



## PERSPEKTYWY LOKOWANIA KAWERN MAGAZYNOWYCH WODORU W POKŁADOWYCH WYSTĄPIENIACH SOLI KAMIENNYCH GÓRNEGO PERMU (CECHSZTYN) W POLSCE – OCENA GEOLOGICZNA

### PROSPECTS OF HYDROGEN STORAGE CAVERNS LOCATION IN THE UPPER PERMIAN (ZECHSTEIN) STRATIFORM ROCK SALTS IN POLAND – GEOLOGICAL VALUATION

GRZEGORZ CZAPOWSKI

**Abstrakt.** Podziemne magazynowanie wodoru jest opłacalną i bezpieczną formą magazynowania nośników energii, szczególnie przy fluktuacjach związanych z produkcją energii przez OZE. Instalacje wykorzystujące ten gaz do produkcji energii są przyjazne środowisku, gdyż źródłem jego pozyskiwania i spalania jest woda. Jednym z optymalnych miejsc takiego magazynowania są kawerny magazynowe, ługowane w grubych warstwach soli kamiennej, budujących wysady solne oraz wystąpienia pokładowe. Kawerny magazynowe wodoru, w odróżnieniu od tych magazynujących np. gaz ziemny, mogą mieć stosunkowo niewielkie wymiary i objętości, co pozwala lokować je w obrębie pokładowych wystąpień soli kamiennej. Zaletą pokładów solnych jest ich stosunkowo prosta budowa geologiczna, ułatwiająca ługowanie licznych kawern. Na podstawie danych dotyczących perspektywicznych wystąpień soli kamiennych górnego permu (cechsztynu) w Polsce wskazano w obrębie pokładowych wystąpień soli w północnej i południowo-zachodniej Polsce wiele obszarów i otworów wiertniczych, w których pokład soli sprzyja ulokowaniu kawern magazynowych wodoru. Przyjęto, że dla miejsc optymalnych miąższość pokładu soli wynosi  $>100$  m, głębokość występowania jego stropu do 1 km, dla miejsc perspektywicznych zaś miąższość pokładu soli to  $>145$  m, głębokość występowania stropu mieści się w przedziale 1–1,5 km. Łącznie wyróżniono i scharakteryzowano w wystąpieniach pokładowych cechsztyńskich soli kamiennych cyklotemów PZ1, PZ2 i PZ3 cechsztynu 9 obszarów optymalnych i 9 obszarów perspektywicznych, sprzyjających lokowaniu kawern magazynowych wodoru oraz 27 rozproszonych otworów optymalnych i 4 otwory perspektywiczne.

**Słowa kluczowe:** kawernowe magazynowanie wodoru, pokładowe wystąpienia soli kamiennej, cechsztyń, Polska.

**Abstract.** Underground hydrogen storage is a profitable and safe form of energy sources storage responding quickly to fluctuations on the energy market, especially in a case of energy produced by the Renewed Energy Sources. Such energy production is non-toxic to the environment because water is both the gas source and the final product in such installations. Salt caverns, leached in thick rock salt complexes of salt domes and stratiform salt bodies, are one of the recommended optimal forms of such gas storage. Size and volume of hydrogen storage caverns could be smaller than of these dedicated to natural gas, so they may be often located in the stratiform rock salt bodies. These bodies are characterized by a simple geological structure favoured leaching of numerous caverns. Data on the prospective occurrences of Upper Permian (Zechstein) rock salts in Poland enabled to point out several areas and single boreholes within the stratiform salt bodies, in which the geological parameters of salt seam are positive for location of hydrogen storage caverns. The assumed geological criteria for salt seam in such places are as follows: for the optimal location, the salt seam thickness is  $>100$  m and the depth of seam top no deeper than 1 km, but the prospective sites are characterized by a salt seam top placed within a 1–1.5 km interval and its thickness is  $>145$  m. In the Zechstein stratiform rock salt bodies of the PZ1, PZ2 and PZ3 cyclothems, nine optimal and nine prospective areas have been distinguished and dispersed 27 optimal and four prospective boreholes have been characterized, in which geological parameters of these rocks favoured location of hydrogen storage caverns.

**Key words:** hydrogen cavern storage, stratiform rock salts, Zechstein, Poland.

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

## WSTĘP

Jedną ze sprawdzonych form magazynowania energii jest podziemne magazynowanie wodoru. Bezodpadowe spalanie wodoru w odpowiednich instalacjach stanowi opłacalne i wydajne źródło energii w okresach wysokiego na nią zapotrzebowania (np. Chromik, 2012, 2015, 2016; Kaliski, Sikora, 2013; Kunstman, Urbańczyk, 2013; Chmielniak i in., 2017; Tarkowski, 2017, 2019; Lewandowska-Śmierczalska i in., 2018; Tarkowski, Czapowski, 2018). Nadwyżki energii w sieciach przesyłowych mogą się okresowo pojawiać z chwilą zwiększenia udziału źródeł energii odnawialnej (OZE, np. fotowoltaika, energia wiatrowa) w krajowym bilansie energetycznym.

Produktem spalania wodoru jest woda, która jest zarazem jego źródłem dzięki procesowi hydrolizy, prowadzonemu z wykorzystaniem okresowych nadwyżek w systemie energetycznym, dlatego zaletą takiej instalacji jest możliwa praca praktycznie w obiegu zamkniętym, bez szkodliwych dla otoczenia emisji. Do bezpiecznych miejsc magazynowania wyprodukowanego wodoru należą podziemne kawerny, wyługowane – podobnie jak kawerny magazynowe na gaz ziemny czy paliwa – w masywach soli kamiennej. Te ciała solne gwarantują szczelność wyrobisk magazynowych i bezpieczne szybkie operowanie medium zatłaczanym (gazem czy paliwami), czego dowodzą dotychczasowe doświadczenia z eksploatacją takich magazynów (np. Gąska, 2000; Reinisch, 2000; Maciejewski, 2008; Gąska i in., 2012).

W Polsce największe zasoby soli kamiennej występują w obrębie utworów górnopermskich (cechsztyń), tworząc złoża typu pokładowego oraz stanowiąc podstawowy budulec wysadowych struktur solnych (np. Czapowski, Bukowski, 2010, 2012, 2013, 2016; Czapowski, 2017). Ocenę geologicznych walorów tych struktur od strony przydatności do lokowania w ich obrębie wspomnianych kawern magazynowych przedstawiono we wcześniejszych pracach (np. Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2012; Czapowski, Tarkowski, 2018; Tarkowski, Czapowski, 2018). W niniejszym artykule wskazano i scharakteryzowano miejsca, gdzie pokładowe wystąpienia cechsztyńskiej soli kamiennej mogą, zdaniem autora, okazać się korzystne do wykonania w ich obrębie takich wyrobisk. Wskazanie takich obszarów potencjalnym inwestorom, ułatwiające decyzję o rozpoczęciu inwestycji, wpisuje się w zadania państwowej służby geologicznej, której rolę pełni od blisko 100 lat Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy (np. Peryt, 2019).

## GEOLOGICZNE UWARUNKOWANIA LOKOWANIA KAWERN MAGAZYNOWYCH WODORU W POKŁADOWYCH WYSTĄPIENIACH SOLI KAMIENNEJ

Pokładowe wystąpienia soli kamiennych cechsztyńtu okonturowano do głęb. 2 km na terenie Polski północnej i południowo-zachodniej (fig. 1) podczas przygotowania map występowania obszarów perspektywicznych z przewi-

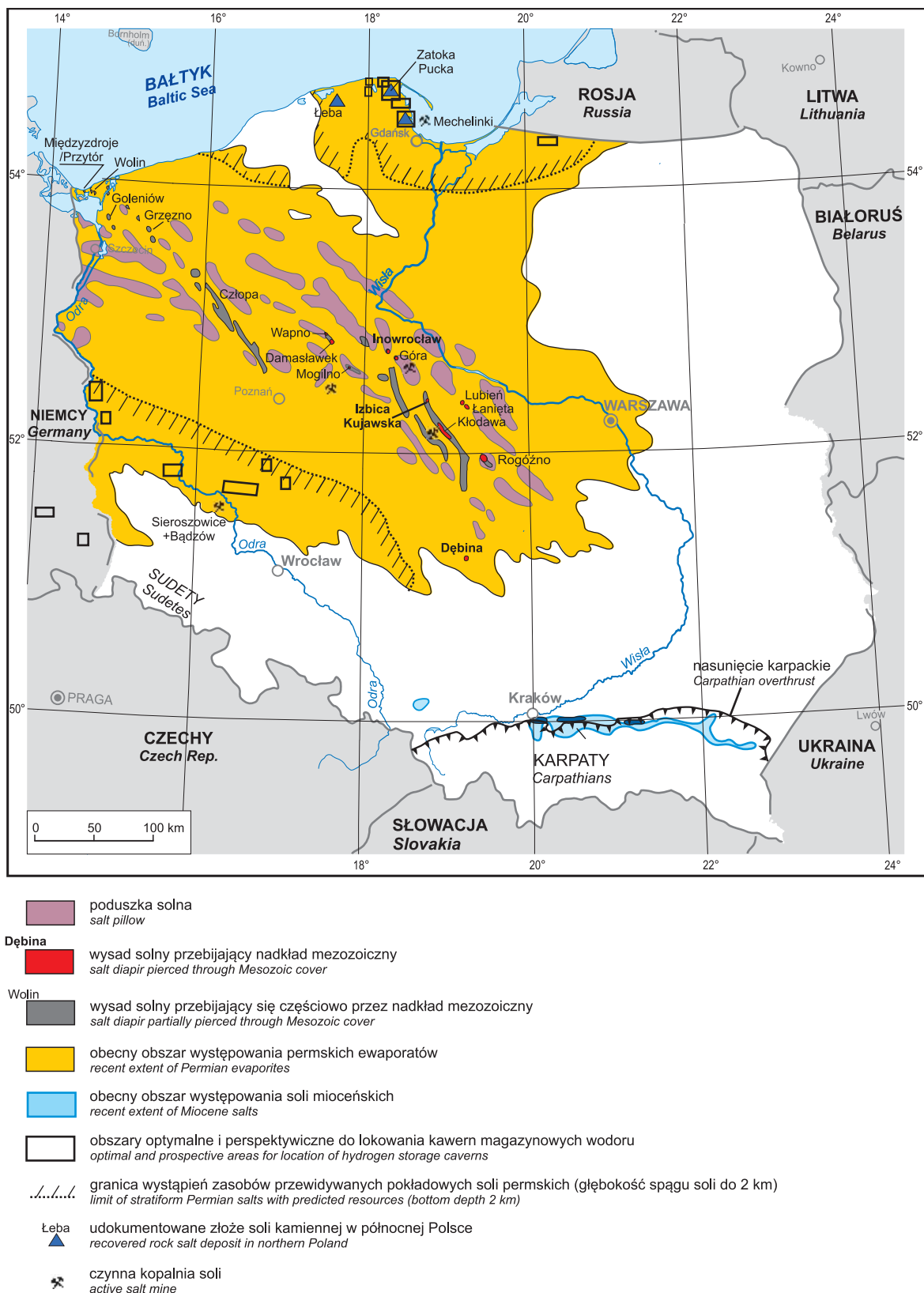
dywalnymi zasobami tych soli (np. Czapowski, Bukowski, 2015; Czapowski i in., 2015; Mikulski i in., 2015, 2016; Czapowski, 2017).

Kawerny magazynowe wodoru, w odróżnieniu od tych magazynujących np. gaz ziemny (o objętości przekraczającej zwykle dziesiątki do setek tysięcy metrów sześciennych i wysokości kilkaset metrów), mogą mieć różny kształt np. cylindryczny, elipsoidalny czy dzwonu oraz stosunkowo niewielkie wymiary i objętości (np. Chromik, 2018). Pozwala to lokować je w obrębie pokładowych wystąpień soli kamiennych cechsztyńtu, których miąższość zwykle nie przekracza 100–200 m w odróżnieniu od wysadów solnych, gdzie ciała zbudowane z soli kamiennej mają wysokość do kilku kilometrów (fig. 2A). O ile wysady solne charakteryzuje złożona wewnętrzna budowa (fig. 2A), trudna do rozpoznania bez wykonania licznych odwiertów badawczych, o tyle zaletą pokładów solnych jest ich stosunkowo prosta budowa geologiczna, ułatwiająca ługowanie licznych kawern (fig. 2B).

Bezpośrednie podłoże i nadkład pokładów soli kamiennych cechsztyńtu na terenie Polski to utwory siarczanowe kolejnych cyklotemów (tab. 1), stanowiące zwykle dobre poziomy izolujące. W obrębie pokładu soli mogą się pojawić niekorzystne, z punktu widzenia ługowania kawern, przewarstwienia, np. siarczanowe [jak anhydryt śródsolny [A1s] w solach cyklotemu PZ1] lub soli potasowo-magnezowych (K-Mg) w solach cyklotemów PZ1 (lokalnie), PZ2 i PZ3. Poziomy siarczanów śródsolnych są obecnie możliwe do wykrycia przy pomocy sejsmiki wysokiej rozdzielczości, stwierdzenie zaś obecności soli K-Mg w pokładzie nadal wymaga wykonania kilku odwiertów.

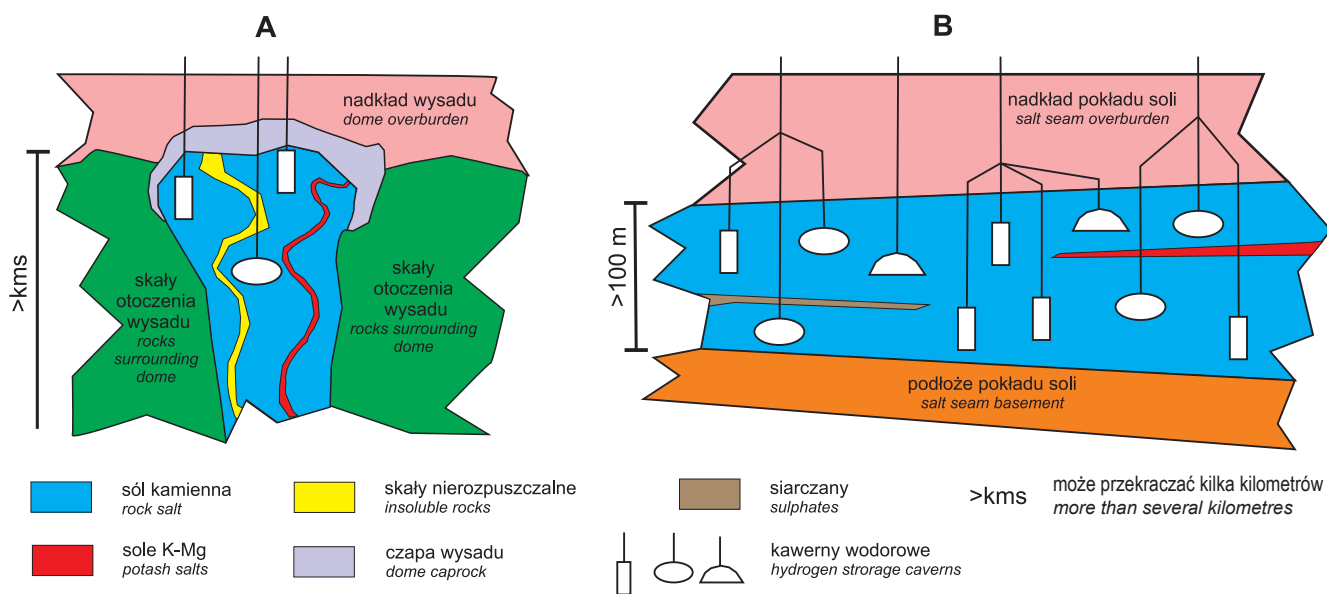
W wystąpieniach pokładowych soli kamiennej mogą być lokowane liczne niewielkie kawerny magazynowe. Jedynym przestrzennym ograniczeniem ilości kawern jest głębokość występowania stropu pokładu soli, jego miąższość oraz konieczność zachowania filarów ochronnych pomiędzy poszczególnymi kawernami (fig. 2B). Wykonanie kilku kawern przy pomocy otworów kierunkowych, ujętych w tzw. klastry, jak ma to miejsce w przypadku budowy kawernowego magazynu gazu Kosakowo w złożu soli kamiennej Mechelinki (np. Laskowska i in., 2009), ogranicza wydatnie infrastrukturę powierzchniową takiej inwestycji (fig. 2B). Z kolei w wysadach solnych ilość takich kawern jest ograniczona wielkością jednorodnego ciała solnego w ustalonym ze względów górniczych przedziale głębokości (fig. 2A).

Przy wyborze miejsc korzystnych do lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowych wystąpieniach soli kamiennych cechsztyńtu przyjęto jako kryteria selekcji głębokość występowania pokładu soli i jego miąższość. Jak wspomniano wcześniej tego typu kawerny są stosunkowo niewielkie, gdyż nie mają służyć gromadzeniu wielkich ilości gazu jak np. kawerny operacyjne na gaz ziemny lecz zaspokojeniu lokalnych potrzeb energetycznych poprzez okresowe magazynowanie i spalanie wodoru w niewielkich instalacjach. Dlatego też przy założeniu maksymalnie 20–30 m grubości stropowej i spągowej półek ochronnych wysokość takiej kawerny nie powinna przekraczać 100 m. Z kolei duża głębokość zalegania pokładu soli zwiększa wydatki ener-



**Fig. 1. Rozmieszczenie obszarów optymalnych i perspektywicznych do lokowania kavern magazynowych wodoru w pokładowych wystąpieniach soli kamiennych cechsztyń w Polsce (wg Czapowskiego, Tarkowskiego, 2018; zmienione)**

Distribution of optimal-prospective areas for location of hydrogen storage caverns in Zechstein stratiform rock salt in Poland (after Czapowski, Tarkowski, 2018; modified)



**Fig. 2. Możliwości rozmieszczenie kawern magazynowych wodoru w wysadzie solnym (A) i pokładowym wystąpieniu soli kamiennej (B)**

Location options for the distribution of hydrogen storage caverns in the salt dome (A) and the stratiform rock salt (B)

**Tabela 1**

**Wydzielenia litostratigraficzne cyklotemów PZ1 do PZ3 w cechsztyńskich wystąpieniach pokładowych ewaporatów w Polsce (wg Wagnera, 1991, 1994; Wagnera, Peryta, 1997; zmienione)**

Lithostratigraphic units of PZ1 to PZ3 cyclothem in Zechstein stratiform evaporite deposits in Poland (after: Wagner, 1991, 1994; Wagner, Peryt, 1997; modified)

Wydzielenia chlorkowe i siarczanowe / Chloride + sulphate units		Cyklotem / Cyclotheme
Młodsza sól kamienna ilasta (Na3t) = zuber brunatny / Younger Clay Halite = Brown Zuber		PZ3
Młodsza sól kamienna górna (Na3g) / Upper Younger Halite		
Młodsza sól potasowa (K3) / Younger Potash		
Młodsza sól kamienna dolna (Na3d) / Lower Younger Halite		
Anhydryt główny (A3) / Main Anhydrite		
Anhydryt kryjący (A2r) / Screening Anhydrite		PZ2
Starsza sól kamienna kryjąca (Na2r) / Screening Older Halite		
Starsza sól potasowa (K2) / Older Potash		
Starsza sól kamienna (Na2) / Older Halite		
Anhydryt podstawowy (A2) / Basal Anhydrite		PZ1
Anhydryt górny (A1g) / Upper Anhydrite		
Najstarsza sól kamienna górna (Na1g) / Upper Oldest Halite	Najstarsza sól kamienna (Na1) / Oldest Halite	
Najstarsza sól potasowa (K1) / Oldest Potash		
Anhydryt śródsolny (A1s) / Intrasalt anhydrite		
Najstarsza sól kamienna dolna (Na1d) / Lower Oldest Halite		
Anhydryt dolny (A1d) / Lower Anhydrite		

getyczne przy ługowaniu i następnie wypełnianiu kawerny. W przeprowadzonej selekcji przyjęto zatem 1,5 km jako maksymalną głębokość występowania pokładu.

Operując tymi wartościami, założono, że optymalne warunki do lokowania kawern magazynowych wodoru spełnia pokład soli kamiennej o miąższości >100 m, zalegający na głębokości do 1 km. Odpowiednio za miejsce perspektywiczne uznano pokład o miąższości >145 m występujący w przedziale głęb. 1–1,5 km. Wykorzystując powyższe kryteria i dane otworowe z Centralnej Bazy Danych Geologicznych Narodowego Archiwum Geologicznego (CBDG NAG), wskazano i scharakteryzowano obszary optymalne (OO) i perspektywiczne (OP), grupujące np. dwa pobliskie odwierty spełniające przedstawione warunki geologiczne, oraz pojedyncze optymalne i perspektywiczne otwory wiertnicze. Wskazanie tych ostatnich oznacza dla potencjalnego inwestora, że w ich najbliższym otoczeniu występuje pokład soli kamiennej spełniający oczekiwane kryteria. W charakterystyce tych miejsc (tab. 2–5) oprócz parametrów określających pokład soli podano także informacje o obecności przewarstwień siarczanów i soli K-Mg, niekorzystnych dla procesu ługowania kawern.

Wyróżnione obszary i otwory wiertnicze zlokalizowano na arkuszach map w skali 1:200 tys. (fig. 4–20<sup>2</sup>), zawierających kontury pokładowych wystąpień soli kamiennych do głęb. 2 km, uznanych za wystąpienia o zasobach przewidywanych (np. Mikulski i in., 2015, 2016).

Wystąpienia pokładowe soli kamiennych cyklotemu PZ4 cechsztynu pominięto w poniższej analizie ze względu na niespełnianie przez nie ustalonego kryterium głębokości-miąższościowego. Z kolei sole kamienne środkowego miocenu, występujące w południowej Polsce, zawierają zwykle zbyt wiele przewarstwień ilasto-klastyczno-siarczanowych (np. Garlicki, 1968), by uznać je za perspektywiczne do lokowania kawern magazynowych wodoru.

## MIEJSCA SPRZYJAJĄCE LOKOWANIU KAWERN MAGAZYNOWYCH WODORU W POKŁADOWYCH WYSTĄPIENIACH UTWORÓW SOLNYCH CECHSZTYNU W POLSCE

Pokładowe wystąpienia soli kamiennych cechsztynu rozpoznano w pasie nadmorskim na terenie północnej Polski oraz na obszarze przedśudeckim w jej części południowo-zachodniej (fig. 1).

### PÓLNOCNA POLSKA

Na terenie północnej Polski analizowane wystąpienie pokładowe dotyczy utworów wydzielienia najstarszej soli kamiennej (Na1) cyklotemu PZ1 cechsztynu, rozciągających się od Pomorza Gdańskiego, w okolicach Łeby i Lęborka, po rejon Bartoszyce, na wschodzie. Utwory te, zawierające zasoby przewidywane soli kamiennej, opisano jako rejon

perspektywiczny Koszalin–Słupsk–Łeba–Puck–Gdańsk–Elbląg–Lidzbark Warmiński (Czapowski, Bukowski, 2015; Czapowski i in., 2015; Mikulski i in., 2015).

Pokład soli kamiennej podścielony jest tu i przykryty utworami siarczanowymi odpowiednio anhydrytu dolnego (A1d) i górnego (A1g) zaś w jego obrębie występuje lokalnie do kilku przewarstwień anhydrytu śródsolnego (A1s) i sporadyczne przewarstwienia soli K-Mg (np. Czapowski, Tomassi-Morawiec, 1985; Pizon i in., 1985; Tomassi-Morawiec, 2003; Czapowski i in., 2008).

Na wspomnianym terenie wyróżniono 5 obszarów optymalnych i 1 obszar perspektywiczny oraz 17 optymalnych i 2 otwory perspektywiczne (tab. 2). Większość tych miejsc znajduje się na obszarze Pomorza Gdańskiego (fig. 3–6) zaś nieliczne – np. OP Gałajny–Basze w rejonie Bartoszyce (fig. 7) i perspektywiczny otwór wiertniczy Krynica Morska-2) nad Zalewem Wiślanym (fig. 8) – w części wschodniej analizowanego terenu.

Największy obszar optymalny stanowi udokumentowane (42 otwory wiertnicze, tab. 2) złożo soli kamiennej Zatoka Pucka (fig. 3), gdzie pokład soli kamiennej, o grubości 105,0–200,5 m (średnio – 163,35 m), występuje na głęb. 622,4–790 m (średnio – 723,7 m; tab. 2). Położenie blisko otwartego morza i półzamkniętej Zatoki Puckiej stwarza korzystne warunki do kontrolowanego zrzutu solanek ługowniczych lecz pewne utrudnienie w możliwym zagospodarowaniu stanowią częste przewarstwienia anhydrytu śródsolnego i lokalnie – soli K-Mg (tab. 2).

Złożo soli kamiennej Mechelinki (fig. 3 i 4), okonturowane 5 otworami (5 kolejnych to otwory eksploatacyjne), charakteryzuje się parametrami kwalifikującymi je jako obszar zarówno optymalny, jak i perspektywiczny. Pokład soli, o miąższości 123,6–185,9 m (średnio – 152,62 m), występuje na głęb. 946,2–996,1 m (średnio – 972,2 m; tab. 2). Pojawiają się w nim cienkie przewarstwienia anhydrytu śródsolnego, ale dotychczasowe doświadczenia budowy i eksploatacji od 2014 r. kawernowego magazynu gazu Kosakowo dowodzą możliwości budowy kolejnych kawern z ewentualnym ich przeznaczeniem na magazynowanie wodoru.

Nad Zatoką Pucką wskazano spory obszar optymalny Darżlubie–Puck–Żelistrzewo (fig. 3), gdzie pokład soli o średniej miąższości 160,55 m występuje na głęb. 801,6–898,1 m (tab. 2). Nad samym morzem w rejonie Białogóra-Karwia zlokalizowano kolejne 2 obszary: większy (16 otworów wiertniczych) obszar Białogóra–Dębki–Żarnowiec oraz mały (2 otwory) obszar Karwia (fig. 3). Pokład soli, o grubości średnio 129,54–172,9 m, zalega na głębokości średnio 619,72–622,3 m (tab. 2), zaś położenie nad otwartym morzem ułatwia kontrolowany zrzut solanek. Pewien problem przy ługowaniu kawern mogą stwarzać pojedyncze cienkie (0,1–0,2 m) przewarstwienia anhydrytu śródsolnego, podobnie jak w przypadku obszaru Darżlubie–Puck–Żelistrzewo (tab. 2).

Na południowy zachód od złoża soli kamiennej Zatoka Pucka wytypowano 5 pojedynczych otworów wiertniczych o cechach optymalnych (tab. 2): Lisewo ONZ-1, Opalino IG-1, Orle IG-1, Zdrada IG-4 i Wejcherowo IG-1, zaś na wschód

<sup>2</sup> Figury 4–20 znajdują się na stronach 37–53.



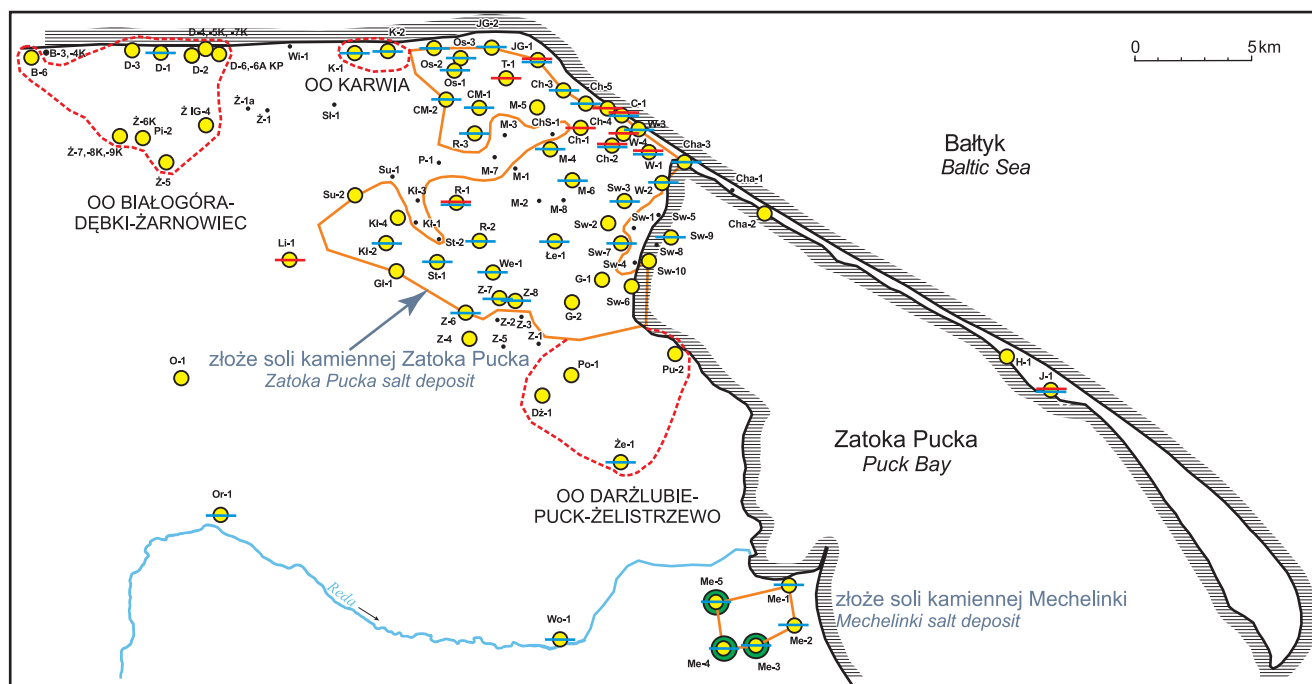
**Tabela 2**  
**Parametry obszarów i otworów wiertniczych optymalnych i perspektywicznych do lokowania kavern magazynowych wodoru w pokładowych wystąpieniach**  
**otworów solnych cyklotemu PZI cechszynu w północnej Polsce**

Characteristics of optimal and prospective areas and boreholes favoured location of hydrogen storage cavern in Zechstein (PZI cyclothem) stratiform salt bodies in northern Poland

Lp. Number	Obszar lub otwór wiertniczy Area or borehole name	Liczba otworów wiertniczych Number of boreholes	Pokład soli kamiennej Rock salt seam				Przewarstwienie siarczanów (As) Sulphate (As) interbed			Przewarstwienie soli K-Mg (K) Potash (K) interbed				
			strop top [m]	spąg bottom [m]	miąższość thickness [m]	strop top [m]	spąg bottom [m]	miąższość thickness [m]	strop top [m]	spąg bottom [m]	miąższość thickness [m]			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
Obszar optymalny (OO) / Optimal area														
1	OO BIAŁOGÓRA-DĘBKI-ŻARNOWIEC	16	minimalna minimum	570,50	707,00	108,50	723,00	723,10	0,10					
			maksymalna maximum	671,00	801,00	138,00								
			średnia average	619,72	749,26	129,54								
2	OO DARŻLUBIE-PUCK-ŻELISTRZEWO	4	minimalna minimum	801,60	949,90	148,30	1 004,70	1 005,20	0,10					
			maksymalna maximum	898,10	1055,50	171,50	1 017,70	1 017,80	0,50					
			średnia average	839,80	1000,35	160,55	1 011,20	1 011,50	0,30					
3	OO KARWIA	2	minimalna minimum	622,00	788,20	165,60	672,00	672,20	0,10					
			maksymalna maximum	622,60	802,20	180,20	689,70	689,80	0,20					
			średnia average	622,30	795,20	172,90	793,13	793,27	0,13					
4	złoże soli kamiennej MECHELINKI (OO+OP)	5	minimalna minimum	946,20	1078,00	123,60	973,80	973,90	0,10					
			maksymalna maximum	996,10	1150,20	185,90	1 108,50	1 108,60	1,10					
			średnia average	972,20	1124,82	152,62	1 075,62	1 075,88	0,26					
5	złoże soli kamiennej ZATOKA PUCKA (OO)	42	minimalna minimum	622,40	817,80	105,80	703,80	704,00	0,10	712,00	725,00	0,20		
			maksymalna maximum	790,00	981,00	200,50	1 017,70	1 017,80	34,00	787,90	794,40	13,00		
			średnia average	723,70	887,05	163,35	815,02	817,07	2,05	752,71	756,59	3,88		

Tabela 2 cd.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Obszar prespektywiczny (OP) / Prospective area													
1	OP GALAJNY-BASZE	2	minimalna minimum	1297,00	1483,50	151,00							
			maksymalna maximum	1334,00	1485,00	186,50							
			średnia average	1315,50	1484,25	168,75							
Optymalny otwór wiertniczy / Optimal borehole													
1	CHAŁUPY IG-2 (Cha-2)	1		748,30	925,30	177,00							
2	BIAŁOGARDA IG-1	1		663,70	889,40	225,70							
3	HEL IG-1 (H-1)	1		853,50	1026,00	172,50							
4	JASTARNIA IG-1 (J-1)	1		875,40	1053,00	177,60	992,20	1 011,60	3,00 (2 x As)	892,80	901,00	2,00	
5	KOPALINO IG-1	1		580,40	716,00	135,60	629,70	704,50	4,80 (2 x As)				
6	ŁĘBORK IG-1	1		814,00	963,00	149,00							
7	LISEWO ONZ-1 (Li-1)	1		712,00	904,90	192,90	712,00	725,00	13,00				
8	ŁĘBA Geo-2	1		635,00	817,50	182,50							
9	ŁĘBA IG-1	1		490,50	664,40	173,90							
10	ŁĘBA-8	1		510,00	630,00	120,00							
11	ŁĘBA-VI	1		642,40	789,50	147,10							
12	OPALINO IG-1 (O-1)	1		788,20	952,80	164,60							
13	ORLE IG-1 (Or-1)	1		869,00	978,50	109,50	950,00	969,70	19,70				
14	SALINO IG-1	1		860,80	1022,50	161,70							
15	SWARZEWO IG-9 (Sw-9)	1		753,80	877,00	123,20	773,20	868,30	2,10 (3 x As)				
16	WEJHEROWO IG-1 (Wo-1)	1		969,50	1077,80	108,30	1 034,60	1 039,50	4,00				
17	ZDRADA IG-4 (Z-4)	1		812,00	959,40	147,40	839,00	899,10	26,70 (2 x As)				
Prespektywiczny otwór wiertniczy / Prospective borehole													
1	KRYNICA MORSKA-2	1		1310,00	1487,50	177,50							
2	MIŁOSZEWO ONZ-1	1		1283,50	1443,00	159,50							



**Fig. 3. Obszary i otwory wiertnicze optymalne i perspektywiczne do lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowym wystąpieniu utworów solnych cyklotemu PZ1 cechsztynu w rejonie Zatoki Puckiej**

Optimal and prospective areas and boreholes favoured location of hydrogen storage cavern in the Zechstein (PZ1 cyclothem) stratiform salt body near the Puck Bay

od złoże – 4 otwory: Swarzewo IG-9, Chałupy IG-2, Jastarnia IG-1 i Hel IG-1 (fig. 3).

Kolejne 6 pojedynczych optymalnych otworów wiertniczych wytypowano w rejonie i na wschód od Łeby: Łeba IG-1, Łeba-8, Łeba-VI i Białogarda IG-1 (stanowią punkty okonturowania udokumentowanego złoże soli kamiennej Łeba) oraz Łeba Geo-2, Kopalino IG-1 i Salino IG-1 (fig. 5 i 6; tab. 2). W rejonie Lęborka wskazano pojedynczy optymalny otwór wiertniczy Lębork IG-1 (fig. 6; tab. 2) zaś na zachód od Trójmiasta – otwór wiertniczy Miłoszewo ONZ-1 o parametrach perspektywicznych (fig. 4; tab. 2).

Na północ od Bartoszyce, w pobliżu granicy polsko-rosyjskiej, wytypowano obszar perspektywiczny Gałajny–Basze

(fig. 7), gdzie pokład soli o miąższości 151,0–186,5 m (średnio – 168,75 m) występuje na głęb. 1297–1334 m (średnio – 1313,5 m; tab. 2).

W centralnej części Mierzei Wiślanej wykonano otwór wiertniczy Krynica Morska-2 (fig. 8), w którym pokład soli kamiennej, o grubości 177,5 m, na głęb. 1310 m, wykazuje cechy perspektywiczne do lokowania kawern (tab. 2).

Wytypowane obszary i otwory wiertnicze, szczególnie te w pobliżu otwartego morza bądź nad Zatoką Pucką, są odpowiednie do budowy w występującym tu pokładzie soli kamiennej kawern magazynowych wodoru ze względu na możliwość bezpiecznego zrzutu solanek ługowniczych. Dodatkowym atutem jest możliwość wykorzystania do produk-



cji wodoru okresowych nadwyżek energii ze źródeł OZE, którymi będą wielkie farmy wiatrowe planowane do posadzenia w polskiej strefie ekonomicznej Bałtyku.

## POŁUDNIOWO-ZACHODNIA POLSKA

Na obszarze przedсудиectkim w południowo-zachodniej Polsce analizie poddano wystąpienia pokładowe soli kamiennych cechsztynu, reprezentujące kolejne 3 cyklotemy: PZ1, PZ2 i PZ3.

### Utwory solne cyklotemu PZ1

Utwory solne tego cyklotemu reprezentują – podobnie jak w północnej Polsce – wydzielenie najstarszej soli kamienniej (Na1), podścielone i przykryte utworami siarczanowymi odpowiednio anhydrytu dolnego (A1d) i górnego (A1g). W obrębie tego pokładu występują lokalnie przewarstwienia anhydrytu śródsolnego (A1s; Czapowski i in., 1992; Czapowski, 2017), nie stwierdzono natomiast obecności przewarstwień soli K-Mg, odpowiadających nieformalnemu wydzieleniu najstarszej soli potasowej (K1).

Na obszarze przy granicy polsko-niemieckiej, w rejonie Słubice–Gubin po strefę Kalisz–Kluczbork na wschodzie, wyróżniono 4 obszary perspektywiczne oraz 6 optymalnych i jeden otwór perspektywiczny (fig. 9–12; tab. 3).

Miejsca te znajdują się na terenie występowania pokładowych soli kamiennych, dla których określono zasoby przewidywane soli i opisanych jako dwa rozległe rejony perspektywiczne Maszewo–Raduszec–Dachów–Dębinka–Gubin i Zielona Góra–Leszno–Milicz–Sokolniki (Czapowski i in., 2015; Mikulski i in., 2015; Czapowski, 2017).

Największy obszar perspektywiczny (50 otworów wiertniczych, tab. 3) to obszar Wilków–Żuchłów–Załęcze–Słupia pomiędzy Głogowem i Rawiczem (fig. 9), gdzie pokład soli kamienniej o grubości 145,5–517,5 m (średnio – 188,31 m) występuje na głęb. 810–1360,6 m (średnio – 1244,37 m; tab. 3). Na obszarze tym wskazano też jeden otwór o parametrach optymalnych: Załęcze–Wiewierz-31, w którym pokład soli o grubości 517 m występuje najpłycej, na głęb. 810 m.

Kolejny większy obszar perspektywiczny (8 otworów wiertniczych, tab. 3) to obszar Nowa Sól-Kielcz w rejonie Nowej Soli (fig. 10), gdzie pokład soli kamienniej o grubości 145,5–247,5 m (średnio – 198,66 m) występuje na głęb. 979–1305 m (średnio – 1186 m; tab. 3). Na obszarze tym wskazano też 4 otwory o parametrach optymalnych: Nowa Sól-3, Nowa Sól-4, Nowa Sól-11 i Pobrzenie Dolne K-6, zaś w dwu z nich (Nowa Sól-3 i Nowa Sól-11) stwierdzono obecność warstwy anhydrytu śródsolnego o grubości od 3 m do ponad 61 m (tab. 3).

Następny obszar perspektywiczny (6 otworów wiertniczych, tab. 3) to obszar Chęciny–Nowa Rola wyróżniony w rejonie Lubuska przy granicy polsko-niemieckiej (fig. 11), gdzie pokład soli kamienniej o grubości 145,0–292 m (średnio – 208,03 m) występuje na głęb. 964,2–1314 m (średnio – 1194,1 m; tab. 3). Na obszarze tym w otworze

Nowa Rola-1 stwierdzono obecność warstwy anhydrytu śródsolnego o grubości 6 m, na głęb. 1355 m (tab. 3).

Ostatni obszar perspektywiczny (3 otwory wiertnicze, tab. 3) to niewielki obszar Garki-Uciechów wyróżniony w rejonie Krotoszyna (fig. 12), gdzie pokład soli kamienniej grubości 151,0–190,5 m (średnio – 177,17 m) występuje na głęb. 1321–1342,5 (średnio – 1331,17 m; tab. 3).

Ponadto w okolicach Żar wskazano optymalny otwór wiertniczy Sieciejów P-9 (fig. 10), w którym pokład soli grubości ponad 158 m występuje na głęb. 840 m, zawierając przewarstwienie anhydrytu śródsolnego miąższości 8,2 m (tab. 3). Z kolei w rejonie Głogowa wytypowano jako perspektywiczny otwór Głogów IG-1 (fig. 9), z pokładem soli grubości 159,3 m, stwierdzonym na głęb. 1201 m (tab. 3).

### Utwory solne cyklotemu PZ2

Na utwory solne tego cyklotemu składają się osady wydzielenia starszej soli kamienniej (Na2), podścielone i przykryte utworami siarczanowymi odpowiednio anhydrytu podstawowego (A2) i kryjącego (A2r). W obrębie tego pokładu występuje kompleks starszej soli potasowej (K2; np. Podemski, 1966, 1972, 1973, 1974, 1975; Wagner, 1994; Czapowski, 2017).

Na analizowanym obszarze przedсудиectkim nie udało się wskazać obszarów o cechach optymalnych czy perspektywicznych, wytypowano jedynie 3 otwory optymalne i jeden perspektywiczny (fig. 13–16; tab. 4). W żadnym z otworów nie stwierdzono występowania przewarstwień siarczanów i soli K-Mg.

Dwa pobliskie otwory optymalne: Załęcze-46 i Załęcze-Wiewierz-32 występują w okolicy Rawicza (fig. 13), na terenie obszaru perspektywicznego Załęcze-Wiewierz Na2 występowania pokładowych soli kamiennych (Czapowski i in., 2015; Mikulski i in., 2015; Czapowski, 2017). Pokład soli ma tu grubość 230–297 m i występuje na głęb. 778,5–853 m (tab. 4).

Kolejny otwór optymalny Urzuty IG-1 występuje na zachód od Nowej Soli (fig. 14), na skraju obszaru perspektywicznego Gubin-Zielona Góra-Sława występowania pokładowych soli kamiennych (Czapowski i in., 2015; Mikulski i in., 2015; Czapowski, 2017). Pokład soli ma tu grubość 119,3 m i występuje dość płytko na głęb. 827,6 m (tab. 4).

Jedynie perspektywiczne wystąpienie w obrębie pokładu starszej soli kamienniej wytypowano w rejonie otworu wiertniczego Wężysk-2 na wschód od Gubina (fig. 15), na terenie wspomnianego obszaru perspektywicznego Gubin-Zielona Góra-Sława. Pokład soli ma tu grubość 201 m i występuje na głęb. 1354 m (tab. 4).

### Utwory solne cyklotemu PZ3

Na utwory solne tego cyklotemu składają się osady wydzielenia młodszej soli kamienniej (Na3), podścielone utworami siarczanowymi anhydrytu głównego (A3) zaś przykryte lokalnie osadami młodszej soli kamienniej ilastej (Na3t) lub utworami młodsze go cyklotemu PZ4. W obrębie pokładu

Tabela 3

**Parametry obszarów i otworów wiertniczych optymalnych i perspektywicznych do lokowania kavern magazynowych wodoru w pokładowych wystąpieniach utworów solnych cyklotemu PZ1 cechsztynu w południowo-zachodniej Polsce**

Characteristics of optimal and prospective areas and boreholes favoured location of hydrogen storage caverns in the Zechstein PZ1 cyclothem stratiform salt bodies in south-western Poland

Lp. Number	Obszar lub otwór wiertniczy Area or borehole name	Liczba otworów wiertniczych Number of boreholes	Pokład soli kamiennej Rock salt seam				Przewarstwienie siarczanowe (As) Sulphate (As) interbed		
			wartość value	strop top [m]	spąg bottom [m]	miąższość thickness [m]	strop top [m]	spąg bottom [m]	miąższość thickness [m]
Obszar prespektywiczny (OP) / Prospective area									
1	OP CHEJCINY- -NOWA ROLA	6	minimalna minimum	964,30	1162,60	145,00	1355,00	1361,00	6,00
			maksymalna mximum	1314,00	1606,00	292,00			
			średnia average	1194,10	1403,13	208,03			
2	OP GARKI- -UCIECHÓW	3	minimalna minimum	1321,00	1472,00	151,00			
			maksymalna mximum	1342,50	1533,00	190,50			
			średnia average	1331,17	1508,33	177,17			
3	OP NOWA SÓL- -KIELCZ	8	minimalna minimum	979,00	1225,50	145,50	1072,00	1075,00	3,00
			maksymalna mximum	1305,00	1470,00	247,50			
			średnia average	1186,00	1385,04	198,66			
4	OP WILKÓW- -ŻUCHLÓW- -ZAŁĘCZE-SŁUPIA	50	minimalna minimum	810,00	1247,00	145,50			
			maksymalna mximum	1360,60	1534,50	517,50			
			średnia average	1244,37	1432,68	188,31			
Optymalny otwór wiertniczy / Optimal borehole									
1	NOWA SÓL-3	1		790,00	1087,00	235,50	1016,50	1078,00	61,50
2	NOWA SÓL-4	1		769,00	1097,00	328,00			
3	NOWA SÓL-11	1		979,00	1225,50	243,50	1072,00	1075,00	3,00
4	POBRZEZIE DOLNE K-6	1		902,70	1031,60	128,90			
5	SIECIEJÓW P-5	1		840,00	1006,40	158,20	866,50	874,70	8,20
6	ZAŁĘCZE- WIEWIERZ-31	1		810,00	1327,50	517,50			
Prespektywiczny otwór wiertniczy / Prospective borehole									
1	GŁOGÓW IG-1	1		1201,00	1360,30	159,30			

Tabela 4

**Parametry otworów wiertniczych optymalnych i perspektywicznych do lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowych wystąpieniach utworów solnych cyklotemu PZ2 cechsztynu w południowo-zachodniej Polsce**

Characteristics of optimal and prospective boreholes favoured location of hydrogen storage caverns in the Zechstein PZ2 cyclothem stratiform salt bodies in south-western Poland

Lp. Number	Obszar lub otwór wiertniczy Area or borehole name	Liczba otworów wiertniczych Number of boreholes	Pokład soli kamiennej Rock salt seam		
			strop top [m]	spąg bottom [m]	miąższość thickness [m]
Optymalny otwór wiertniczy / Optimal borehole					
1	URZUTY IG-1	1	827,60	946,90	119,30
2	ZAŁĘCZE-46	1	778,50	1008,50	230,00
3	ZAŁĘCZE-WIEWIERZ-32	1	853,00	1150,00	297,00
Prespektywiczny otwór wiertniczy / Prospective borehole					
1	WĘŻYSKA-2	1	1354,00	1555,00	201,00

soli kamiennej występuje kompleks młodszej soli potasowej (K3; np. Podemski, 1972, 1973, 1974, 1975; Wagner, 1994; Czapowski, 2017).

Na analizowanym obszarze przedsudeckim wyróżniono 4 obszary perspektywiczne, 4 optymalne oraz jeden optymalny otwór wiertniczy (fig. 16–20; tab. 5). W wyselekcjonowanych otworach wiertniczych nie stwierdzono występowania przewarstwień siarczanów i soli K-Mg.

Wytypowane miejsca znajdują się głównie na terenie występowania pokładowych soli kamiennych, opisanych jako rozległy obszar perspektywiczny Gubin–Zielona Góra–Leszno–Krotoszyn o zasobach przewidywanych soli (Czapowski i in., 2015; Mikulski i in., 2015; Czapowski, 2017).

Niewielki obszar optymalny Załęcze (3 otwory wiertnicze; tab. 5), również o walorach perspektywicznych, znajduje się na zachód Rawicza (fig. 16), na terenie niewielkiego obszaru perspektywicznego Załęcze-Wiewierz występowania soli kamiennej. Pokład soli kamiennej o grubości 195–450 m (średnio – 293,33 m) występuje na głęb. 790–950 m (średnio – 1881,33 m; tab. 5).

Kolejne dwa większe obszary optymalne: Strużka–Niwiska (6 otworów) i Nowa Sól (8 otworów) okonturowano na zachód od Nowej Sól (fig. 17; tab. 5). Na obszarze Strużka–Niwiska pokład soli o grubości 101–178 m (średnio – 125 m) występuje na głęb. 759,5–926,5 m (średnio – 857,67 m; tab. 5), zaś na obszarze Nowa Sól te parametry wynoszą odpowiednio 100–162,5 m (średnio – 129 m) i 785–963,5 m (średnio – 889,38 m; tab. 5). Obok tego ostatniego obszaru wskazano także obszar perspektywiczny Nowa Sól-Konradowo (3 otwory), gdzie pokład soli grubości 155,5–189 m (średnio – 173,83 m) występuje na głęb. 1032,5–1204 m (średnio – 1120,5 m; tab. 5).

Na południe od Gubina wskazano niewielki (2 otwory) obszar perspektywiczny Przyborowice-Kaniów i nieco większy (3 otwory) obszar perspektywiczny Sękowice-Nowa Wioska (fig. 18; tab. 5). Na obszarze Przyborowice-Kaniów

pokład soli o grubości 102,5–128,5 m (średnio – 115,5 m) występuje na głęb. 881–923 m (średnio – 902 m; tab. 5), zaś na obszarze Sękowice-Nowa Wioska te parametry wynoszą odpowiednio 167–212 m (średnio – 183,5 m) i 1230,5–1325,5 m (średnio – 1287 m; tab. 5). Ponadto na południe od obu obszarów wytypowano pojedynczy optymalny otwór wiertniczy Nowa Rola-1 (fig. 18), w którym pokład soli o grubości 109 m występuje na głęb. 944,5 m (tab. 5).

W okolicy Rybak koło granicy polsko-niemieckiej wskazano obszar perspektywiczny Rybaki (4 otwory; fig. 19; tab. 5). Pokład soli o grubości 162,5–308,0 m (średnio – 230,5 m) występuje na głęb. 1314–1368 m (średnio – 1351 m; tab. 5).

Ostatni niewielki (2 otwory) obszar perspektywiczny Grąbkowo–Rogożewo wyróżniono na zachód od Krotoszyńska (fig. 20; tab. 5). Występuje tu pokład soli o grubości 250,5–403,0 m (średnio – 326,75 m), na głęb. 1264,5–1297 m (średnio – 1280,75 m; tab. 5).

## PODSUMOWANIE

Kawerny wylugowane w ciałach solnych z przeznaczeniem na magazynowanie wodoru mogą być bezpieczną, ekologicznie czystą i ekonomicznie opłacalną formą „przechowywania” energii. Produktem spalania tego gazu jest woda, będąc zarazem jego źródłem (proces hydrolizy). Niewielkie, zaspokajające lokalne potrzeby instalacje, produkujące energię z wodoru są praktycznie bezemisyjne. Mogą one pracować w cyklu zamkniętym, wytwarzając wodór podczas sieciowych nadwyżek energetycznych (np. dostarczanych przez OZE) z wyprodukowanej wcześniej wody i uzupełniać okresowe niedobory energii w sieci dzięki jego spalaniu.

Stosunkowo niewielkie wymiary i objętości kawern magazynowych wodoru, w porównaniu do kawern magazynujących gaz ziemny czy paliwa, sprzyjają ich lokowaniu

Tabela 5

**Parametry optymalnych i perspektywicznych obszarów i otworów wiertniczych do lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowych wystąpieniach utworów solnych cyklotemu PZ3 cechsztynu w południowo-zachodniej Polsce**

Characteristics of optimal and prospective areas and boreholes favoured location of hydrogen storage caverns in the Zechstein PZ3 cyclothem stratiform salt bodies in south-western Poland

Lp. Number	Obszar lub otwór wiertniczy Area or borehole name	Liczba otworów wiertniczych Number of boreholes	Pokład soli kamiennej Rock salt seam			
			wartość value	strop top [m]	spąg bottom [m]	miąższość thickness [m]
Obszar optymalny (OO) / Optimal area						
1	OO NOWA SÓL	8	minimalna minimum	785,00	896,00	100,00
			maksymalna maximum	963,50	1111,50	162,50
			średnia average	889,38	1018,38	129,00
2	OO PRZYBOROWICE-KANIÓW	2	minimalna minimum	881,00	983,50	102,50
			maksymalna maximum	923,00	1051,50	128,50
			średnia average	902,00	1017,50	115,50
3	OO STRUŻKA-NIWISKA	6	minimalna minimum	759,50	920,00	101,00
			maksymalna maximum	926,50	1036,00	178,00
			średnia average	857,67	982,67	125,00
4	OO+OP ZAŁĘCZE	3	minimalna minimum	790,00	1100,00	195,00
			maksymalna maximum	950,00	1240,00	450,00
			średnia average	881,67	1175,00	293,33
Obszar prespektywiczny (OP) / Prospective area						
1	OP GRĄBKOWO-ROGOŻEWO	2	minimalna minimum	1264,50	1515,00	250,50
			maksymalna maximum	1297,00	1700,00	403,00
			średnia average	1280,75	1607,50	326,75
2	OP NOWA SÓL-KONRADOWO	3	minimalna minimum	1032,50	1188,00	155,50
			maksymalna maximum	1204,00	1381,00	189,00
			średnia average	1120,50	1294,33	173,83
3	OP RYBAKI	4	minimalna minimum	1314,00	1519,50	162,50
			maksymalna maximum	1368,00	1673,00	308,00
			średnia average	1351,00	1581,50	230,50
4	OP SĘKOWICE-NOWA WIOSKA	3	minimalna minimum	1230,50	1397,50	167,00
			maksymalna maximum	1325,50	1517,00	212,00
			średnia average	1287,00	1470,50	183,50
Optymalny otwór wiertniczy / Optimal borehole						
1	Nowa Rola-1	1		944,50	1053,50	109,00

w obrębie kompleksów soli kamiennej o mniejszej miąższości. Prosta budowa geologiczna pokładowych wystąpień soli kamiennej sprzyja budowie w ich obrębie licznych kawern.

Stosując założone parametry geologiczne (miąższość i głębokość zalegania ciała solnego), korzystne do lokowania kawern magazynowych wodoru, przeanalizowano pokładowe wystąpienia soli kamiennych do głęb. 2 km, wchodzących w skład sukcesji cyklotemowych górnego permu (cechsztyn) w Polsce.

Na terenie Polski północnej warunki te spełniają jedynie utwory solne cyklotemu PZ1 cechsztynu, w obrębie których wskazano 5 obszarów optymalnych (w tym 2 obszary obejmujące udokumentowane złoża soli kamiennej: Zatoka Pucka i Mechelinki) oraz jeden obszar perspektywiczny. Ponadto wskazano 17 pojedynczych otworów wiertniczych o parametrach optymalnych pokładu soli oraz dwa otwory perspektywiczne (tab. 6).

Na obszarze przedsudeckim w Polsce południowo-zachodniej wymienione warunki geologiczne spełniają utwory solne cyklotemów PZ1, PZ2 i PZ3 cechsztynu (tab. 6). W przypadku utworów cyklotemu PZ1 wskazano 4 obszary perspektywiczne, 6 otworów wiertniczych optymalnych i jeden perspektywiczny, dla soli kamiennych cyklotemu PZ2 jedynie 3 otwory o cechach optymalnych i jeden otwór perspektywiczny zaś dla chlorków cyklotemu PZ3 odpowiednio 4 obszary optymalne i 4 obszary perspektywiczne oraz jeden otwór wiertniczy optymalny.

W wystąpieniach pokładowych cechsztynskich soli kamiennych różnych cyklotemów w Polsce wyróżniono łącznie 9 obszarów optymalnych i 9 obszarów perspektywicznych, sprzyjających lokowaniu kawern magazynowych wodoru oraz 27 rozproszonych otworów optymalnych i 4 otwory perspektywiczne (tab. 6).

Dla wszystkich wyróżnionych obszarów i otworów wiertniczych przedstawiono parametry występowania (głębokość stropu i spągu pokładu, jego miąższość) obecnych tam pokładów soli kamiennej oraz zarejestrowanych przewarstwień siarczanów i soli potasowo-magnezowych, stwarzających utrudnienia przy ługowaniu kawern magazynowych.

Najbardziej perspektywicznym rejonem Polski do powstania takich magazynów jest, zdaniem autora, strefa pokładowych wystąpień soli kamiennych cyklotemu PZ1 cechsztynu na Pomorzu Gdańskim, a szczególnie obszary w pasie nadmorskim jak np. obszary Białogóra–Dębki–Żarnowiec, Karwia czy Darżlubie–Puck–Żelistrzewo oraz rejon Łeby z wieloma otworami wiertniczymi, rejestrującymi pokłady soli o optymalnych parametrach. Ogromny potencjał pod tym względem charakteryzuje dotychczas nie zagospodarowane udokumentowane złożo soli kamiennej Zatoka Pucka oraz zagospodarowane pod kawernowy magazyn gazu złożo Mechelinki, gdzie część przyszłych kawern magazynowych może być przeznaczona do gromadzenia wodoru. Utrudnienie w ich wykonaniu mogą stanowić częste przewarstwienia siarczanów, a lokalnie – soli potasowo-magnezowych, zaletą tych pokładowych wystąpień soli jest prosta budowa geologiczna i możliwość kontrolowanego zrzutu solanek ługowniczych do pobliskiego Bałtyku czy

Tabela 6

**Zestawienie ilości obszarów i otworów optymalnych i perspektywicznych do lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowych wystąpieniach górnopermskich (cechsztyn) soli kamiennych w Polsce**

Number of optimal and prospective areas and boreholes favoured location of hydrogen storage caverns in the Upper Permian (Zechstein) stratiform rock salt bodies in Poland

Cyklotem Cyclotheme	Obszar Area		Otwór wiertniczy Borehole	
	optymalny optimal	perspektywiczny prospective	optymalny optimal	perspektywiczny prospective
północna Polska / Northern Poland				
PZ1	5	1	17	2
południowo-zachodnia Polska / South-western Poland				
PZ1	–	4	6	1
PZ2	–	–	3	1
PZ3	4	4	1	–
SUMA/Total	9	9	27	4

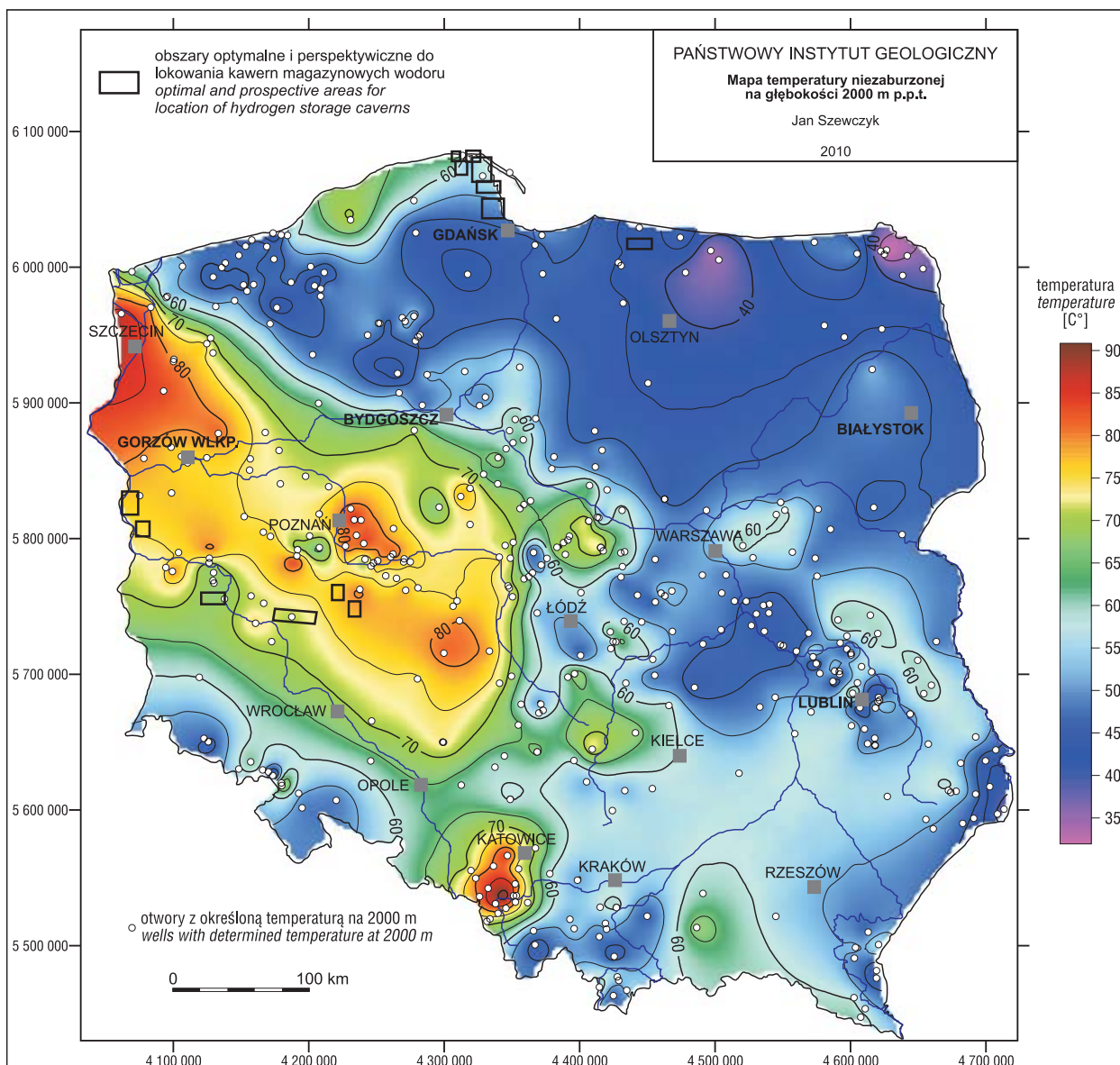
Zatoki Puckiej. Podobne korzystne warunki geologiczne cechują pokład soli w rejonie Półwyspu Helskiego i Mierzei Wiślanej. Dodatkowym atutem tych lokalizacji jest możliwość skorzystania w przyszłości z nadwyżek energii, produkowanej przez wielkie farmy wiatrowe planowane do wybudowania w polskiej strefie ekonomicznej Bałtyku.

Z kolei liczne wytypowane obszary i otwory wiertnicze, rejestrujące pokłady soli kamiennych cyklotemów PZ1, PZ2 i PZ3 cechsztynu, pomimo nieodnotowania istotnych przewarstwień siarczanowych i soli K-Mg, można ocenić jako mniej perspektywiczne ze względu na możliwe większe zaangażowanie tektoniczne tych utworów w strefie przedsudeckiej oraz istotne problemy z zagospodarowaniem solanek ługowniczych, gdyż ich bezpośredni zrzut do rzek jest wykluczony.

Istotnym czynnikiem, wpływającym na zachowanie się soli, jest temperatura panująca w górotworze. Wyższa temperatura, dzięki dobremu przewodnictwu cieplnemu soli, sprzyja zwiększonej jej mobilności, jak również rzutuje na ciśnienie gazu zatłaczanego w kawerny solne. W związku z tym lokalizację wytypowanych pod kątem parametrów geologicznych obszarów optymalnych i perspektywicznych do budowy kawern wodorowych porównano z obrazem rozmieszczenia temperatury na terenie Polski na głęb. 2 km (fig. 21).

Wynik porównania potwierdza tylko, że wskazane obszary ulokowane w Polsce północnej najlepiej się nadają do tego typu inwestycji (fig. 21). Na tym obszarze temperatura na głęb. 2 km nie przekracza 60°C zatem w przypadku dominujących tu obszarów optymalnych, gdzie przewidywany przedział głębokości operowania kawern wyniesie 0,5–1,0 km temperatura górotworu nie powinna być wyższa niż 15–30°C. Mniej korzystne warunki panują w przypadku obszarów wskazanych w Polsce południowo-zachodniej. O ile na obszarach ulokowanych w części południowej (okolice Nowej Soli i Głogowa) może można oczekiwać temperatury





**Fig. 21.** Mapa temperatury na głębokości 2 km na obszarze Polski (wg Szweczyka, 2010) z lokalizacją obszarów optymalnych i perspektywicznych dla umieszczenia kavern magazynowych wodoru w pokładowych wystąpieniach utworów solnych cechsztynu

Map of temperature at 2 km depth for Poland (after Szweczyk, 2010) with location of optimal and prospective areas for hydrogen storage caverns in the Zechstein stratiform salt bodies

w przedziale 20–55°C zależnie od przewidywanej głębokości umieszczenia kavern (0,5–1,7 km), o tyle w przypadku lokalizacji w części zachodniej (rejon Słubic i Gubina) i na południowy-wschód od Poznania należy oczekiwać wyższej temperatury górotworu w przedziale 20–65°C (fig. 21).

Przedstawiona charakterystyka obszarów i otoczenia pojedynczych otworów wiertniczych, zakwalifikowanych jako bardziej lub mniej przydatne do lokowania kavern magazynowych wodoru, nie obejmuje charakterystyki wykształcenia utworów solnych i sąsiadujących oraz uwarunkowań środowiskowych. Lista takich obiektów ma służyć potencjalnemu inwestorowi do wstępnej ich selekcji zaś wymie-

nione szczegółowe analizy muszą być wykonane po wyborze konkretnego miejsca.

Należy podkreślić, że wybór parametrów dokonanej selekcji był wyborem subiektywnym, bazującym na pewnych dotychczasowych doświadczeniach w konstrukcji podobnych kavern i analogiczne symulacje mogą być przeprowadzone przy zmienionych parametrach.

**Podziękowania.** Autor dziękuje Recenzentom: dr hab. Barbarze Radwanek-Bąk (PIG-PIB) i prof. dr hab. Pawłowi Henrykowi Karnkowskiemu (UW) za cenne uwagi i sugestie.



## LITERATURA

- 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. *W: XVII Międz. Sympozjum Solne QVO VADIS SAL pt. 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 kamiennej w Polsce – wstępne informacje. *Prz. Solny*, **12**: 11–18.
- CHROMIK M., 2018 – Koncepcja magazynowania nadwyżek energii. *W: XXII Międzynarodowe Sympozjum Solne QUO VADIS SAL pt. Sól skarbem Kujaw i Wielkopolski, Kopalnia Soli Kłodawa – Uniejów, 10–13. X 2018*: 20–22.
- CZAPOWSKI G., 2017 – Potencjał zasobowy soli kamiennej i soli potasowo-magnezowych obszaru przedśudeckiego. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **469**: 105–128.
- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., 2010 – Geology and resources of salt deposits in Poland: the state of the art. *Geol. Quart.*, **54**, 4: 509–518.
- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., 2012 – Salt resources in Poland at the beginning of XXI century. *Geol. Geophys. Environ.*, **38**, 2: 189–208.
- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., 2013 – Potencjał zasobowy soli kamiennej i soli potasowych w Polsce a perspektywy jego wykorzystania. *Gór. Odkryw.*, **54**, 2: 74–84.
- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., 2015 – Mapy wystąpień zasobów perspektywicznych soli w Polsce jako narzędzie w projektowaniu przyszłego zagospodarowania złóż kopalin. *Prz. Solny*, **11**: 5–31.
- CZAPOWSKI G., TARKOWSKI R., 2018 – Uwarunkowania geologiczne wybranych wysadów solnych w Polsce i ich przydatność dla budowy kawern do magazynowania wodoru. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **472**: 53–82.
- CZAPOWSKI G., TOMASSI-MORAWIEC H., 1985 – Sedymentacja i geochemia najstarszej soli kamiennej w rejonie Zatoki Puckiej. *Prz. Geol.*, **33**, 12: 663–670.
- 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., DĘBSKI J., KASPRZYK A., KIEŻEL W., LANGIER-KUŹNIAROWA A., PERYT T. M., 1992 – Monografia anhydrytu i soli kamiennej na monoklinie przedśudeckiej (rejon LGOM). *Narod. Arch. Geol. PIG, Warszawa [nr.inwent. 20/93]*.
- CZAPOWSKI G., TOMASSI-MORAWIEC H., CHEŁMIŃSKI J., TOMASZCZYK M., 2008 – Stopień rozpoznania i perspektywy zagospodarowania cechsztyńskich złóż soli w rejonie Zatoki Gdańskiej. *Gór. Odkryw.*, **XLX/II**, 2–3: 47–55.
- 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.
- GARLICKI A., 1968 – Autochtoniczna seria solna w miocenie Podkarpacia między Skawiną a Tarnowem. *Biul. Inst. Geol.*, **12**, 215: 5–78.
- GAŚKA K., 2000 – Kawernowy Podziemny Magazyn Gazu „Mogilno”. *Tech. Posz. Geol., Geosynopt. Geoterm.*, **42**, 223: 33–35.
- GAŚKA K., HOSZOWSKI A., GMIŃSKI Z., KUREK A., 2012 – Monografia podziemnych magazynów gazu w Polsce. *Stow. Inżynierów i Techników Przemysłu Naftowego i Gazowniczego, Oddział Warszawa II*.
- KALISKI M., SIKORA A., 2013 – Wodór a podziemne magazynowanie energii w strukturach solnych. *Prz. Solny*, **9**: 26–32.
- KUNSTMAN A., URBAŃCZYK K., 2013 – Podziemne magazynowanie energii: wodór w kawernach solnych – aspekty ekonomiczne. *Prz. Solny*, **9**: 20–25.
- LASKOWSKA T., SZCZEBYŁO J., GAŚKA K., WILKOSZ P., 2009 – Polskie magazyny gazu ziemnego – od Mogilna do Kosakowa. *Prz. Geol.*, **57**, 9: 755–756.
- LEWANDOWSKA-ŚMIERZCHAŁSKA J., TARKOWSKI R., ULIASZ-MISIAK B., 2018 – Screening and ranking framework for underground hydrogen storage site selection in Poland. *Int. J. Hydrog. Energy.*, **43**, 9: 4401–4414.
- MACIEJEWSKI A., 2008 – Podziemne magazynowanie paliw płynnych. *Gosp. Sur. Miner.*, **34** (3/2): 39–53.
- MIKULSKI S.Z., OSZCZEPALSKI S., CZAPOWSKI G., SADŁOWSKA K., GAŚIEWICZ A., MARKOWIAK M., STRZELSKA-SMAKOWSKA B., SZTROMWASSER E., KOŹMA K., SIKORSKA-MAYKOWSKA M., PAULO A., CHMIELEWSKI A., RADWANEK-BAK B., GIEŁŻECKA-MĄDRY D., MĄDRY S., MICHNIEWICZ M., BUKOWSKI K., KUĆ P., BLIŹNIUK A., KOSTRZ-SIKORA P., PIOTROWSKA M., 2015 – Mapy obszarów perspektywicznych wystąpień rud metali i surowców chemicznych w Polsce w skali 1:200 000 wraz z ich oceną surowcową i ograniczeniami środowiskowymi i zagospodarowania przestrzennego. *Narod. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa [nr.inwent. 1714/2015]*.
- 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., RADWANEK-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.
- PERYT T.M., 2019 – Państwowy Instytut Geologiczny jako państwowa służba geologiczna – sto lat w służbie Niepodległej. *Prz. Geol.*, **67**, 7: 519–534.
- PIZON A., PERYT T.M., DĘBSKI J., 1985 – Środowisko powstania polihalityw cechsztyńskich w rejonie Zatoki Puckiej. *Prz. Geol.*, **33**, 12: 659–663.
- PODEMSKI M., 1966 – Sole potasowe cechsztyńskiego poziomu starszej soli potasowej (K2) z okolicy Nowej Soli. *Narod. Arch. Geol. PIG, Warszawa [nr.inwent. 4121/191]*.
- PODEMSKI M., 1972 – Cechsztyńskie sole kamienne i potasowe cyklotomów Z2, Z3 w okolicach Nowej Soli. *Biul. Inst. Geol.*, **260**, 2: 5–62.
- PODEMSKI M., 1973 – Sedymentacja cechsztyńska zachodniej części monokliny przedśudeckiej na przykładzie okolicy Nowej Soli. *Pr. Inst. Geol.*, **71**: 1–101.

- PODEMSKI M., 1974 – Wyniki dotychczasowych badań soli potasowych w strefie przedśudeckiej. *Prz. Geol.*, **21**, 1: 7–12.
- PODEMSKI M., 1975 – Sole cechsztyńskie w rejonie struktury Rybaki. *Biul. Inst. Geol.*, **286**, 3: 5–63.
- REINISCH R., 2000 – Wybrane, istotne aspekty podziemnych magazynów gazu (u progu XXI wieku). 1–301. Wydaw. PLJ, Warszawa.
- SZEWCZYK J., 2010 – Geofizyczne oraz hydrogeologiczne warunki pozyskiwania energii geotermicznej w Polsce. *Prz. Geol.*, **58**, 7: 566–573.
- TARKOWSKI R., 2017 – Perspectives of using the geological subsurface for hydrogen storage in Poland. *Int. J. Hydrog. Energy*, **42**: 347–355.
- TARKOWSKI R., 2019 – Underground Hydrogen Storage: Characteristics and prospects. *Renew Sust. Energy Rev.*, **105**: 86–94.
- TARKOWSKI R., CZAPOWSKI G., 2018 – Salt domes in Poland – potential sites for hydrogen storage in caverns. *Int. J. Hydrog. Energy*, **43**: 21414–21427.
- TOMASSI-MORAWIEC H., 2003 – Charakterystyka geochemiczna najstarszej soli kamiennej (Na1) w rejonie Zatoki Puckiej. *Prz. Geol.*, **51**, 8: 693–702.
- WAGNER R., 1991 – Stratigraphie des höchsten Zechstein in Polnischen Zentralbecken. *Zbl. Geol. Paläont.*, **1**, 4: 883–892.
- WAGNER R., 1994 – Stratygrafia i rozwój basenu cechsztyńskiego na Niziu Polskim. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **146**: 1–71.
- WAGNER R., PERYT T. M., 1997 – Possibility of sequence stratigraphy subdivision of the Zechstein in the Polish Basin. *Geol. Quart.*, **41**, 4: 457–474.

## SUMMARY

Underground hydrogen storage is a profitable and safe form of energy sources storage, responding quickly to fluctuations on the energy market especially in a case of energy produced by the Renewed Energy Sources being non-toxic to the environment, because water is both the gas source and the final product in such installations. Salt caverns, leached in thick rock salt complexes of salt domes and stratiform salt occurrences (Fig. 1), are one of the recommended optimal forms of such gas storage (Fig. 2).

Size and volume of hydrogen storage caverns could be smaller than of these dedicated to natural gas, so they may be often located in stratiform rock salt occurrences. These stratiform salt bodies are characterized by a simple geological structure (Fig. 2B) compared with the salt domes (Fig. 2A), so they are very positive sites for leaching of numerous caverns.

The Upper Permian (Zechstein) rock salts in Poland (Tab. 1) are the best bodies for leaching storage caverns and data on their occurrences enabled to point out several areas and single boreholes within the stratiform rock salt bodies, in which salt seams have geological parameters positive for location of hydrogen storage caverns. The assumed geological criteria for such seams are as follows: for the optimal location, the salt seam thickness is >100 m and the depth of seam top no deeper than 1 km, but the prospective sites are characterized by a salt seam top placed within a 1–1.5 km interval and its thickness is >145 m.

These criteria are fulfilled in northern Poland only by rock salts of the Zechstein PZ1 cyclothem, in which five optimal areas (two areas correspond with the documented Puck Bay and Mechelinki rock salt deposits) and one prospective area (Figs 3, 4, 7; Tab. 3) have been distinguished and characterized. Moreover, 17 optimal boreholes and two prospective wells have been indicated (Figs 4, 5, 6, 8; Tab. 2).

In south-western Poland, the rock salts of three Zechstein cyclothem: PZ1, PZ2 and PZ3, were considered. For stratiform salt occurrences of the PZ1 cyclothem, 4 prospective areas and six optimal and one prospective boreholes (Figs 9 to 12; Tab. 3) are shown, for rock salts of the PZ2 cyclothem – three optimal and one prospective boreholes (Figs 13 to 15; Tab. 4), and for chlorides of the PZ3 cyclothem – four optimal and four prospective areas and one optimal borehole (Figs 16 to 20; Tab. 5).

Concluding, in the Zechstein stratiform rock salt bodies of three cyclothem, nine optimal and nine prospective areas, as well as dispersed 27 optimal and four prospective boreholes have been distinguished, in which geological parameters of these rocks favoured location of hydrogen storage caverns (Tab. 6).

In the author's opinion, the most prospective place for location of future hydrogen storage caverns is the rock salt seam of the PZ1 cyclothem, extending along the Baltic and the Puck Bay shores, because of both the simple seam structure and the possibility of controlled input of leaching brines into the sea and bay waters. The expected relatively low temperatures of 20–30°C within the salt seam with operating storage caverns, interpreted after the image of temperature distribution in Poland at 2 km depth (Fig. 21), also recommend the optimal areas dominated there as the best ones. An additional argument for such a choice is the potential usage of energy surplus, required for water hydrolysis in the future installations but produced by the planned large wind farms in the Polish economic zone of the Baltic Sea. For selected sites representing rock salt seams of the PZ1 to PZ3 cyclothem in south-western Poland, the real problem will be management of leaching brines – their direct input to rivers is excluded, as well as higher temperatures of salt seams estimated at 20–65°C.

## Objaśnienie do figur 4–20

Explanations for Figures 4–20

- T-1      otwór wiertniczy  
borehole
- otwór wiertniczy z warstwą anhydrytu śródsolnego  
borehole with a bed of intrasalt anhydrite
- otwór wiertniczy z optymalnym wystąpieniem pokładu soli kamiennej  
borehole with optimal rock salt seam
- otwór wiertniczy z perspektywnym wystąpieniem pokładu soli kamiennej  
borehole with prospective rock salt seam
- otwór wiertniczy z warstwą soli K-Mg w pokładzie soli kamiennej  
borehole with a bed of K-Mg salts within rock salt seam

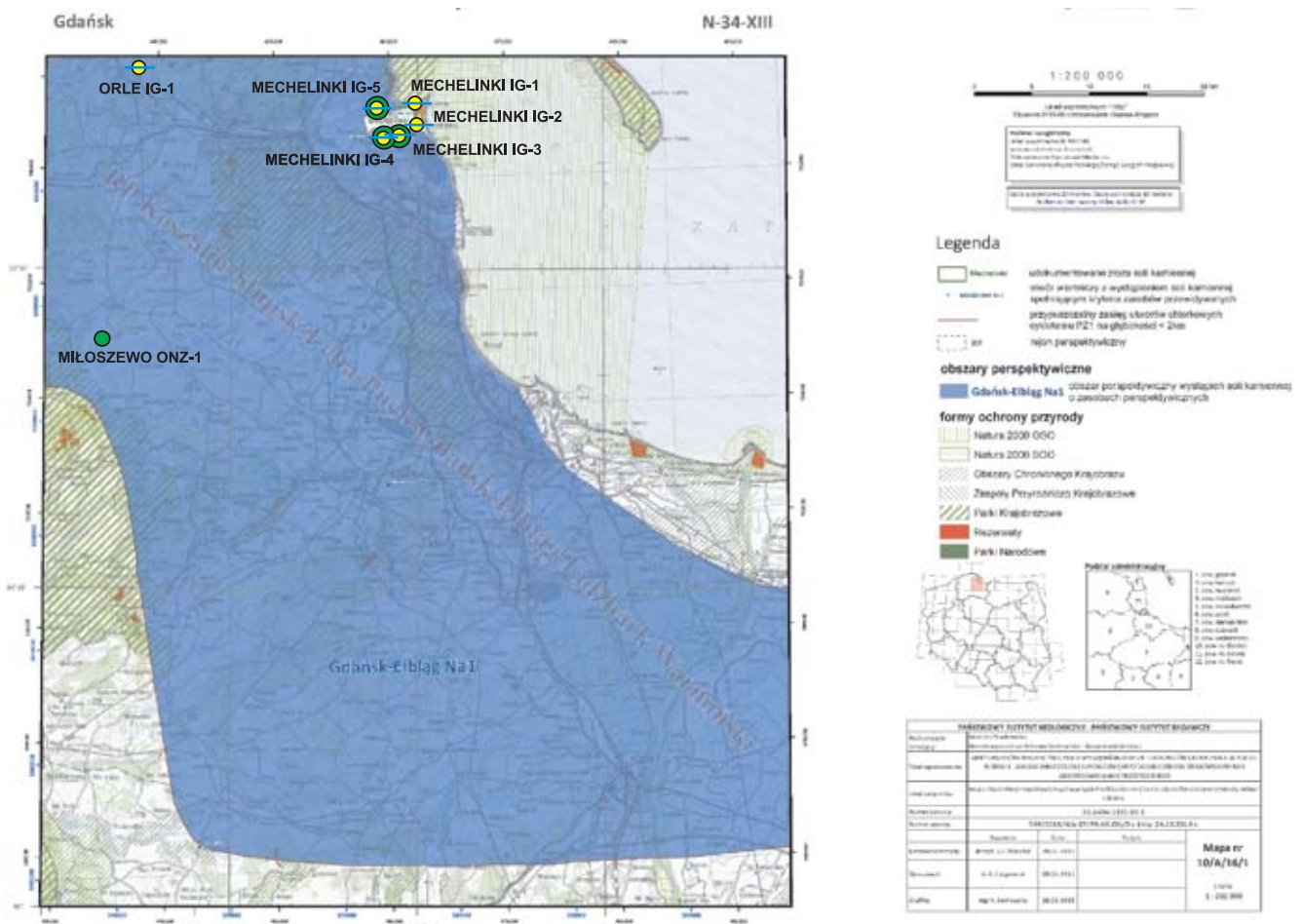
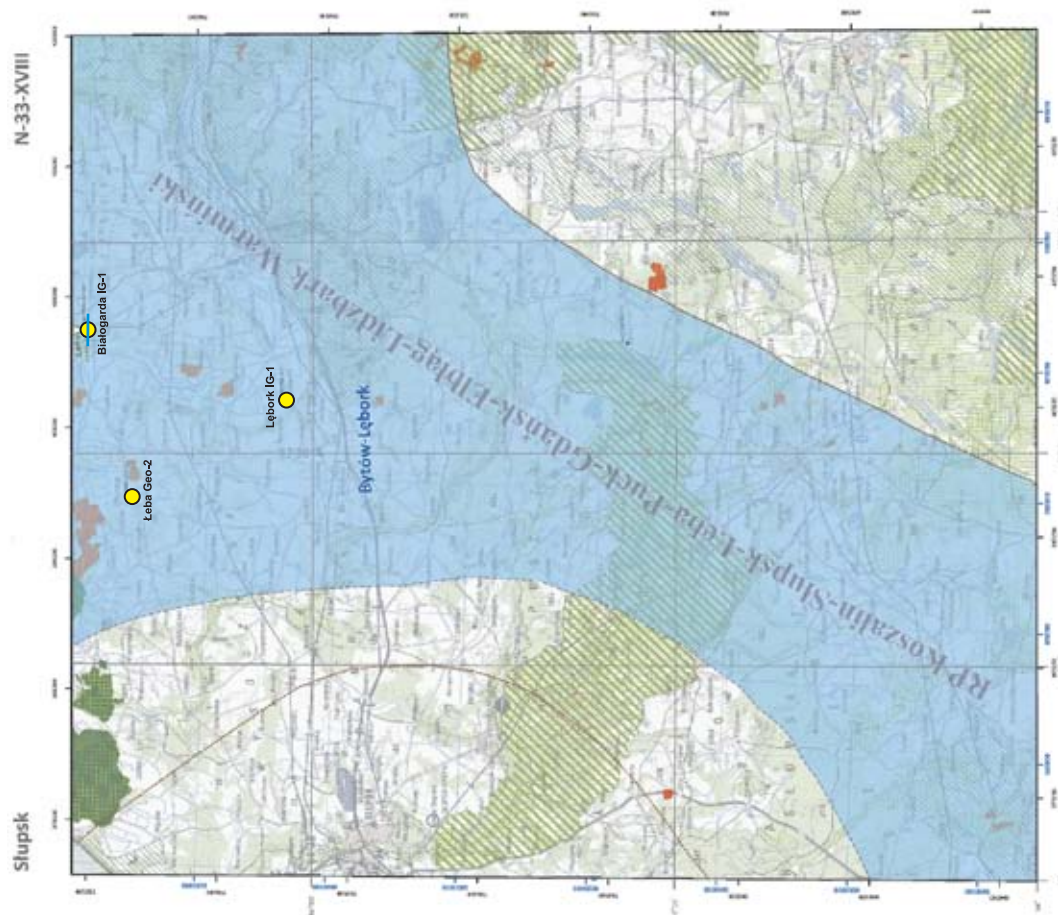


Fig. 4. Otwory wiertnicze optymalne i perspektywiczne do lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowym wystąpieniu utworów solnych cyklotemu PZ1 cechsztynu w rejonie Trójmiasta (arkusz Gdańsk mapy w skali 1:200 000; wg Mikulskiego i in., 2015)

Optimal and prospective boreholes for location of hydrogen storage caverns in the Zechstein (PZ1 cyclothem) stratiform salt body near the Gdynia-Sopot-Gdańsk agglomeration (Gdańsk map sheet at scale 1:200 000; after Mikulski *et al.*, 2015)







1:200 000

Legenda

- oblasty perspektywiczne
- oblasty ochrony przyrody
- formy ochrony przyrody
- oblasty perspektywiczne

Mapa nr 10/0/13/1

Fig. 6. Otwory wiertnicze optymalne do lokowania kavern magazynowych wodoru w pokładowym wystąpieniu utworów solnych cyklotemu PZ1 cechystynu w rejonie Lęborka (arkusz Słupsk mapy w skali 1:200 000; wg Mikulskiego i in., 2015)

Optimal boreholes for location of hydrogen storage caverns in the Zechstein (PZ1 cyclothem) stratiform salt body in the Lębork region (Słupsk map sheet at scale 1:200 000; after Mikulski *et al.*, 2015)







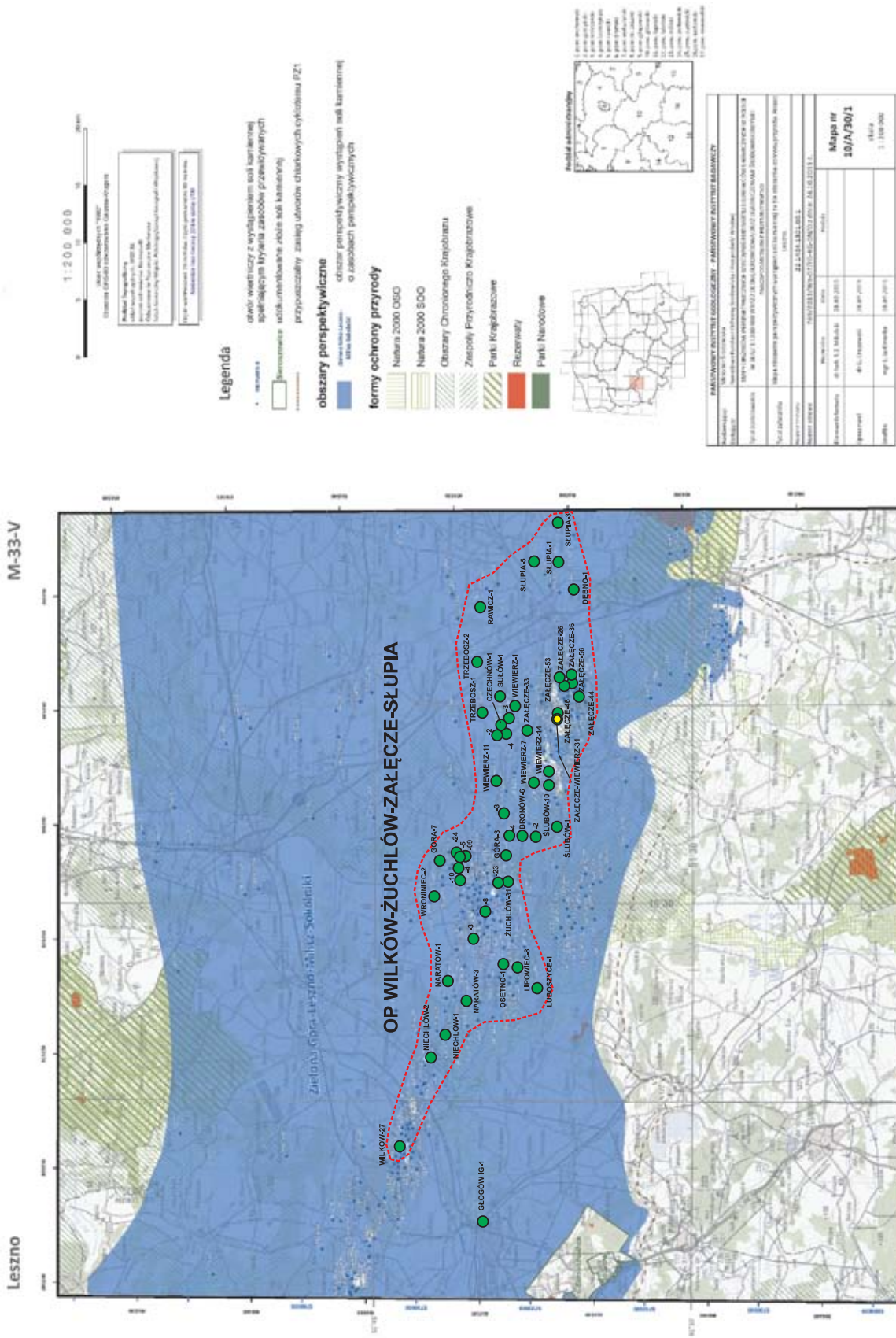
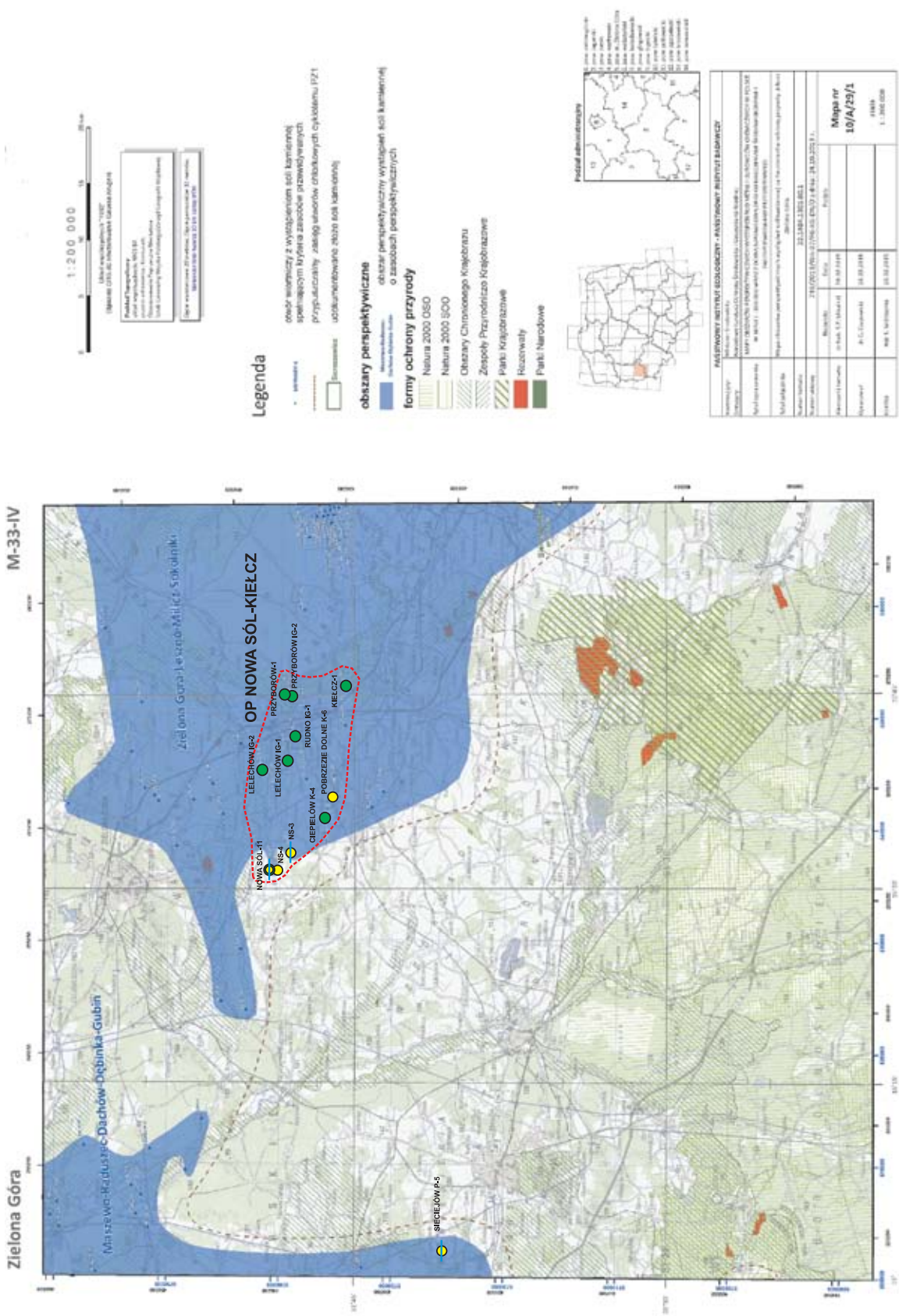


Fig. 9. Obszar perspektywiczny Wilków-Żuchłów-Zależce-Słupia i perspektywiczny otwór wiertniczy Głogów IG-1 do lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowym wystąpieniu utworów solnych cyklotemu PZ1 cechsztynu w rejonie Głogów-Rawicz (arkusz Leszno mapy w skali 1:200 000; wg Mikulskiego i in., 2015)

Wilków-Żuchłów-Zależce-Słupia prospective area and the Głogów IG-1 prospective borehole for location of hydrogen storage caverns in the Zechstein PZ1 cyclothem stratiform salt body in the Głogów-Rawicz area (Leszno map sheet at scale 1:200 000; after Mikulski *et al.*, 2015)





**Fig. 10. Obszar perspektywiczny Nowa Słupia–Kielcz i 4 optymalne otwory wiertnicze do lokowania kavern magazynowych wodoru w pokładowym wystąpieniu utworów solnych cyklotemu PZ1 cechsztynu w rejonie Nowej Sól (arkusz Zielona Góra mapy w skali 1:200 000; wg Mikulskiego i in., 2015)**

Nowa Słupia–Kielcz, prospective area and 4 optimal boreholes for location of hydrogen storage caverns in the Zechstein PZ1 cyclothem stratiform salt body in the Nowa Sól area (Zielona Góra map sheet at scale 1:200 000; after Mikulski *et al.*, 2015)

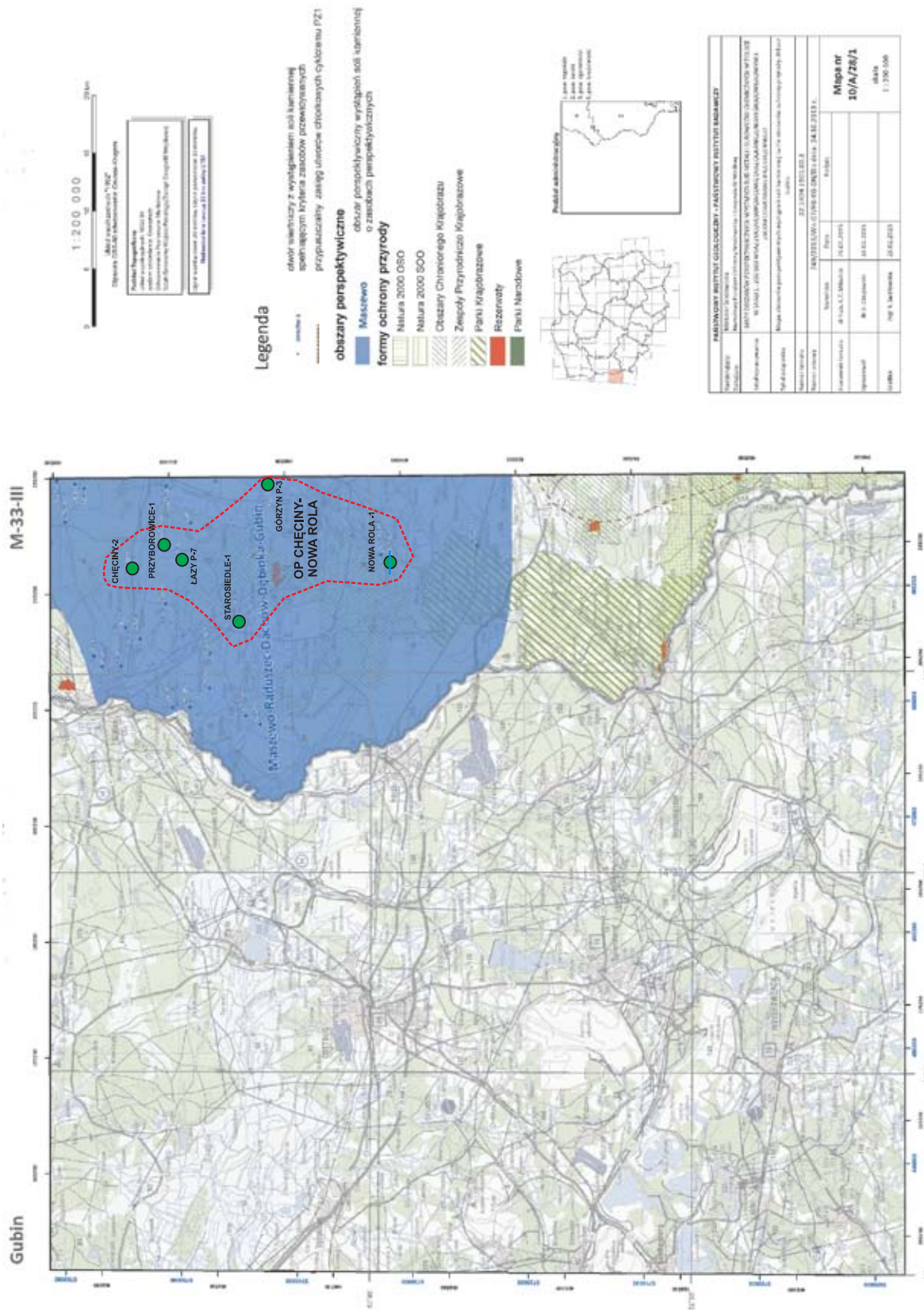
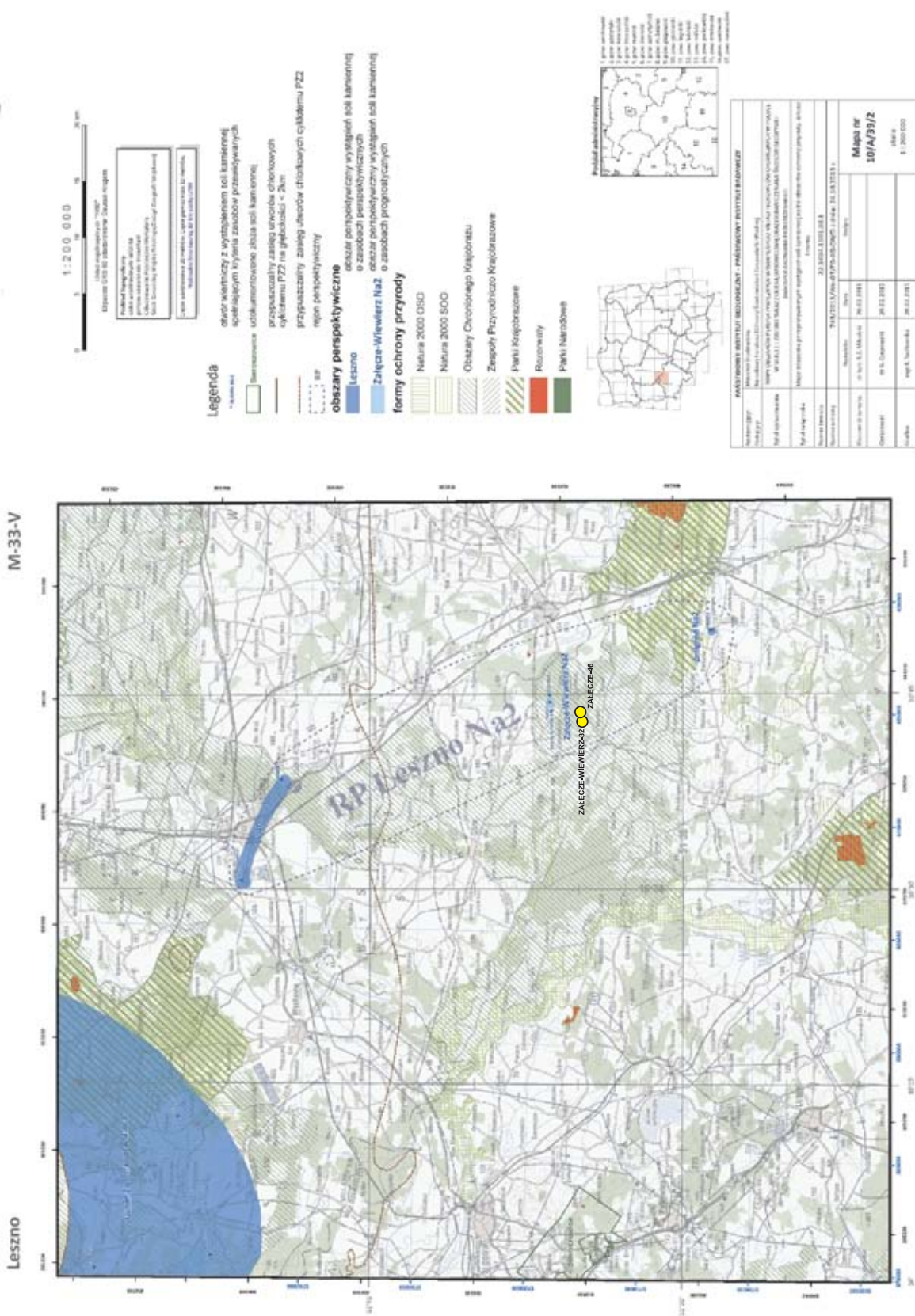


Fig. 11. Obszar perspektywiczny Chęciny–Nowa Rola do lokowania kavern magazynowych wodoru w pokładowym wystąpieniu utworów solnych cyklotemu PZ1 cechsztynny w rejonie Lubska (arkusz Gubin mapy w skali 1:200 000; wg Mikulskiego i in., 2015)

Chęciny–Nowa Rola prospective area for location of hydrogen storage caverns in the Zechstein PZ1 cyclothem stratiform salt body near Lubska (Gubin map sheet at scale 1:200 000; after Mikulski *et al.*, 2015)







**Fig. 13. Dwa optymalne otwory wiertnicze (Załącznik-46 i Załącznik-32) do lokowania kavern magazynowych wodoru w pokładowym wystąpieniu utworów solnych cyklotemu PZ2 czechstynu w rejonie Rawicza (arkusz Leszno mapy w skali 1:200 000; wg Mikulskiego i in., 2015)**  
Two optimal boreholes (Załącznik-46 and Załącznik-32) for location of hydrogen storage caverns in the Zechstein PZ2 cyclothem stratiform salt body near Rawicz (Leszno map sheet at scale 1:200 000; after Mikulski *et al.*, 2015)



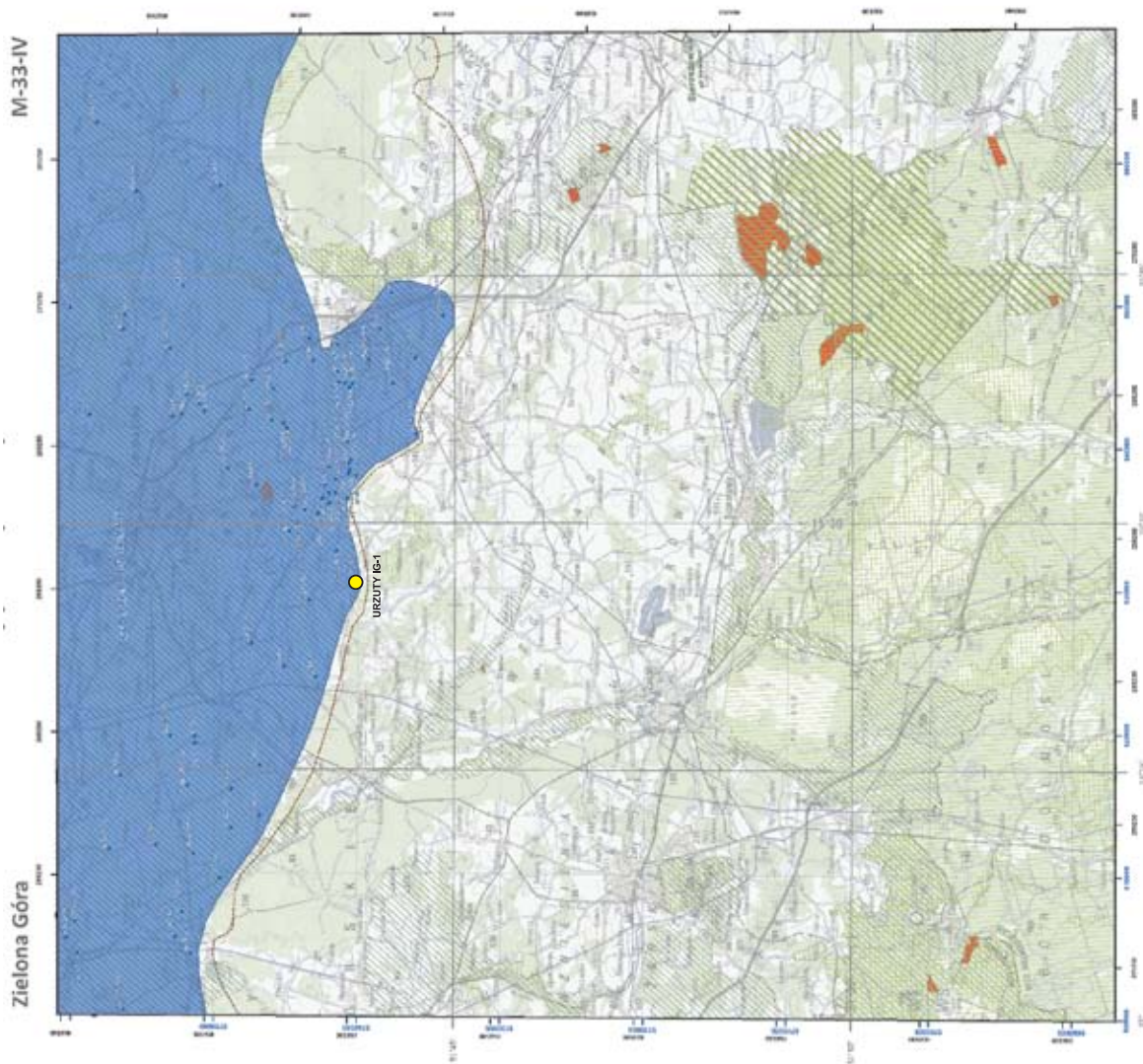


Fig. 14. Optymalny otwór wiertniczy Urzuty IG-1 do lokowania kavern magazynowych wodoru w pokładowym wystąpieniu utworów solnych cyklotemu PZ2 cechsztynu w rejonie Żagania (arkusz Zielona Góra mapy w skali 1:200 000; wg Mikulskiego i in., 2015)

Urzuty IG-1 optimal borehole for location of hydrogen storage caverns in the Zechstein PZ2 cyclothem stratiform salt body near Żagań (Zielona Góra map sheet at scale 1:200 000; after Mikulski *et al.*, 2015)

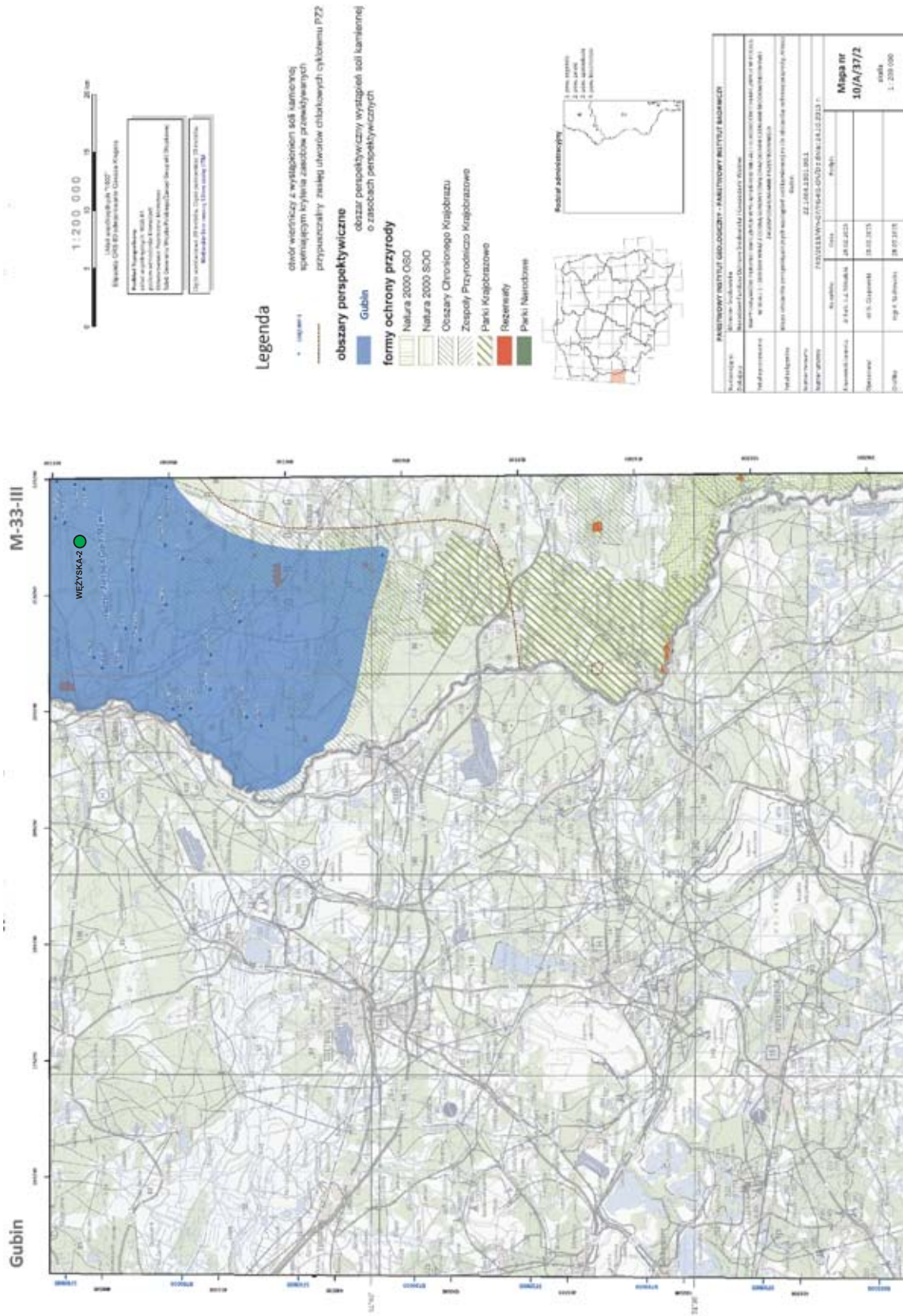


Fig. 15. Perspektywiczny otwór wiertniczy Weżyska-2 do lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowym wystąpieniu utworów solnych cyklotemu PZ2 cechsztynu w rejonie Gubina (arkusz Gubin mapy w skali 1:200 000; wg Mikulskiego i in., 2015)

Weżyska-2 prospective borehole for location of hydrogen storage caverns in the Zechstein PZ2 cyclothem stratiform salt body near Gubin (Gubin map sheet at scale 1:200 000; after Mikulski *et al.*, 2015)



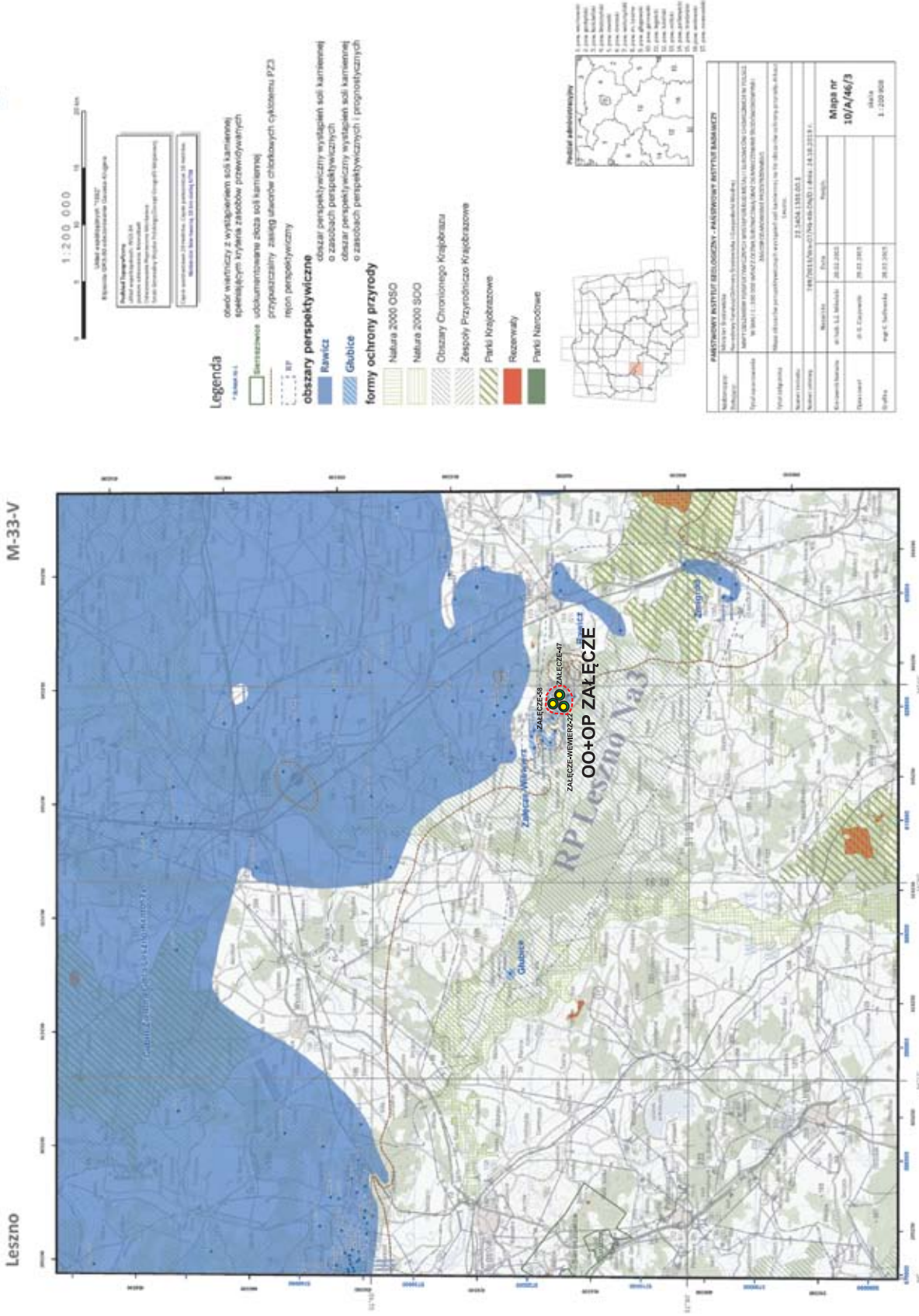


Fig. 16. Optymalno-perspektywiczny obszar Zaleczone do lokowania kavern magazynowych wodoru w pokładowym wystąpieniu utworów solnych cyklotemu PZ3 cechszyny w rejonie Rawicza (arkusz Leszno mapy w skali 1:200 000; wg Mikulskiego i in., 2015)

Zaleczone optimal-prospective area for location of hydrogen storage caverns in the Zechstein PZ3 cyclothem stratiform salt body near Rawicz (Leszno map sheet at scale 1:200 000; after Mikulski et al., 2015)

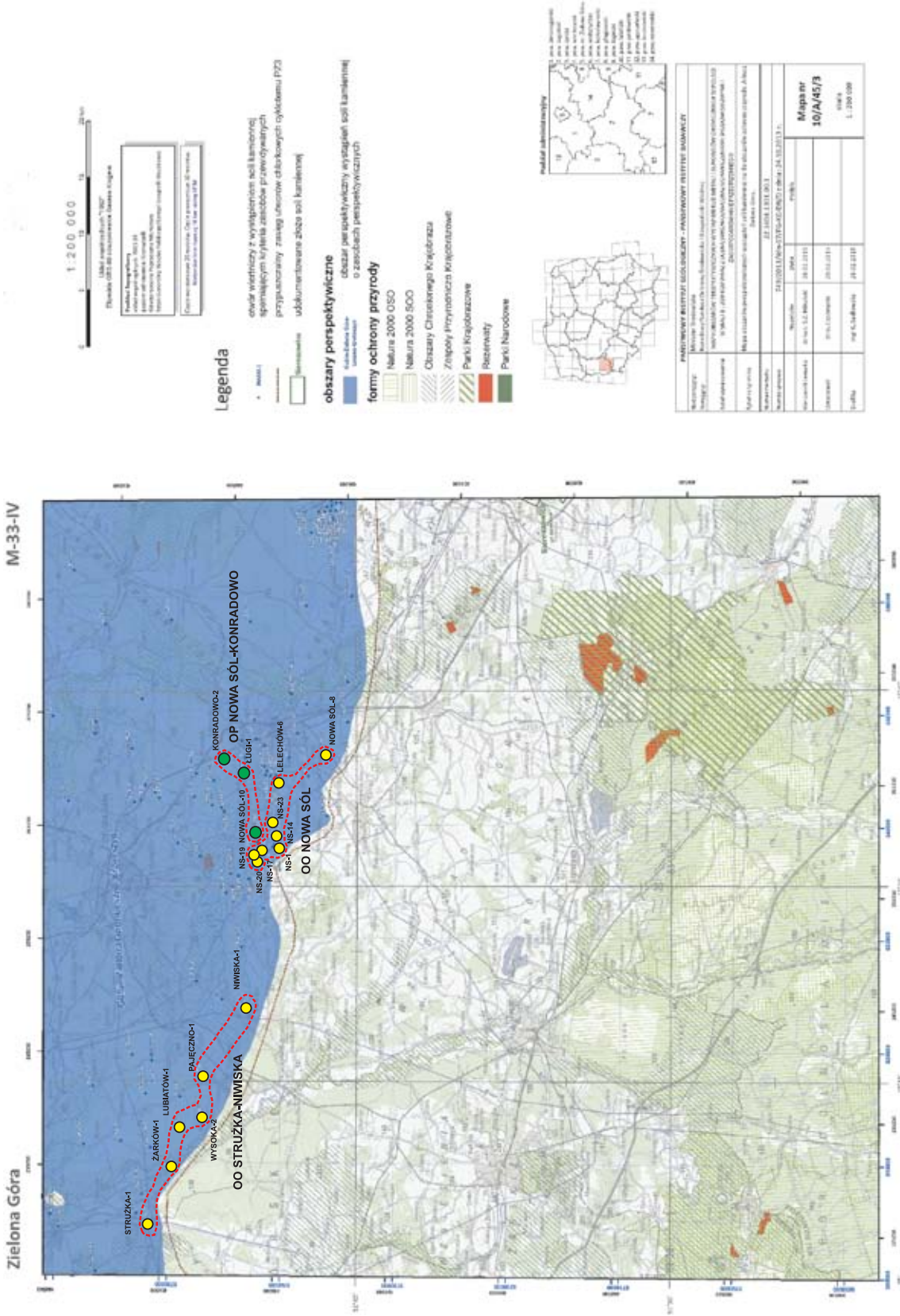


Fig. 17. Dwa obszary optymalne (Strużka–Niwiska i Nowa Sól) oraz obszar perspektywiczny Nowa Sól–Konradowo do lokowania kavern magazynowych wodoru w pokładowym wystąpieniu utworów solnych cyklotemu PZ3 cechsztynu w rejonie Nowej Sól (arkusz Zielona Góra mapy w skali 1:200 000; wg Mikulskiego i in., 2015)

Two optimal areas (Strużka–Niwiska and Nowa Sól) and Nowa Sól–Konradowo prospective area for location of hydrogen storage caverns in the Zechstein PZ3 cyclothem stratiform salt body near Nowa Sól (Zielona Góra map sheet at scale 1:200 000; after Mikulski *et al.*, 2015)



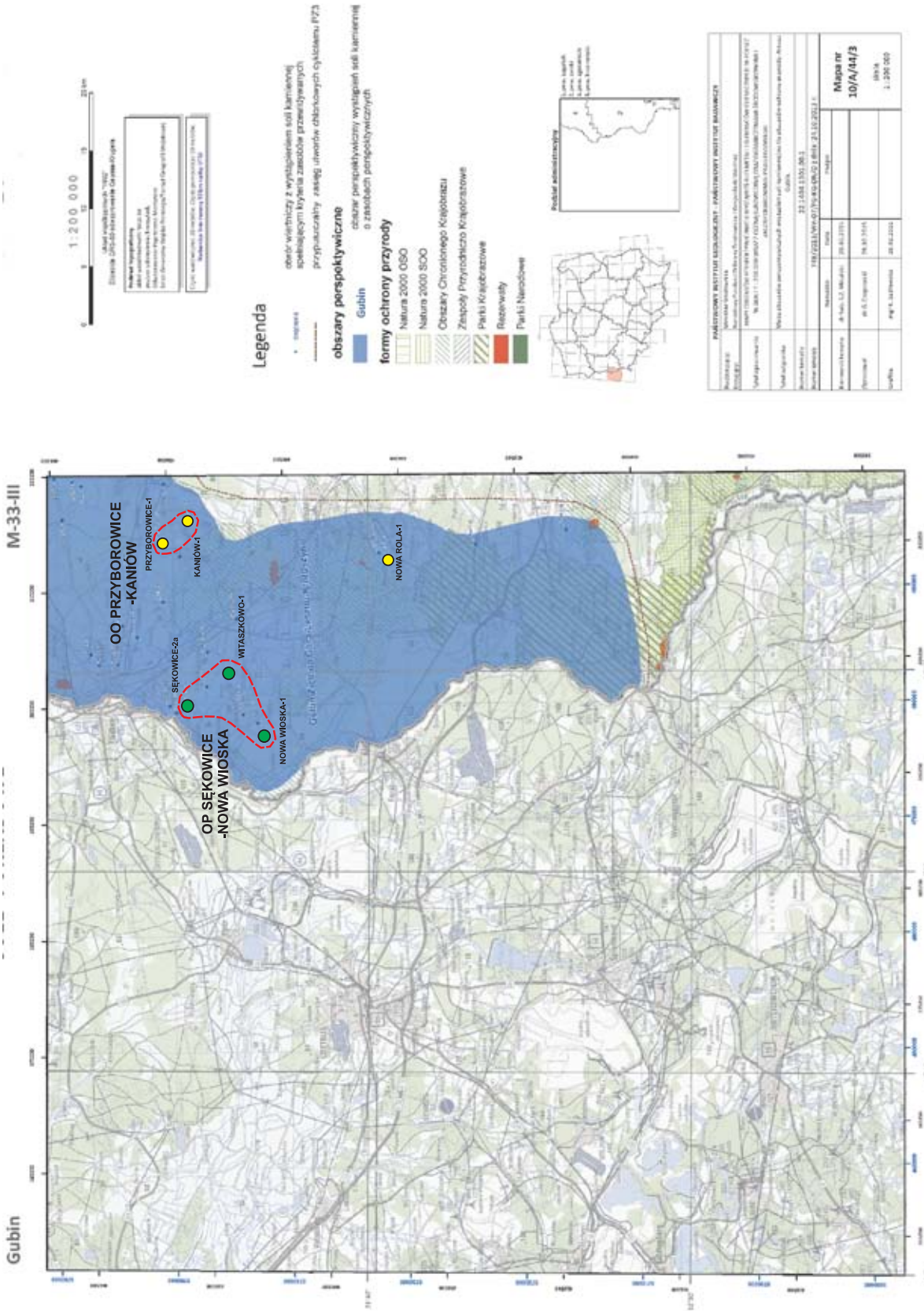


Fig. 18. Obszary: optymalny Przyborowice-Kaniów i perspektywiczny Sękowice-Nowa Wioska oraz otwór optymalny Nowa Rola-1 do lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowym wystąpieniu utworów solnych cyklohemu PZ3 cechszynu w rejonie Lubuska (arkusz Gubin mapy w skali 1:200 000; wg Mikulskiego i in., 2015)

Przyborowice-Kaniów optimal area and Sękowice-Nowa Wioska prospective area and the Nowa Rola-1 optimal borehole for location of hydrogen storage caverns in the Zechstein PZ3 cyclothem stratiform salt body near Lubusko (Gubin map sheet at scale 1:200 000; after Mikulski *et al.*, 2015)







