 m, przy miąższości warstw zmieniającej się od 30,8 do 45,6 m.

Budowa czapy wysadu

Utwory czapy wysadu (zał. 2) są wykształcone głównie jako szarozielone i brunatne brekcje oraz warstwy zbitych gipsów grubokrystalicznych z partiami anhydrytu często z bituminami, lokalnie zailonych i silnie spękanych (Werner, 1974a).

Tektonika słupa solnego i czapy wysadu

Badania geologiczne i geofizyczne prowadzone w wysadzie Dębina wykazały, że jego ściany od strony W, N i NE są niemal pionowe, a od strony S zapadają łagodniej (Czapowski i in., 2005). W ogólnym zarysie wysad ma jednak kształt owalny o wymiarach ok. 800 × 600 m w najwyższej części i tworzy niemal pionowy słup solny, wznoszący się z głębokości ok. 3 km (Werner, 1974a, 1980; Dąbrowska, 1975). Wysad jest słabo wewnątrznie rozpoznany – nieliczne otwory wiertnicze udokumentowały obecność soli cyklotemu PZ2, które mają zmienną orientację w rdzeniach, co świadczy o tektonicznym zaangażowaniu utworów solnych i prawdopodobnie przełaźdowaniu całej serii solnej.

Dane z otworów wiertniczych wskazują, że ilasto-gipsowo-anhydrytowa czapa wysadu jest w części stropowej spękana i pocięta licznymi żyłami, głębiej stanowi jednak zwartą masę skalną (Dąbrowska, 1975). Obraz sejsmiczny wykazuje zróżnicowanie powierzchni stropowej czapy i przypuszczalną obecność uskoków, zaznaczających się w jej najwyższej części (Czapowski i in., 2005). Nie stwier-

dzono jednak kontynuacji przypuszczalnych stref uskokowych do wnętrza wysadu.

Geologia otoczenia i nadkładu wysadu

Na obszarze rowu Kleszczowa w sąsiedztwie wysadu, w bezpośrednim podłożu osadów neogeńskiej asocjacji brunatnowęglowej, występują osady jury dolnej, środkowej i górnej oraz kredy górnej z luką stratygraficzną w spągu (Mrozek, 1975; Cieśliński, Dąbrowska, 1980; Barwicz-Piskorz, Szewczyk, 1994; Smoleń, 1995).

Utwory jurajskie są wykształcone w postaci piaskowców (także dolomitycznych) i mułowców oraz wapieni, wapieni marglistych i margli. Osady górnokredowe są reprezentowane przez piaski i piaskowce, mułowce, margle, wapienie i gezy. W samym nadkładzie wysadu brak utworów jury i triasu.

Wokół wysadu i nad nim stwierdzono występowanie strefy brekcji rozwiniętych w utworach kredy i jury, powstałej podczas wysadowego stadium formowania struktury solnej. Szerokość tej strefy waha się od ok. 30 m w części południowej do ok. 200 m na południowym zachodzie, przy przeciętnej szerokości ok. 100 m.

W spągu osadów paleogeńsko-neogeńskich rowu Kleszczowa występują zwietrzliny skał kredowych i jurajskich z kongrecjami fosforytowymi i krzemieniami, które powstały prawdopodobnie w paleocenie (Czapowski i in., 2005).

W profilu utworów paleogenu i neogenu wypełniających row Kleszczowa można wyróżnić dwa piętra strukturalne: paleogeńsko-dolnomioceńskie i środkowomioceńskie (Ciuk, Piwocki, 1980). W skład piętra dolnego wchodzi trzy kompleksy litologiczne (Czarnecki i in., 1992; Kasiński, 2004): podwęglowy, węglowy i ilasto-węglowy. Osady paleogenu i neogenu osiągają największą miąższość w zachodniej części rowu Kleszczowa w bezpośrednim sąsiedztwie wysadu Dębina, gdzie ich grubość przekracza 550 m.

Nadkład asocjacji brunatnowęglowej jest zbudowany głównie z osadów plejstoceńskich, na które składają się piaski, żwiry, mułki, ropy, torfy, gytie, kreda jeziorna i diatomity (Krzyszowski, 1994) o bardzo zróżnicowanej miąższości, od 40 m na południu do ok. 200 m na północy.

Stosunki hydrogeologiczne w otoczeniu i nadkładzie wysadu

W rejonie wysadu zwierciadło wód gruntowych zostało obniżone do rzędnej 40 m p.p.m. przez otaczającą wysad barierę studni o głębokości ok. 250 m (Czapowski i in., 2005). Po 2000 r. prowadzono przebudowę bariery studni, wykonano nowe studnie o głębokości ok. 400 m w celu osiągnięcia odwodnienia górotworu wokół wysadu do rzędnej 220 m p.p.m. (Krzywiec i in., 2001; Macuda i in., 2005). Poniżej rzędnej 40 m p.p.m. występują wody o zwierciadle napiętym górnourajskiego piętra wodonośnego, związanego z kompleksem wapienno-marglistym (Bieniewski i in., 1980). Szczeliny otaczających wysad skał kredowych są wypełnione solanką (Ślizowski i in., 2004).

GEOLOGICZNA OCENA PRZYDATNOŚCI WYBRANYCH WYSADÓW SOLNYCH DO BUDOWY KAWERN MAGAZYNOWYCH WODORU

Spośród 27 przeanalizowanych wysadów solnych (w pełni bądź częściowo przebijających osady mezozoiczne), zlokalizowanych na obszarze Niziu Polskiego w utworach cechsztynu, jedynie siedem dotychczas niezagospodarowanych wysadów (fig. 2; tab. 7) spełnia przyjęte tu wymagania, stawiane budowie kawern magazynowych wodoru (minimalna grubość serii solnej rzędu 1 km, maksymalna głębokość występowania zwierciadła solnego <1 km). W ocenie przydatności celowo pominięto spełniające te warunki lecz już zagospodarowane górnictwem wysady Mogilno, Góra i Kłodawa, gdzie jest prowadzone wydobywanie soli lub ulokowane są magazyny węglowodorów oraz wysady Inowrocław i Wapno, w których zlikwidowano kopalnie podziemne. W tych ostatnich wykonywane nowe wyrobiska w wypełnionych solanką dawnych pustkach górotworu może być zbyt ryzykowne.

W tabeli 7 przedstawiono główne parametry wybranych siedmiu wysadów solnych (wymiary, głębokość występowania zwierciadła solnego i grubość serii solnej, stopień komplikacji budowy wewnętrznej, grubość czapy wysadu, stratygrafię i litologię osadów nadkładu i otoczenia wysadu, zarejestrowane piętra wodonośne, stopień zawodnienia czapy wysadu i otoczenia struktury) oraz stopień ich geologicznego rozpoznania (liczbę wykonanych otworów wiertniczych, profili sejsmicznych, sporządzonych złożowych dokumentacji geologicznych oraz zasoby soli). Informacje te były podstawą do przeprowadzenia oceny przydatności wybranych struktur do budowy kawern magazynowych wodoru, stosując pewną skalę tej przydatności: od „I” – struktura najlepsza do „0” – struktura nieprzydatna.

Przeгляд 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 kawern magazynowych (ocena I) oferuje wysad **Rogóżno** (duża powierzchnia, płytko zalegająca sól i duże jej zasoby, dość gruba czapa wysadu i wstępne rozpoznanie struktury), mimo złożonej budowy wewnętrznej i licznych pięter wodonośnych w czapie, nadkładzie i otoczeniu wysadu. Problemem jest duże złożenie węgla brunatnego w nadkładzie wysadu, które może być w przyszłości eksploatowane.

Kolejną strukturą (ocena II) jest spory wysad **Damasławek**, dość dobrze rozpoznany geologicznie, o nieco głębszym zaleganiu soli, znacznych jej zasobach i grubej czapie wysadu. Problemem jest zawodnienie czapy wysadu (dość dobrze poznane dzięki badaniom zróżnicowania jej utworów) i kontakt wzajemny wód wszystkich 4 pięter wodonośnych, co może zagrażać wzmocnionemu ługowaniem utworów pnia solnego przez odnowione wody w czapie. Należy podkreślić możliwość uzyskania nowego obrazu budowy wysa-

du, dzięki prowadzonemu obecnie przez firmę Gaz-System S.A. jego dokładnemu rozpoznaniu geologicznemu w ramach uzyskanej koncesji rozpoznawczej, z zamierzeniem zagospodarowania tej struktury jako kawernowego magazynu gazu.

Jako trzecią i czwartą strukturę w ocenie przydatności (ocena III) 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 zawodnienia w czapie. Większy wysad Łanięta oferuje, przy przyszłym lepszym rozpoznaniu, więcej możliwych stref występowania jednorodnych utworów młodszej i starszej soli kamiennych. Na wysadzie Lubień jest obecnie prowadzone przez firmę Orlen S.A. rozpoznanie geologiczne w ramach uzyskanej koncesji rozpoznawczej.

Strukturami perspektywicznymi (ocena IV), ale bardzo słabo rozpoznanymi wiertniczo, są stosunkowo niewielkie (powierzchnia 8–9 km²) wysady **Goleniów** i **Izbica Kujawska**, z których pierwszy cechuje dość prosta budowa, z 2 elewacjami pnia solnego (kształt wysadu został dokładnie poznany na podstawie badań sejsmicznych – por. Czochoł, 2013), lecz nawiercony kompleks młodszej i starszej soli kamiennych występuje w nim głębiej (na głębokości blisko 900 m). W wysadzie **Izbica Kujawska** sól zalega nieco płycej (ok. 550 m), lecz jego rozpoznanie musi być prowadzone niemal od podstaw.

Wysad **Dębina** nie jest kwalifikowany (ocena 0) jako potencjalnie korzystny obiekt do magazynowania ze względu na eksploatowane w jego bezpośrednim sąsiedztwie złożenie węgla brunatnego „Belchatów”. Nawet w momencie zaprzestania eksploatacji tego złoża w najbliższym czasie pozostaje problem długookresowego oddziaływania na wysad ogromnych odkrywkowych wyrobisk kopalni węgla. Odciążenie wysadu przez usunięcie gigantycznych ilości skał podczas eksploatacji pokładów węgla może spowodować, rozłożone w czasie, niekontrolowane procesy uruchamiania serii solnych czy nawet ich ługowania wskutek infiltracji wód z otoczenia wysadu przez zeszczerlinowane utwory czapy wysadu. W takiej sytuacji lokowanie sporych kawern magazynowych, przy braku pewności co do ich przyszłej szczelności i stabilności kształtu, wydaje się zbyt ryzykowne.

PODSUMOWANIE

Podziemne magazynowanie wodoru stanowi alternatywną formę magazynowania energii, poprzez jego zatłaczanie do podziemnych magazynów w strukturach geologicznych, w sytuacji nadwyżek energetycznych, a następnie jej uwolnienie i wykorzystanie w momencie wzrostu zapotrzebowania na energię. Taka forma magazynowania nie różni się znacząco od stosowanego od wielu lat na świecie i w Polsce podziemnego magazynowania gazu ziemnego – 680 podziemnych magazynów gazu wraz z pierwszymi doświadczeniami z podziemnym magazynowaniem wodoru w kawer-

Tabela 7

Cechy wybranych wysadów solnych z obszaru Niziny Polskiego spełniających warunki do budowy kavern magazynowych wodoru

Characteristics of selected salt domes from the Polish Lowlands favourable for location of hydrogen storage caverns

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Nazwa wysadu (skala przydatności struktury)	Forma struktury solnej / data rozpoznania	Wymiary / powierzchnia struktury solnej (km/km ²)	Stopień rozpoznania struktury solnej/ dokumentacja geologiczna (data, kategoria)	Stopień komplikacji budowy wewn. pnia solnego; wydzielenia solne	Głębokość występowania zwierciadła solnego min-maks./średnia [m]	Głębokość stropu / miąższość typ czapy struktury solnej	Maks. przewiercona grubość seri solnych [m] i wydzielenia cechsztyńskich skat niesolnych	Zagrożenia gazowo-wyztutowe	Liczba wykonanych: przekrojów sejsmicznych / głębokich otworów wiertniczych na wysadzie (głęb. 400 m)	Utworki nadkładu struktury solnej; wiek (typ osadu)	Rozpoznane utworki otoczenia struktury solnej; wiek (typ osadu)	Stopień zawodnienia utworów czapy i otoczenia struktury solnej	Udokumentowane zasoby soli (10 ⁹ t)
Goleń (IV)	wysad solny przebijający się częściowo przez utworki mezozoiczne, o dwóch kulminacjach/1962	13×3/ 30,6	średni/ dokumentacja (2013, D)	złożona; wydzielenia solne: Na2 i K2	888,0	702,2/185,8; czapa gipsowo- -łowa	2761,0; A3, Ca3, A2r	brak danych	17/1	Q (piaski, gliny i żwiry, torfy); Trz (piaski, margle, wapienie, piaskowce, iłowce i mułowce); J (piaskowce, iłowce, mułowce, wapienie, margle); T (piaskowce, iłowce, mułowce, wapienie, dolomity, margle, anhydryty)	Q (piaski, gliny i żwiry, torfy); Trz (piaski); K (margle, wapienie, piaskowce, iłowce i mułowce); J (piaskowce, iłowce, mułowce, wapienie, margle); T (piaskowce, iłowce, mułowce, wapienie, dolomity, margle, anhydryty)	4 piętra wodonośne (Plj, Trz, K, PZ), mało danych	4,9
Damastawek (II)	wysad przebijający się przez utworki mezozoiczne/1958	3,5×5,5 /16,5 [^]	dobry, dokumentacja złożowa (1983, C2); aktualnie prowadzone szczegółowe rozpoznanie sejsmiczne i wiertnicze przez Gaz-System S.A.	złożona; wydzielenia ogniw solne: Na4, Na3i, Na3, i Na2	446,0– 538,8 /475,0	184,0–835,5 /2,5–321,2	154,0; A3	brak danych	31+8 ⁺⁺ /16+2 ⁺⁺	Q (piaski, gliny i żwiry, mady, namuły organiczne); Trz (piaski, mułowce, mułki, iły, węgle brunatne)	Q (piaski, gliny i żwiry, mady, namuły organiczne); Trz (piaski, mułowce, mułki, iły, węgle brunatne); K (margle, wapienie, piaskowce, iłowce i mułowce); J (piaskowce, iłowce, mułowce, wapienie, margle)	4 piętra wodonośne (Plj, Trz, K, PZ) wody o kontaktach hydr., zawodnienie czapy	17,69*
Izbica Kujawska (IV)	wysad solny przebijający się przez utworki mezozoiczne/lata 50. XX w.	2,0×4,0 /8,0 [^]	słaby, dokumentacje otworowe	brak danych	224,5– 556,5	144,0–412,0 27,7–207,2/ czapa gipsowo- -łowa	857,8	brak danych	3/5	Q (torfy, namuły); Plj (gliny zwalowe, iły, mułki i piaski oraz żwiry); Trz (piaski, mułowce, mułki iły psste, węgle brunatne); J (margle, mułowce)	Q (torfy, namuły); Plj (gliny zwalowe, iły, mułki i piaski oraz żwiry); Trz (piaski, mułowce, mułki iły psste, węgle brunatne); J (margle, mułowce)	brak danych	1,5 [^]

Tabela 7 cd.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Lubień (III)	wysad przebijający się przez utwory mezozoicz- ne/lata 1937–1939	2,0×2,5 /3,7 [^]	dobry; dokumentacje złożowe (1955, C2; 1979, C1)	złożona, wydzielie- nia solne: Na4t, Na4, Na3, Na2 i K2	303,0– 441,6	151,5–358,0 /81,5–169,0; czapa siarczano- wo- (gipso- wo-anhy- drytowa) -ilasta	>893,0; A3, A2r, A2, Ca2, T3	brak danych	2/8+3 ⁺⁺	Pij (piaski, gliny zwałowe i żwiry, mulki); Trz (piaski, żwiry, ility, mulki, węgiel brunatny); J (piaski, piaskowce, iłowce, ility, łupki, wapienie)	Pij (piaski, gliny zwałowe i żwiry; Trz (piaski, żwiry, ility, mulki, węgiel brunatny); J (piaski, piaskowce, iłowce, iłupki, wapienie)	3 piętra wodonosne (Pij, J, PZ), wody w czapie	4,07* 4,07*
Łanięta (III)	wysad przebijający się przez utwory mezozoicz- ne/lata 1937–1939	3,3×3,7 /9,5 [^]	dobry; dokumentacje złożowe (1980, C1)	złożona, wydzielie- nia solne: Na4t, Na4, Na3t, Na3, Na2 i K2	235,4– 282,5	90,0–308,6 /29,6–241,4; czapa siarczano- wo- (gipso- wo-anhy- drytowa) -ilasta	>257,4; A3, A2, T3	brak danych	2/4	Pij (piaski, gliny zwałowe i żwiry); Trz (piaski, żwiry, ility, mulki, węgiel brunatny);	Profil rozpoznanych osadów w otoczeniu wysady zbliżony do profilu otoczenia wysadu Lubień czapy	4 piętra wodonosne (Pij, Trz, J, PZ), zawodnienie czapy	2,13* 2,13*
Rogóźno (I)	wysad przebijający się przez utwory mezozoicz- ne/lata 50. XX w.	4,1×6,7 /21,0 [^]	dość dobry; dokumentacje złożowe (1963, C2) i otworowe	złożona, wydzielie- nia solne: Na3t, Na3, Na2 i K2	325,0– 427,0	54,5–328,8 /12,8–286,3; czapa ilasto-siar- czanowa (gipsowo- anhydryto- wa)	>196,3; A3, Ca3, T3	brak danych	2/17	Q (piaski, gliny zwałowe i żwiry, torfy i namuly organiczne); Trz (piaski, mułowce, mulki, ility, węgle brunatne); K (margle, wapienie, piaskowce, iłowce i mułowce); J (wapienie, margle)	Q (piaski, gliny zwałowe i żwiry, torfy i namuly organiczne); Trz (piaski, mułowce, mulki, ity, węgle brunatne); K (margle, wapienie, piaskowce, iłowce i mułowce); J (wapienie, margle)	6 pięter wodonos- nych (H, Pij, Trz, K, J, PZ), zawodnienie czapy	8,61* 8,61*
Dębina (0)	wysad przebijający się częściowo przez utwory mezozoicz- ne/lata 60. XX w.	0,6×0,8 /0,5 [^]	słaby; opracowania archiwalne i dokumentacje otworowe	prosta, wydzielie- nia solne: Na2 i K2	169,3– 215,0	47,3–121,0 /94,0–122,0; czapa ilasto-siar- czanowa (gipsowo- anhydryto- wa)	>332,7	brak danych	ok. 10/1	Pij (żwiry, piaski, ility, mulki, torfy, gytje, diatomity); Trz (zwietrzeli- ny, żwiry, piaski, mulki, piaski, mulki, ility, węgle brunatne, kredy jeziorne); K (brekcje, piaski, piaskowce, margle, wapienie, gezy); J (brekcje, piaskowce, mułowce, wapienie, margle)	Pij (żwiry, piaski, ility, mulki, torfy, gytje, diatomity); Trz (zwietrzeli- ny, żwiry, piaski, mulki, ity, węgle brunatne, kredy jeziorne); K (brekcje, piaski, piaskowce, margle, wapienie, gezy); J (brekcje, piaskowce, mułowce, wapienie, margle)	plytkie zaleganie wód w jurze o dużym ciśnieniu, intensywny pobór wód Pij i Trz	0,5 [^] 0,5 [^]

* – zasoby bilansowe (wg Szufflickiego i in., 2017), ^ – dane wg Ślizowskiego, Salugi (1996); Ślizowskiego i in. (2004) (zasoby perspektywiczne); Na1, Na2... – jednostki litostratigraficzne czechszynu (patrz – tab. 2), oznaczenia wieku osadów i pięter wodonosnych: H – holocen, Pij – plejstocen, Trz – paleogen i neogen, K – kreda, J – jura, T – trias, PZ – czechszyn; ++ – otwór wiertniczy wykonany w ramach koncesji rozpoznawczych (aktualnie brak dostępu do informacji geologicznej); skala przydatności struktury: I – najlepsza, II – dobra, III – średnia, IV – perspektywiczna, 0 – nieprzydatna

* – anticipated economic resources (after Szufflicki *et al.*, 2017), ^ – data after Ślizowski, Saluga (1996); Ślizowski *et al.* (2004) (prospective resources); Na1, Na2... – Zechstein lithostratigraphic units (see Tab. 2), age of deposits and aquifers: H – Holocene, Trz – Pleistocene, J – Paleogene and Neogene, K – Cretaceous, T – Jurassic, PZ – Zechstein; ++ – borehole drilled after the prospecting concession (results inaccessible); usefulness scale: I – best, II – good, III – medium, IV – prospective, 0 – negative

nach solnych w USA oraz Wielkiej Brytanii. Dlatego też w obu przypadkach wymagania stawiane obiektom geologicznym są podobne.

Jednym z optymalnych obiektów do podziemnego magazynowania wodoru są struktury geologiczne zbudowane z soli kamiennej, w której łączy się kawerny magazynowe. Specyficzne cechy soli kamiennej, np. plastyczność soli i brak jej reakcji chemicznych z gazami, gwarantują szczelność takich magazynów.

Ocena stanu wiedzy geologicznej o każdym z tych siedmiu wysadów, obejmująca ustalenie ich głównych parametrów geologicznych (wymiarów, głębokość występowanie zwiędziadła solnego i grubość serii solnej, stopień komplikacji budowy wewnętrznej, grubość czapy wysadu, stratygrafia i litologia osadów nadkładu i otoczenia wysadu, zarejestrowane piętra wodonośne, stopień zawodnienia czapy wysadu i otoczenia struktury), stopień rozpoznania wysadu (liczba wykonanych otworów wiertniczych, profili sejsmicznych oraz sporządzone złożowe dokumentacje geologiczne i zasoby soli), pozwoliła przeprowadzić wstępną ocenę przydatności wybranych wysadów do ulokowania tam kawern magazynowych wodoru.

Analiza stanu rozpoznania 27 zlokalizowanych na obszarze Niżu Polskiego wysadów solnych pozwoliła wytypować jedynie 7 niezagospodarowanych dotychczas wysadów, które spełniają przyjęte tu wymagania, stawiane budowie kawern magazynowych wodoru (minimalna grubość serii solnej rzędu 1 km, maksymalna głębokość występowania zwiędziadła solnego <1 km). Pominięto zagospodarowane górniczo wysady: Mogilno, Góra i Kłodawa, gdzie prowadzone jest wydobywanie soli lub ulokowane są magazyny węglowodorów oraz wysady Inowrocław i Wapno, gdzie zlikwidowano podziemne kopalnie.

Optymalnym wysadem do podziemnego magazynowania wodoru jest wysad solny Rogóźno, następnym w kolei jest wysad Damasławek, zaś potem w równym stopniu przydatne są bliźniacze wysady Lubień i Łanięta. Wysady Goleniów i Izbica Kujawska lokują się na końcu tej listy (wysad Izbica Kujawska wymaga kompleksowego rozpoznania geologicznego). Kolejny wysad Dębina, głównie ze względu na lokalizację w centrum eksploatowanego odkrywkowo złoża węgla brunatnego „Bełchatów”, został wykluczony z opisanej formy zagospodarowania.

Przedstawiona ocena geologicznych walorów struktur solnych Niżu Polskiego z przeznaczeniem do podziemnego magazynowania wodoru jest miarodajna – ze względu na podobne wymogi geologiczne – dla wyboru miejsc lokowania kawern magazynowych innych gazów np. gazu ziemnego czy powietrza. Charakter powyższego przeglądu, skoncentrowanego na przedstawieniu aktualnego stanu wiedzy geologicznej o wybranych wysadach, pomija aspekty techniczne i ekonomiczne, związane z wykonaniem kawern magazynowych, np. problem opłacalności ulokowania inwestycji na danej strukturze solnej czy zagospodarowania wylugowanej solanki.

Podziękowania. Autorzy dziękują Recenzentom: prof. dr. hab. inż. Krzysztofowi Bukowskiemu (AGH) i prof. dr. hab. Grzegorzowi Pieńkowskiemu (PIG-PIB) za bardzo wnikliwą analizę recenzowanej pracy oraz cenne poprawki i sugestie, podnoszące jej wartość merytoryczną.

LITERATURA

- AMID A., MIGNARD D., WILKINSON M., 2016 – Seasonal storage of hydrogen in a depleted natural gas reservoir. *Int. J. Hydrog. Energy*, **41**: 5549–5558.
- BAI M., SONG K., SUN Y., HE M., LI Y., SUN J., 2014 – An overview of hydrogen underground storage technology and prospects in China. *J. Pet. Sci. Eng.*, **124**: 132–136. doi:10.1016/j.petrol.2014.09.037.
- BARWICZ-PISKORZ W., SZEWCZYK E., 1994 – Wpływ rozpoznania stratygrafii mezozoiku na interpretacje tektoniczne rejonu złoża Bełchatów. *Konf. Nauk.–Techn. nt. „Tektonika rowu Kleszczowa – stan badań i główne zadania w aspekcie eksploatacji górniczej”*: 47–62. *Kop. Węgla Brunatnego „Bełchatów”*, Bełchatów.
- BAUER S., BEYER C., DETHLEFSEN F., DIETRICH P., DUTTMANN R., EBERT M., FEESER V., GÖRKE U., KÖBER R., KOLDITZ O., RABEL W., SCHANZ T., SCHÄFER D., WÜRDEMANN H., DAHMKE A., 2013 – Impacts of the use of the geological subsurface for energy storage: an investigation concept. *Environ. Earth Sci.*, **70**: 3935–3943. doi: 10.1007/s12665-013-2883-0.
- BIENIEWSKI J., 1962 – Problemy geologiczne złoża węgla brunatnego Rogóźno. *Kwart. Nauk.–Techn. Przem. Węgla Brunatnego*, **4**, 1. Wrocław.
- BIENIEWSKI J., KLECZKOWSKI A.S., SEWERYN L., 1980 – Hydrogeologiczne warunki i odwadnianie kopalni „Bełchatów”. *Przewodnik 52. Zjazdu Polsk. Tow. Geol.*, 71–84, Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- BROŻEK B., TATARSKI A., 1983 – Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w wysadzie solnym „Damasławek”, kat. C2. t. II, część hydrogeologiczna. *Narod. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa [3725/377]*.
- CARNOT-GANDOLPHE S., 2016 – Underground Gas Storage & LNG storage market in the World 2015–2035. Sixth edition. CEDIGAS.
- CHARYSZ W., 1962 – Budowa geologiczna wysadu solnego „Rogóźno” i związane z nim możliwości górnicze. [Pr. dypl.], AGH, Kraków. *Narod. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa [3824/80]*.
- CHMIELNIAK T., LEPSZY S., MOŃKA P., 2017 – Energetyka wodorowa – podstawowe problemy. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*, **20**, 3: 55–65.
- CHROMIK M., 2012 – Perspektywy wykorzystania kawern solnych dla celów magazynowania wodoru uzyskiwanego z okresowych nadwyżek energii elektrycznej z odnawialnych źródeł. XVII Międz. Symp. Solne QVO VADIS SAL, nt. Poeksploatacyjne zagospodarowanie wyrobisk górniczych w złożach soli, Kraków–Wieliczka, 11–13 października 2012 r.: 67–68.
- CHROMIK M., 2015 – Możliwości magazynowania energii elektrycznej w soli kamiennej w postaci wodoru w regionie nadbałtyckim. *Prz. Solny*, **11**: 44–50.

- CHROMIK M., 2016 – Koncepcja magazynowania nadwyżek energii elektrycznej w postaci wodoru w kawernach w złożach soli w Polsce – wstępne informacje. *Prz. Solny*, **12**: 11–18.
- CIESLIŃSKI S., DĄBROWSKA Z., 1980 – Budowa podłoża trzeciorzędu oraz stratygrafia permu i mezozoiku w rowie bełchatowskim. Przewodnik 52. Zjazdu Polskiego Towarzystwa Geologicznego: 7–33. Wyd. Geol., Warszawa.
- CIUK E., 1974 – Schematy litostratygraficzne paleogenu Polski poza Karpatami i zapadliskiem przedkarpackim. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **281**: 7–48.
- CIUK E., MARZEC M., 1960 – Dokumentacja geologiczna złoża węgla brunatnego Rogóźno, powiat Łęczycza, województwo łódzkie (stopień rozpoznania kategoria C₂). Narod. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa [4129/359].
- CIUK E., PIWOCKI M., 1980 – Geologia trzeciorzędu w rowie Kleszczowa i jego otoczeniu. Przewodnik 52. Zjazdu Polsk. Tow. Geol.: 56–70. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- CZAPOWSKI G., 2006 – Możliwości bezpiecznego podziemnego magazynowania węglowodorów (paliw) w strukturach geologicznych na obszarze Polski. *Prz. Geol.*, **54**, 8: 658–659.
- CZAPOWSKI G., 2017 – Potencjał zasobowy soli kamiennej i soli potasowo-magnezowych obszaru przedsudeckiego. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **469**: 105–128.
- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., 2015 – Mapy wystąpień zasobów perspektywicznych soli w Polsce jako narzędzie w projektowaniu przyszłego zagospodarowania złóż kopalni. *Prz. Solny*, **11**: 5–31.
- CZAPOWSKI G., TOMASSI-MORAWIEC H., 2012 – Stan rozpoznania geologicznego struktur solnych regionu szczecińskiego pod kątem oceny możliwości budowy w ich obrębie kawernowych magazynów i składowisk. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **448**, 1: 145–156.
- CZAPOWSKI G., KASIŃSKI J., KRZYWIEC P., POLECHOŃSKA O., TOMASSI-MORAWIEC H., WRÓBEL G., BURLIGA S., WILKOSZ P., 2005 – Ocena złóż solnych w rejonie Pomorza i Kujaw pod kątem ich przydatności do eksploatacji metodą otworową. IKS SOLINO S.A., Inowrocław.
- CZAPOWSKI G., KASIŃSKI J., KRZYWIEC P., POLECHOŃSKA O., TOMASSI-MORAWIEC H., WRÓBEL G., 2006 – Metodyka oceny kierunków zagospodarowania niedostępnych górniczo cechsztyńskich struktur solnych na obszarze Niżu Polskiego w świetle danych geologicznych. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa [1882/2006].
- CZAPOWSKI G., TOMASSI-MORAWIEC H., MISIEK G., 2007 – Podział i występowanie górnopermskich skał zubrowych w Polsce. XII Międzynarodowe Sympozjum Solne pt. „Przemysł solny w gospodarce”, Kłodawa, 11–12 października 2007 r.: 31–33.
- CZAPOWSKI G., BLIŹNIUK A., ADAMCZAK-BIAŁY T., FELTER A., FRANKOWSKI Z., JAROSIŃSKI M., KOSTRZ-SIKORA P., MAJER E., PIETRZYKOWSKI P., ROSOWIEC-KA O., SOBIEN K., SOKOŁOWSKI J., TOMASSI-MORAWIEC H., MASSAKA V., SZYSZKA Ł., 2013 – Projekt robót geologicznych w celu lepszego rozpoznania budowy geologicznej wysadu solnego Damasławek w gminach: Janowiec Wielkopolski i Żnin (powiat Żnin, woj. kujawsko-pomorskie) oraz jego otoczenia pod kątem przyszłego podziemnego bezzbiornikowego magazynowania węglowodorów. 1–70, Archiwum Gaz-System S.A., Warszawa.
- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., GAŚIEWICZ A., SADŁOWSKA K., 2015 – Obszary perspektywiczne wystąpień i zasoby przewidywane surowców chemicznych Polski na mapach w skali 1 : 200 000 – sól kamienna, sole potasowo-magnezowe i siarka. *Prz. Geol.*, **63**, 9: 561–571.
- CZAPOWSKI G., ALEKSANDROWSKI P., JAROSIŃSKI M., 2017 – Struktury solne 1 : 5000 000. *W: Atlas Geologiczny Polski* (red. nauk. J. Nawrocki, A. Becker): 1–170. PIG-PIB, Warszawa.
- CZARNECKI L., FRANKOWSKI R., KUSZNERUK J., 1992 – Syntetyczny profil litostratygraficzny utworów trzeciorzędu złoża Bełchatów. 15. Symp. „Geologia Formacji Węglonośnych Polski”, **15**: 18–23. AGH, Kraków.
- CZOCHAL S., 2013 – Dokumentacja geologiczna złoża wysadowego soli kamiennej „Goleniów” w kat. D w miejsc. Zielonczyn gm. Stepnica, Goleniów, woj. zachodniopomorskie. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa [271/2014].
- DADLEZ R. (red.), 1998 – Mapa tektoniczna kompleksu cechsztyńskiego-mezozoicznego na Niżu Polskim w skali 1 : 500 000. PIG, Warszawa.
- DADLEZ R., 2001 – Przekroje geologiczne przez bruzdę śródpolską. PIG, Warszawa.
- DADLEZ R., MAREK S., POKORSKI J. (red.), 2000 – Mapa geologiczna Polski bez utworów kenozoiku 1 : 1 000 000. PIG, Warszawa.
- DĄBROWSKA Z., 1975 – The southernmost salt-dome in Poland. *Bull. Acad. Sci.*, **23**, 1: 37–41.
- DELMASTRO Ch., LAVAGNO E., SCHRANZ L., 2016 – Energy and underground. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, **55**: 96–102.
- DĘBSKI J., 1963 – Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w wysadzie solnym Łanięta, gmina Łanięta, pow. Kutno, woj. Łódź. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa [3928/413].
- DĘBSKI J., WERNER Z., PODEMSKI M., SZANIAWSKI H., 1963 – Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w wysadzie solnym Rogóźno. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa [4129/375].
- DUCHNOWSKI Z., 1979 – Dokumentacja hydrogeologiczna złoża soli kamiennej w kategorii C₁ w wysadzie solnym Lubień. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa [12952].
- EBIGBO A., GOLFIER F., QUINTARD M., 2013 – A coupled, pore-scale model for methanogenic microbial activity in underground hydrogen storage. *Adv. Water Res.*, **61**: 74–85. doi:10.1016/j.advwatres.2013.09.004.
- FRANKOWSKI Z., JAROSIŃSKI M., KASIŃSKI J., KRZYWIEC P., PAPIERNIK B., SŁODKOWSKA B., SZEWCZYK J., TWAROGOWSKI J., WYBRANIEC S., MUSIATEWICZ M., HAŁUSZCZAK A., SZEWCZYK E., BURLIGA S., GIENKA D., JÓŹWIĄK W., ŻÓŁTOWSKI Z., 2001 – Kompleksowa analiza geofizyczno-geologiczna wysadu solnego „Dębina” i jego najbliższego otoczenia. Kopalnia Węgla Brunatnego „Bełchatów”.
- GARLICKI A. (red.), 1997 – Uzupełniające rozpoznanie wysadu solnego Damasławka, Etap 1. Arch. PAA, Warszawa.
- GARLICKI A. (red.), 1998 – Uzupełniające rozpoznanie wysadu solnego Damasławka, Etap 2. Arch. PAA, Warszawa.
- GARLICKI A., SZYBIST A., 1988 – Charakterystyka przemysłu solnego w Polsce i jego możliwości produkcyjne z uwzględnieniem rozszerzenia zasobów o sól występującą jako surowiec towarzyszący w złożach innych kopalni. 1–134, AGH, Kraków
- GAŚKA K., HOSZOWSKI A., GMIŃSKI Z., KUREK A., 2012 – Monografia podziemnych magazynów gazu w Polsce. Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Przemysłu Naftowego i Gazowniczego, Oddział Warszawa II, Warszawa.

- GÓROWSKA K., 2014 – Kawerna dla wodoru. *Chem. przem.*, **6**: 36–40.
- IORDACHE I., SCHITEA D., GHEORGHE A.V., IORDACHE M., 2014 – Hydrogen underground storage in Romania, potential directions of development, stakeholders and general aspects. *Int. J. Hydrog. Energy*, **39**: 11071–11081. doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.067.
- JACQUELIN L.-M., BADER A.-G., 2013 – Le stockage souterrain de l'énergie. *Geosciences*: 100–107.
- JAROSIŃSKI M., CZAPOWSKI G., BURLIGA S., GARLICKI A., 2000 – Badania nadkładu i czapy wysadu „Damasławek” – zintegrowany model geofizyczno-geologiczny. *Posiedz. Nauk. Państw. Inst. Geol.*, **56**: 45–16. Warszawa.
- JAWORSKI A., 1961 – Kartowanie wierceniemi zwierciadła solnego wysadu w Rogoźnie, poz. pl. SHR–8. Sprawozdanie roczne 1961. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa [14760/62].
- JAWORSKI A., 1962 – Opracowanie dokumentacji geologicznej zasobów wysadu solnego w Rogoźnie, poz. pl. SH–1c. Sprawozdanie roczne 1962 r. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa [16240/63].
- KALISKI M., SIKORA A., 2013 – Wodór a podziemne magazynowanie energii w strukturach solnych. *Prz. Solny*, **9**: 26–32.
- KANEZAKI T., NARAZAKI C., MINE Y., MATSUOKA S., MURAKAMI Y., 2008 – Effects of hydrogen on fatigue crack growth behavior of austenitic stainless steels. *Int. J. Hydrog. Energy*, **33**, 10: 2604–2619.
- KARNKOWSKI P.H., CZAPOWSKI G., 2007 – Underground hydrocarbons storages in Poland: actual investments and prospects. *Prz. Geol.*, **55**, 12/1: 1068–1074.
- KASIŃSKI J.R., 2004 – Paleogen i neogen w zapadliskach i rowach tektonicznych. *W: Budowa geologiczna Polski. Stratygrafia. Trzeciorzęd. 3: 3a* (red. T.M. Peryt, M. Piwocki): 134–161. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- KASIŃSKI J.R., CZAPOWSKI G., KRZYWIEC P., PIWOCKI M., 2002 – Halokineza a powstawanie złóż węgla brunatnego – studium przywysadowych złóż węgla z obszaru Niżu Polskiego. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa [269/2002].
- KASIŃSKI J.R., CZAPOWSKI G., PIWOCKI M., 2009 – Rola halokinezy w powstawaniu trzeciorzędowych złóż węgla brunatnego na Niżu Polskim. *Prz. Geol.*, **57**, 11: 964–975.
- KICMAN W., 1993 – Wybrane struktury solne NW Polski. *Konf. Nauk.-Tech. „Wykorzystanie wysadów solnych jako magazynów gazu ziemnego na przykładzie podziemnego magazynu gazu Mogilno”*, Piła, czerwiec 1993: 14–16.
- KIJEŃSKI J., 2005 – Dlaczego wodór. *Przem. Chem.*, **84**, 11: 799–807.
- KŁECZEK Z., RADOMSKI A., ZELJAŚ D., 2005 – Podziemne magazynowanie. *Pr. Nauk. – Monogr. CMG KOMAG*, **9**: 1–98.
- KOCHAŃSKI M., KORCZAK K., DYBIŃSKI O., KWAS M., OSIPOWICZ K., PATEJUK A., SAWICKA A., SWOCZYNA B., 2013 – Techniczne i ekonomiczne perspektywy produkcji i magazynowania wodoru w Polsce. *Acta Innov.*, **8**: 51–65.
- KORNOWSKA I., 1983 – Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w wydzie Damasławka, kat. C₂, gmina Żnin i Janowiec Wlkp., województwo bydgoskie. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa [3725/377].
- KRUCK O., CROTOGINO F., PRELICZ R., RUDOLPH T., 2013 – Overview on all Known Underground Storage Technologies for Hydrogen. *HyUnder D(4) Report, Grant agreement no.: 303417, Deliverable 3.1*: 1–93.
- KRZYSZKOWSKI D., 1994 – Quaternary stratigraphy in the Kleszczów Graben (Central Poland); a study based on sections from the „Belchatów” outcrop. *Quatern. Studies in Poland*, **12**: 21–58. Poznań.
- KRZYWIEC P., 2000 – O mechanizmach inwersji bruzdy środkowopolskiej – wyniki interpretacji danych sejsmicznych. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **393**: 135–166.
- KRZYWIEC P., 2004a – Triassic evolution of the Kłodawa salt structure: basement-controlled salt tectonics within the Mid-Polish Trough (central Poland). *Geol. Quart.*, **48**, 2: 123–134.
- KRZYWIEC P., 2004b – Basement vs. salt tectonics within the Mid-Polish Trough (central Poland) and their influence on sedimentary systems – Triassic evolution of the Kłodawa salt structure. *Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft “GeoLeipzig2004”*, Leipzig, Germany, 29.09–01.10, **34**: 259.
- KRZYWIEC P., 2009 – Geometria i ewolucja wybranych struktur solnych z obszaru Niżu Polskiego w świetle danych sejsmicznych. *Prz. Geol.*, **57**, 9: 812–818.
- KRZYWIEC P., JAROSIŃSKI M., TWAROGOWSKI J., BURLIGA S., SZEWCZYK J., WYBRANIEC S., CZAPOWSKI G., ZIENTARAP, PETECKI Z., GARLICKI A., 2000 – Geofizyczno-geologiczne badania stropu i nadkładu wysadu solnego Damasławek. *Prz. Geol.*, **48**, 11: 1005–1014.
- KRZYWIEC P., FRANKOWSKI Z., JAROSIŃSKI M., KASIŃSKI J.R., PAPIERNIK B., SŁODKOWSKA B., SZEWCZYK J., TWAROGOWSKI J., WYBRANIEC S., 2001 – Kompleksowa analiza geofizyczno-geologiczna wysadu solnego Dębina i jego najbliższego otoczenia. Arch. Kop. Węgla Brunatnego „Belchatów” S.A., Rogowiec.
- KUNSTMAN A., URBAŃCZYK K., 2013 – Podziemne magazynowanie energii: wodór w kawernach solnych – aspekty ekonomiczne. *Prz. Solny*, **9**: 20–25.
- KUNSTMAN A., POBORSKA-MŁYNARSKA K., URBAŃCZYK K., 2009 – Geologiczne i górnicze aspekty budowy magazynowych kawern solnych. *Prz. Geol.*, **57**, 9: 819–828.
- LASKOWSKA T., SZCZEBYŁO J., GAŚKA K., WILKOSZ P., 2009 – Polskie magazyny gazu ziemnego – od Mogilna do Kosakowa. *Prz. Geol.*, **57**, 9: 755–756.
- MACIEJEWSKI A., 2008 – Podziemne magazynowanie paliw płynnych. *Gospod. Surowcami. Miner.*, **24**, 3/2: 39–54.
- MACUDA J., GASIŃSKI J., KROKOSZ J., 2005 – Technologia wiercenia głębokich studni odwadniających na przykładzie wierceń realizowanych w obrębie wysadu solnego Dębina. *Prace Nauk. Inst. Górniczo-Politechniki Wrocławskiej – Konferencje*, **112**, 44: 501–512, Wrocław.
- MAREK S., PAJCHŁOWA M. (red.), 1997 – Epikontynentalny perm i mezozoik w Polsce. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **153**: 1–452.
- MARZEC A., 2007 – Energetyka wodorowa – co to oznacza dla roli węgla? *Karbo*, **2**: 109–111.
- MIECZNIK M., 2016 – Podziemne magazynowanie energii cieplnej – metody i zastosowania. *Prz. Geol.*, **64**, 7: 464–471.
- MIKULSKI S.Z., OSZCZEPALSKI S., CZAPOWSKI G., GAŚIEWICZ A., SADŁOWSKA K., MARKOWIAK M., SZTROMWASSER E., BUKOWSKI K., GIEŁŻECKA-MĄDRY D., MĄDRY S., STRZELSKA-SMAKOWSKA B., PAULO A., MICHNIEWICZ M., RADWANIEK-BAK B., CHMIELEWSKI A., KUĆ P., SIKORSKA-MAJKOWSKA M., KOŹMA J., BLIŹNIUK A., PIOTROWSKA M., KOSTRZ-SIKORA P., 2016 – Obszary i zasoby perspektywiczne wystąpień rud metali i surowców chemicznych w Polsce na mapach w skali 1 : 200 000 wraz z ich oceną surowcową oraz ograniczeniami środowiskowymi i zagospodarowania przestrzennego. *Prz. Geol.*, **64**, 9: 657–670.

- MIROWSKI T., MOKRZYCKI E., NEY R., 2015 – Energetyka wiatrowa – stan obecny i perspektywy rozwoju. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- MOKRZYCKI E. (red.), 2011 – Rozproszone zasoby energii w systemie elektroenergetycznym. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków
- MROZEK K., 1975 – Budowa geologiczna struktur wgłębnych w południowej części synklinorium łódzkiego. Zakł. Oprac. Geol. Górn. Naft. „Geonafra”, Warszawa
- MROZEK K., SOKOŁOWSKI J., WRÓBEL J., 1961 – Odkrycie wysadowej struktury solnej koło Damasławka na Kujawach. *Prz. Geol.*, **8**, 11: 579–586.
- NATURAL GAS IN THE WORLD, 2016 – Edition <http://www.cedigaz.org/documents/2016/NGW2016/NGW2016-ABSTRACT.pdf>.
- ORSKA J., 1958 – Ocena jakościowa soli kamiennej wysadu solnego w Lubieniu. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa [3928/376].
- ORSKA J., 1979 – Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w kategorii C₁ w wysadzie solnym Lubień. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa [12952].
- ORSKA J., WERNER Z., 1987 – Sole kamienne i potasowe. *W: Budowa geologiczna Polski. T. VI. Złoża surowców mineralnych* (red. R. Osika): 418–438. Inst. Geol., Warszawa.
- OZARSLAN A., 2012 – Large-scale hydrogen energy storage in salt caverns. *Int. J. Hydr. Ener.*, **37**, 9: 14265–14277. doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.07.111.
- PANFILOV M., 2016 – Underground and pipeline hydrogen storage. *W: Compendium of Hydrogen Energy Volume 2: Hydrogen Storage* (red. Gupta R.B. i in.). Distribution and Infrastructure, Woodhead Publishing: 91–115.
- PARECKA K., 1980 – Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w wysadzie solnym Łanięta, gmina Łanięta, woj. Płock, kat. C1. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa [13772].
- PFEIFFER W.T., BAUER S., 2015 – Subsurface Porous Media Hydrogen Storage – Scenario Development and Simulation. *Ener. Proc.*, **76**: 565–572.
- PIEŃKOWSKI G., 2009 – Podziemne magazynowanie węglowodorów w kawernach solnych w Polsce – wymiar strategiczny i możliwości poprawy stanu środowiska naturalnego. *Prz. Geol.*, **57**, 9: 769–797.
- PIOTROWSKI A., 1982 – Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, arkusz Police (190). Państw. Inst. Geol.: 1–82, Warszawa.
- POBORSKA-MŁYNARSKA K., BURLIGA S., CZAPOWSKI G., MISIEK G., GARLICKI A., 2004 – Możliwości utrzymania produkcji w Kopalni Soli „Kłodawa” oraz koncepcje jej likwidacji w świetle obecnego rozpoznania budowy geologicznej, zagrożeń naturalnych i geomechanicznych skutków wieloletniej eksploatacji. Etap I. Aktualizacja budowy geologicznej wysadu solnego w granicach obszaru górniczego Kopalni Soli „Kłodawa” z wnioskami dla dalszego jej funkcjonowania. Fundacja „Nauka i Tradycje Górnicze”, AGH, Kraków.
- POBORSKI J., 1955 – Zestawienie i opracowanie materiałów dla całości struktury solnej Izbica-Łęczycza. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa [3927/203].
- RASAŁA M., 2000 – Budowa geologiczna wysadu solnego Damasławka. [Pr. dypl.] cz. I, Arch. IG UAM, Poznań.
- REINISCH R., 2000 – Wybrane, istotne aspekty podziemnych magazynów gazu (u progu XXI wieku). 1–301. Wyd. PLJ, Warszawa.
- REITENBACH V., GANZER L., ALBRECHT D., HAGEMANN B., 2015 – Influence of added hydrogen on underground gas storage: a review of key issues. *Environ. Earth Sci.*, **73**, 11: 6927–6937. doi:10.1007/s12665-015-4176-2.
- SĘKIEWICZ J., 1960 — Wysad solny okolicy Izbicy Kujawskiej ze szczególnym uwzględnieniem litologii cechsztynu. [Pr. dypl.], Narod. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa [3927/243].
- SGOBBIA, NIJS W., MIGLIO de R., CHIODI A., GARGIULO M., THIEL Ch., 2016 – How far away is hydrogen? Its role in the medium and long-term decarbonisation of the European energy system. *Int. J. Hydrog. Ener.*, **41**: 19–35.
- SMOLEŃ J., 1995 – Biostratygrafia mikropaleontologiczna jury górnej na podstawie wybranych wierceń rejonu Bełchatowa. 18. Symp. „Geologia Formacji Węglonośnych Polski”: 60–63. AGH, Kraków.
- SZUFLICKI M., MALON A., TYMIŃSKI M. (red.), 2017 – Bilans zasobów kopalin i wód podziemnych Polsce wg stanu na 31 XII 2016 r. PIG-PIB, Warszawa.
- ŚLIZOWSKI J., URBAŃCZYK K. (red.), 2011 – Możliwości magazynowania gazu ziemnego w polskich złożach soli kamiennej w zależności od warunków geologiczno-górnicych. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków
- ŚLIZOWSKI K., SAŁUGA P., 1996 – Surowce mineralne Polski. Surowce chemiczne – sól kamienna. 1–178. Wyd. Centrum PPGSMiE PAN, Kraków.
- ŚLIZOWSKI K., KÖHSLING J., LANKOF L., 2004 – Uwarunkowania podziemnego składowania odpadów niebezpiecznych w Polsce. *Stud., Rozpr., Monogr.*, **129**: 1–264. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- TARKA R., 1992 – Tektonika wybranych złóż soli w Polsce na podstawie badań mezostrukturalnych. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **137**: 1–47. Warszawa.
- TARKOWSKI R., 2017a – Perspectives of using the geological subsurface for hydrogen storage in Poland. *Int. J. Hydrog. Ener.*, **42**, 1: 347–355.
- TARKOWSKI R., 2017b – Wybrane aspekty podziemnego magazynowania wodoru. *Prz. Geol.*, **65**, 5: 282–291.
- TOMCZYK P., 2009 – Szanse i bariery rozwoju energetyki wodorowej. *Pol. ener.*, **12**, 2/2: 593–607.
- TWAROGOWSKI J., BRUSZEWSKA B., CZAPOWSKI G., DĄBROWSKA B., ZIENTARA P., 2002 – Kompleksowe badanie budowy geologicznej struktur przypowierzchniowych z zastosowaniem analizy danych geologiczno-geofizycznych na przykładzie rozpoznania wysadu solnego „Damasławek” i jego otoczenia. *Prz. Geol.*, **50**, 12: 1169–1176.
- URBAŃCZYK K., 2016 – Wybrane aspekty termodynamiczne magazynowania wodoru w kawernach solnych. *Prz. Solny*, **12**: 92–97.
- WACZKOWSKA B., 1958 – Wysad solny w Lubieniu. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa [3928/388].
- WAGNER R., 1994 – Stratygrafia osadów i rozwój basenu cechsztyńskiego na Niżu Polskim. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **146**: 5–71.
- WAGNER R., 2001 – Pozycja stratygraficzna permu polskiego w standardowej skali chronostratygraficznej. *W: Budowa geologiczna Polski. T. III. Atlas skamieniałości przewodnich i charakterystycznych, cz. 1c, z. 3. Młodszy paleozoik. Perm.* (red. M. Pajchlowa, R. Wagner): 19–24. PIG, Warszawa.
- WAGNER R., PERYT T.M., 1997 – Possibility of sequence stratigraphy subdivision of the Zechstein in the Polish Basin. *Geol. Quart.*, **41**, 4: 457–474.
- WERNER Z., 1955 – Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w Lubieniu, pow. Włocławek, woj. bydgoskie. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa [3928/469].

- WERNER Z., 1958 – Opracowanie geologiczne wysadu solnego w Lubieniu. *Narod. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa* [3928/365].
- WERNER Z., 1974a – Projekt geologicznych badań rozpoznawczych wysadu solnego BEŁCHATÓW (Dębina), pow. Bełchatów, woj. łódzkie. *Narod. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa* [10719].
- WERNER Z., 1974b – Projekt badań rozpoznawczych wysadu solnego Damasławek, pow. Żnin, woj. bydgoskie. *Narod. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa* [440/74].
- WERNER Z., 1980 – Wysadowe złoża soli kamiennej Bełchatów (Dębina). *Przewodnik 52. Zjazdu Pol. Tow. Geol.*: 34–38. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- WŁODEK M., 2004 – Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, arkusz Żnin (357): 1–42. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- WOLNOWSKI T., 1993 – Budowa geologiczna wysadu solnego Damasławka w oparciu o przekroje sejsmiki refleksyjnej. *Mat. Konf. Nauk.-Tech. „Wykorzystanie wysadów solnych jako magazynów gazu ziemnego na przykładzie podziemnego magazynu gazu Mogilno”*, Piła, czerwiec 1993: 40–41.
- ZARĘBSKA K., PERNAK-MIŚKO K., 2007 – Zgazowanie węgla – perspektywa dla gospodarki wodorowej. *Gosp. Sur. Miner.*, **23**, 3: 243–255.
- ZHANG F., ZHAO P., NIU M., MADDY J., 2016 – The survey of key technologies in hydrogen energy storage. *Int. J. Hydrog. Ener.*, **41**, 33: 14535–14552.
- ŻELAŻNIEWICZ A., ALEKSANDROWSKI P., BUŁA Z., KARNKOWSKI P.H., KONON A., OSZCZYPKO N., ŚLĄCZKA A., ŻABA J., ŻYTKO K., 2011 – Regionalizacja tektoniczna Polski. KNG PAN, Wrocław.

SUMMARY

Underground storage of hydrogen is an alternative form of energy storage by its injection into underground reservoirs in geologic structures during energy surplus, and then its release and use when the energy demand increases (Fig. 1). This form of storage does not differ significantly from the underground storage of natural gas, used for many years both worldwide and in Poland – 680 underground gas storage facilities and the first experiences in underground hydrogen storage in salt caverns in the USA and Great Britain (Tab. 1) – and therefore the requirements for geologic structures are similar.

Among the optimal objects for such storage are geologic structures composed of rock salt, in which storage caverns are leached. The specific features of rock salt, such as the so-called plasticity of salt and the lack of its chemical reactions with gases, guarantee the tightness of the storage sites.

The Upper Permian (Zechstein) evaporites, represented mostly by salts – Tab. 2), occupy almost 2/3 of the territory of Poland (mainly in the Polish Lowlands). The most famous halotectonic salt structures are salt stocks and domes, completely or partially piercing the Mesozoic overburden (Fig. 2).

Analysis of the state-of-the-art of 27 salt domes in the Polish Lowlands has allowed selecting only 7 so far undeveloped ones, which meet the requirements for the construction of hydrogen storage caverns (minimum thickness of the salt body 1 km, maximum depth to the top of salt <1 km). The Mogilno, Góra and Kłodawa domes, already developed for mining, where salt is currently mined or hydrocarbon storage facilities are located, and the abandoned Inowrocław and Wapno ones, have been deliberately omitted.

The paper presents an assessment of the state-of-the-art of geological knowledge about each of the selected salt domes, including the determination of their main geological parameters (dimensions, depth to the top of salt, thickness of the salt body, degree of internal structure complication, thickness of cap rocks, stratigraphy and lithology of the overburden and surrounding formations, aquifers identified, degree of water saturation in cap rocks and surrounding formations), and the degree of their recognition (number of boreholes and seismic profiles, geological documentations of deposits, and salt resources). This assessment concerned, in turn, the following salt domes: Goleniów (Fig. 3; Tab. 3), Damasławek (Fig. 4; Tab. 4), Izbica Kujawska (Fig. 5; Tab. 5), Lubień (Fig. 6; App. 1⁴), Łanięta (Fig. 7; App. 2), Rogózno (Fig. 8; App. 3) and Dębina (Fig. 9; Tab. 6). This characterization allowed providing a valorisation of the usefulness of the selected salt domes as hydrogen storage caverns (Tab. 7).

The best salt structure for storage caverns is the Rogózno salt dome, followed by the Damasławek salt dome, and then the twin-forms of Lubień and Łanięta that are equally useful. The Goleniów and Izbica Kujawska salt domes are ranked at the end, although the latter requires a comprehensive geological survey. In turn, the Dębina salt dome is excluded from this type of development mainly due to its location in the centre of the open-pit lignite mine “Bełchatów”.

It should be emphasized that the above assessment is authoritative – due to similar geological requirements – for the selection of a locality for storage caverns for other gases, e.g. natural gas or air.

⁴ Appendix can be found in the online version of this article (<https://biuletynpig.pl>).

Zestawienie danych stratygraficznych z otworów wiertniczych wykonanych na wysadzie solnym Lubień

Stratigraphic data from the boreholes drilled in the Lubień salt dome

Lp.	Nazwa i symbol otworu wiertniczego	Głębokość końcowa otworu [m]	Utwory mezo-kenozoiku								
			czwartorzęd			paleogen i neogen			jura		
			strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość
			[m]								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Lubień Geo-8 (Narty)	489,40	0,00	78,50	78,50	78,50	156,80	78,30	156,80	358,00	201,20
2	Lubień L-01 (Dąbrowa)	461,00	0,00	97,00	97,00	97,00	217,60	120,60			
3	Lubień L-02 (Dąbrowa)	325,00	0,00	78,90	78,90	78,90	192,80	113,90			
4	Lubień L-03 (Czaple)	450,00	0,00	96,80	96,80	96,80	224,40	127,60			
5	Lubień L-04 (Czaple Nowe)	388,50	0,00	39,40	39,40	39,40	171,30	131,90	171,30	178,10	6,80
6	Lubień L-05 (Budy D)	431,50	0,00	68,50	68,50	68,50	151,50	83,00			
7	Lubień L-09 (Dąbrowa)	379,00	0,00	101,00	101,00	101,00	220,00	119,00			
8	Lubień L-10 (Czaple Nowe)	412,00	0,00	98,50	98,50	98,50	168,00	69,50			
9	Lubień L-11 (Budy Dąbrowskie)	378,00	0,00	66,00	66,00	66,00	179,00	113,00			
10	Lubień L-12 (Kolonja Narty)	500,00	0,00	91,00	91,00	91,00	174,00	83,00			
11	Lubień L-13 (Wola Olszowa)	357,00	0,00	33,50	33,50	33,50	202,50	169,00			
12	Lubień L-14 (Wola Olszowa)	400,00	0,00	117,40	117,40	117,40	186,00	68,60			
13	Lubień L-15 (Dąbrowa)	385,00	0,00	59,50	59,50	59,50	175,00	115,50			
14	Lubień L-16 (Wola Olszowa)	392,00	0,00	65,50	65,50	65,50	175,50	110,00			
15	Lubień L-17 (Dąbrowa)	1201,00	0,00	80,00	80,00	80,00	181,50	101,50			

Lp.	Nazwa i symbol otworu wiertniczego	Czapa wysadu			Seria solna			Utwory permu – cyklotem PZ4 A4a2+Na4t			Na4		
		strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość
		[m]											
		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	Lubień Geo-8 (Narty)	358,0	441,6	83,6	441,6	489,4	47,8	*441,6	*489,4	*47,8 [Na4t]			
2	Lubień L-01 (Dąbrowa)	217,6	307,0	89,4	307,0	461,0	154,						
3	Lubień L-02 (Dąbrowa)	192,8	311,5	118,7	311,5	325,0	13,5						
4	Lubień L-03 (Czaple)	224,4	305,9	81,5	305,9	450,0	144,1						
5	Lubień L-04 (Czaple Nowe)	178,1	340,0	161,9	340,0	388,4	48,4	*340,0	*383,0	*43,0 [Na4t]	*383,0	*388,4	*5,4
6	Lubień L-05 (Budy D)	151,5	314,7	163,2	314,7	431,5	116,8						
7	Lubień L-09 (Dąbrowa)	220,0	303,0	83,0	303,0	379,0	76,0						
8	Lubień L-10 (Czaple Nowe)	168,0	329,0	161,0	329,0	412,0	83,0	329,0	412,0	83,0 [Na4t]			
9	Lubień L-11 (Budy Dąbrowskie)	179,0	324,0	145,0	324,0	378,0	54,0						
10	Lubień L-12 (Kolonja Narty)	174,0	343,0	169,0	343,0	500,0	157,0	*343,0	*500,0	*95,6 [2, Na4t]	*404,6	*466,0	*61,4
11	Lubień L-13 (Wola Olszowa)	202,5	305,0	102,5	305,0	357,0	52,0						
12	Lubień L-14 (Wola Olszowa)	186,0	303,0	117,0	303,0	400,0	97,0						
13	Lubień L-15 (Dąbrowa)	175,0	307,0	132,0	307,0	385,0	78,0						
14	Lubień L-16 (Wola Olszowa)	175,5	314,0	138,5	314,0	392,0	78,0						
15	Lubień L-17 (Dąbrowa)	181,5	308,0	126,5	308,0	1201,0	893,0						

Załącznik 1 cd.
Appendix 1 cont.

Lp.	Nazwa i symbol otworu wiertniczego	Utwory permu – cyklotem PZ3						Utwory permu – cyklotem PZ2		
		Na3			A3+(Ca3+T3)			A2r		
		strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość
		[m]								
1	2	25	26	27	28	29	30	31	32	33
1	Lubień Geo-8 (Narty)									
2	Lubień L-01 (Dąbrowa)							*334,70	*350,40	*10,20 [3]
3	Lubień L-02 (Dąbrowa)									
4	Lubień L-03 (Czaple)	*305,90	*450,00	*97,00 [2]				*374,00	*374,60	*0,60
5	Lubień L-04 (Czaple Nowe)									
6	Lubień L-05 (Budy D)									
7	Lubień L-09 (Dąbrowa)									
8	Lubień L-10 (Czaple Nowe)									
9	Lubień L-11 (Budy Dąbrowskie)									
10	Lubień L-12 (Kolonja Narty)									
11	Lubień L-13 (Wola Olszowa)									
12	Lubień L-14 (Wola Olszowa)	303,00	400,00	97,00						
13	Lubień L-15 (Dąbrowa)	307,00	385,00	78,00						
14	Lubień L-16 (Wola Olszowa)	*314,00	*373,00	*53,4 [2]	*365,00	*392,00	*24,6 [2, A3]			
15	Lubień L-17 (Dąbrowa)	*432,00	*1201,00	*254,10 [16]	*542,00	*964,40	*78,70 [11, A3, Ca3, T3]			

Lp.	Nazwa i symbol otworu wiertniczego	Utwory permu – cyklotem PZ2								
		Na2			K2			A2+(Ca2+T2)		
		strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość
		[m]								
1	2	34	35	36	37	38	39	40	41	42
1	Lubień Geo-8 (Narty)									
2	Lubień L-01 (Dąbrowa)	*307,00	*461,00	*145,80 [4, Na2-K2]						
3	Lubień L-02 (Dąbrowa)	311,50	325,00	13,50						
4	Lubień L-03 (Czaple)	*372,30	*419,40	*46,50 [2]						
5	Lubień L-04 (Czaple Nowe)									
6	Lubień L-05 (Budy D)	*314,70	*431,50	*94,00 [12]				*316,40	*374,50	*22,10 [10, A2]
7	Lubień L-09 (Dąbrowa)	*303,00	*379,00	*69,30 [2]	*365,50	*372,20	*6,70			
8	Lubień L-10 (Czaple Nowe)									
9	Lubień L-11 (Budy Dąbrowskie)	324,00	378,00	54,00						
10	Lubień L-12 (Kolonja Narty)									
11	Lubień L-13 (Wola Olszowa)	305,00	357,00	52,00						
12	Lubień L-14 (Wola Olszowa)									
13	Lubień L-15 (Dąbrowa)									
14	Lubień L-16 (Wola Olszowa)									
15	Lubień L-17 (Dąbrowa)	*308,00	*1147,00	*359,40 [18]				*344,00	*1069,40	*103,4 [15]

97,00 [2] – sumaryczna grubość serii solnych, w nawiasie – liczba serii solnych / total thickness of salt, in brackets number of repetitions; * – zweryfikowana stratygrafia / verified stratigraphy (G. Czapowski)

Zestawienie danych stratygraficznych z otworów wiertniczych wykonanych na wysadzie solnym Łanięta

Stratigraphic data from the boreholes drilled in the Łanięta salt dome

Lp.	Nazwa i symbol otworu wiertniczego	Głębokość końcowa otworu [m]	Utwory mezo-kenozoiku					
			czwartorzęd			paleogen i neogen		
			strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość
			[m]					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Łanięta Ł-01	452,70	0,00	53,00	53,00	53,00	206,60	153,60
2	Łanięta Ł-02	373,20	0,00	68,20	68,20	68,20	177,60	109,40
3	Łanięta Ł-03 (Suchodębie)	500,50	0,00	94,90	94,90	94,90	104,00	9,10
4	Łanięta Ł-04 (Witoldów)	461,90	0,00	64,50	64,50	64,50	224,80	160,30
5	Łanięta Ł-05	353,00	0,00	102,00	102,00	102,00	204,20	102,20
6	Łanięta Ł-06	459,40	0,00	98,00	98,00	98,00	169,00	71,00
7	Łanięta Ł-07 (Franciszków)	344,00	0,00	104,00	104,00			
8	Łanięta Ł-08 (Nowe Budy)	301,20	0,00	49,70	49,70	49,70	117,40	67,70
9	Łanięta Ł-09 (Franciszków)	343,00	0,00	85,00	85,00	85,00	141,50	56,50
10	Łanięta Ł-10	346,00	0,00	67,20	67,20	67,20	90,00	22,80
11	Łanięta Ł-12 (Suchodębie)	336,20	0,00	48,00	48,00	48,00	148,40	100,40
12	Łanięta Ł-13 (Suchodębie)	350,00	0,00	69,40	69,40	69,40	119,80	50,40
13	Łanięta Ł-14 (Witoldów)	550,00	0,00	56,20	56,20	56,20	308,60	252,40
14	Łanięta Ł-15 (Suchodębie)	345,80	0,00	53,40	53,40	53,40	133,20	79,80
15	Łanięta Ł-16 (Budy Stare)	385,00	0,00	43,20	43,20	43,20	202,00	158,80
16	Łanięta Ł-19	360,00	0,00	55,50	55,50	55,50	138,30	82,80

Lp.	Nazwa i symbol otworu wiertniczego	Czapa wysadu			Seria solna			Utwory permu – cyklotem PZ4					
		strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość	A4a2+(Na4t)			Na4		
								strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość
		[m]											
1	2	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	Łanięta Ł-01	206,00	257,30	50,70	257,30	452,70	195,40						
2	Łanięta Ł-02	177,60	273,20	95,60	273,20	373,20	100,00						
3	Łanięta Ł-03 (Suchodębie)	104,00	243,10	139,10	243,10	500,50	257,40						
4	Łanięta Ł-04 (Witoldów)	224,80	254,40	29,60	254,40	461,90	207,50						
5	Łanięta Ł-05	204,20	252,50	48,30	252,50	353,00	100,50						
6	Łanięta Ł-06	169,00	250,00	81,00	250,00	459,40	209,40						
7	Łanięta Ł-07 (Franciszków)	104,00	241,00	137,00	241,00	344,00	103,00						
8	Łanięta Ł-08 (Nowe Budy)	117,40	301,20	183,80									
9	Łanięta Ł-09 (Franciszków)	141,50	242,30	100,80	242,30	343,00	100,70						
10	Łanięta Ł-10	90,00	242,00	152,00	242,00	346,00	104,00						
11	Łanięta Ł-12 (Suchodębie)	148,40	235,40	87,00	235,40	336,20	100,80	235,40	336,20	*100,80 [Na4t]			
12	Łanięta Ł-13 (Suchodębie)	119,80	245,20	125,40	245,20	350,00	104,80						
13	Łanięta Ł-14 (Witoldów)	308,60	550,00	241,40									
14	Łanięta Ł-15 (Suchodębie)	133,20	245,50	112,30	245,50	345,80	100,30	*245,50	*315,6	*57,80 [2, Na4t]	*291,40	*344,00	*40,70 [2]
15	Łanięta Ł-16 (Budy Stare)	202,00	282,50	80,50	282,50	385,00	102,50	*343,40	*385,00	*41,60 [Na4t]			
16	Łanięta Ł-19	138,30	248,00	109,70	248,00	360,00	112,00						

Załącznik 2 cd.
Appendix 2 cont.

Lp.	Nazwa i symbol otworu wiertniczego	Utwory permu – cyklotem PZ3								
		Na3t+(A3r)			Na3			A3+(Ca3+T3)		
		strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość
		[m]								
1	2	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	Łanięta Ł-01							*257,3	*403,1	*121,6 [4, A3 i T3]
2	Łanięta Ł-02	*273,2	*373,2	*100,0 [Na3t]						
3	Łanięta Ł-03 (Suchodębie)									
4	Łanięta Ł-04 (Witoldów)							*256,6	*448,6	*57,1 [7, A3]
5	Łanięta Ł-05									
6	Łanięta Ł-06									
7	Łanięta Ł-07 (Franciszków)	*241,0	*258,0	*17,0 [Na3t]	*258,0	*344,0	*86,0			
8	Łanięta Ł-08 (Nowe Budy)									
9	Łanięta Ł-09 (Franciszków)							*325,0	*343,0	*18,0 [A3 i T3]
10	Łanięta Ł-10	242,0	346,0	*104,0 [Na3t]						
11	Łanięta Ł-12 (Suchodębie)									
12	Łanięta Ł-13 (Suchodębie)									
13	Łanięta Ł-14 (Witoldów)									
14	Łanięta Ł-15 (Suchodębie)				*344,0	*345,8	*1,80			
15	Łanięta Ł-16 (Budy Stare)	*282,5	*343,4	*60,9 [Na3t]						
16	Łanięta Ł-19							*348,8	*360,0	*9,4 [2, A3 i T3]

Lp.	Nazwa i symbol otworu wiertniczego	Utwory permu – cyklotem PZ2					
		Na2			K2		
		strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość
		[m]					
1	2	31	32	33	34	35	36
1	Łanięta Ł-01	*303,8	*440,0	*66,8 [3]	*440,0	*447,0	*7,0 [Na2-K2]
2	Łanięta Ł-02						
3	Łanięta Ł-03 (Suchodębie)	243,1	500,5	257,4			
4	Łanięta Ł-04 (Witoldów)	*254,4	*461,9	*150,4 [8]			
5	Łanięta Ł-05	252,5	353,0	100,5			
6	Łanięta Ł-06	250,0	459,4	209,4			
7	Łanięta Ł-07 (Franciszków)						
8	Łanięta Ł-08 (Nowe Budy)						
9	Łanięta Ł-09 (Franciszków)	*242,0	*325,0	*83,0			
10	Łanięta Ł-10						
11	Łanięta Ł-12 (Suchodębie)						
12	Łanięta Ł-13 (Suchodębie)	245,2	350,0	104,8			
13	Łanięta Ł-14 (Witoldów)						
14	Łanięta Ł-15 (Suchodębie)						
15	Łanięta Ł-16 (Budy Stare)						
16	Łanięta Ł-19	*248,0	*355,2	*112,6 [2]			

57,80 [2] – sumaryczna grubość serii solnych, w nawiasie – liczba serii solnych / total thickness of salt, in brackets number of repetitions

* – zweryfikowana stratygrafia / verified stratigraphy (G. Czapowski)

Zestawienie danych stratygraficznych z głębokich otworów wiertniczych (>400 m) wykonanych na wysadzie solnym Rogóźno
Stratigraphic data from the deep boreholes (>400 m) drilled in the Rogóźno salt dome

Lp.	Nazwa i symbol otworu wiertniczego	Głębokość końcowa otworu [m]	Utwory mezo-kenozoiku						Czapa wysadu			Utwory permu nierozdzielone		
			czwartorzęd			paleogen i neogen			strop	spąg	grubość	seria solna		
			strop	spąg	grubość	strop	spąg	grubość				strop	spąg	grubość
[m]														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Rogoźno PIG-1	496,00	0,00	65,00	65,00	65,00	219,00	154,00	219,00	352,80	133,80	352,80	496,00	143,20
2	Rogoźno-11/75/12 (Wola)	526,10	0,00	58,90	58,90	58,90	182,90	124,00	182,90	347,20	164,30	347,20	526,10	178,90
3	Rogoźno-12/7	500,70	0,00	53,20	53,20	53,20	190,80	137,60	190,80	372,80	182,00	372,80	500,70	127,90
4	Rogoźno-13/16 (Biesiekierz)	460,10	0,00	54,50	54,50	54,50	185,20	130,70	185,20	363,40	178,20	363,40	460,10	96,70
5	Rogoźno-13/21 (Biesiekierz)	521,60	0,00	67,60	67,60	67,60	147,30	79,70	147,30	325,30	178,00	*325,30	*521,60	*196,30
6	Rogoźno-15/9/61 (Lorenki)	506,80	0,00	57,50	57,50	57,50	211,30	153,80	211,30	320,90	109,60	320,90	506,80	185,90
7	Rogoźno-16/15 (Biesiekierz)	502,20	0,00	35,10	35,10	35,10	185,50	150,40	185,50	363,20	177,70	363,20	502,20	139,00
8	Rogoźno-16/19 (Biesiekierz)	437,00	0,00	62,80	62,80	62,80	210,80	148,00	210,80	412,00	201,20	412,00	437,00	25,00
9	Rogoźno-9/15 (Warszyce)	530,00	0,00	35,20	35,20	35,20	224,00	188,80	224,00	337,30	113,30	337,30	530,00	192,70
10	Rogoźno-10/17 (Warszyce)	500,00	0,00	30,80	30,80	30,80	201,20	170,40	201,20	345,90	144,70	345,90	500,00	154,10
11	Wola Branicka PIG-1	461,00	0,00	30,00	30,00	30,00	138,70	108,70	138,70	425,00	286,30	425,00	461,00	36,00
12	Biesiekierz-13/16 (Budy)	460,10	0,00	54,50	54,50	54,50	185,60	131,10	185,60	363,40	177,80	363,40	460,10	96,70
13	Biesiekierz-13/21 (Kębliny)	521,60	0,00	67,60	67,60	67,60	147,30	79,70	147,30	325,30	178,00	325,30	521,60	196,30
14	Biesiekierz-16/15	502,20	0,00	69,00	69,00	69,00	185,50	116,50	185,50	363,20	177,70	363,20	502,20	139,00
15	Biesiekierz-16/19 (Kębliny)	437,00	0,00	62,80	62,80	62,80	210,80	148,00	210,80	412,00	201,20	412,00	437,00	25,00
16	Władysławów PIG-II (Wały)	440,65	0,00	81,20	81,20	81,20	205,10	123,90	205,10	*427,00	*221,90	*427,00	440,65	*13,65
17	Władysławów PIG-III (Wały)	506,40	0,00	67,00	67,00	67,00	189,00	122,00	189,00	338,00	149,00	338,00	506,40	168,40
18	Władysławów PIG-III (Wały)	506,40	0,00	67,00	67,00	67,00	189,00	122,00	189,00	338,00	149,00	338,00	506,40	168,40

Lp.	Nazwa i symbol otworu wiertniczego	Utwory permu-cyklotem PZ3									Utwory permu-cyklotem PZ2					
		Na3t+(A3r)			Na3			A3+(Ca3+T3)			Na2			K2		
		strop	spąg	gru- bość	strop	spąg	gru- bość	strop	spąg	gru- bość	strop	spąg	gru- bość	strop	spąg	grubość
[m]																
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	Rogoźno PIG-1				*353,3	*421,0	*67,7	*352,8	*450,0	*29,5 [2]	*353,3	*496,0	*30,2 [2]	*368,0	*421,0	*53,0 (Na2-K2)
2	Rogoźno-11/75/12 (Wola)				*347,2	*386,8	*39,6	*386,8	*462,7	*75,9				*462,7	*526,1	*63,4 (Na2-K2)
3	Rogoźno-12/7							*410,1	*494,0	*48,05 [4]	*372,8	*500,7	*143,65 [5]			
4	Rogoźno-13/16 (Biesiekierz)							*433,4	*460,1	*26,6	*363,4	*430,0	*66,6	*430,0	*433,4	*3,4
5	Rogoźno-13/21 (Biesiekierz)	*325,3	*521,6	*196,3 [Na3t]												
6	Rogoźno-15/9/61 (Lorenki)	*320,9	*506,0	*185,1 [Na3t]												
7	Rogoźno-16/15 (Biesiekierz)										*363,2	*502,2	*139,0			
8	Rogoźno-16/19 (Biesiekierz)										*412,0	*437,0	*25,0			
9	Rogoźno-9/15 (Warszyce)	*337,3	*367,3	*30,0 [Na3t]	*367,3	*459,2	*91,9	*459,2	*471,7	*12,5	*471,7	*530,0	*58,3			
10	Rogoźno-10/17 (Warszyce)				*345,9	*380,6	*34,7	*380,6	*500,0	*119,4						
11	Wola Branicka PIG-1	*425,0	*461,0	*36,0 [Na3t]												
12	Biesiekierz-13/16 (Budy)															
13	Biesiekierz-13/21 (Kębliny)															
14	Biesiekierz-16/15															
15	Biesiekierz-16/19 (Kębliny)															
16	Władysławów PIG-II (Wały)															
17	Władysławów PIG-III (Wały)	*427,0	440,65	*13,65 [Na3t]												
18	Władysławów PIG-III (Wały)	*338,0	*457,0	*119,0 [Na3t]	*457,0	*506,4	*49,4									

30,20 [2] – sumaryczna grubość serii solnych, w nawiasie – liczba serii solnych / total thickness of salt, in brackets number of repetitions
* – zweryfikowana stratygrafia / verified stratigraphy (G. Czapowski)