

Maciej R. KLONOWSKI¹, Jacek KOCYŁA¹, Grzegorz RYŻYŃSKI¹, Mateusz ŻERUŃ¹

OCENA POTENCJAŁU GEOTERMII NISKOTEMPERATUROWEJ NA PODSTAWIE ANALIZY, INTERPRETACJI I REKLASYFIKACJI DANYCH GEOLOGICZNYCH NA TERENACH ZURBANIZOWANYCH

STRESZCZENIE

Gruntowe pompy ciepła (GPC) wykorzystujące niskotemperaturową energię geotermalną stanowią nowoczesne i cenione źródło ogrzewania i chłodzenia budynków. W ostatnich latach w Europie zastosowanie GPC, przede wszystkim systemów zamkniętych z otworowymi wymiennikami ciepła (OWC), stale wzrasta. GPC umożliwiają redukcję niskiej emisji, a ich przeznaczenie dotyczy zarówno miast, jak i obszarów wiejskich. O efektywności GPC decydują warunki geotermiczne podłoża skalnego, które zależą głównie od budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych, stąd ich rozpoznanie jest zasadnicze dla odpowiedniego projektowania i eksploatacji GPC.

Artykuł prezentuje metodykę przetwarzania, analizy i interpretacji danych dotyczących podłoża skalnego dla obszarów miejskich na przykładzie wybranej inwestycji, opracowaną w projekcie Geothermal4PL. Dane pochodzące z tematycznych baz danych, atlasów i map seryjnych zgromadzone zostały w bazie danych o ujednoczonej strukturze umożliwiającej ich analizę przestrzenną z wykorzystaniem GIS. Zgodnie z przyjętym algorytmem wykonano reklasyfikację właściwości litologicznych na geotermiczne oraz obliczono wartości przewodności cieplnej λ [W/m·K] i jednostkowej wydajności cieplnej q_v [W/m] analizowanych skał i gruntów. Na tej podstawie wykonano cztery mapy średniej przewodności cieplnej λ i jednostkowej wydajności cieplnej q_v dla 1800 [godzin pracy/rok], dla przedziałów głębokościowych do 40, 70, 100 i 130 m p.p.t. dla każdej lokalizacji. Wyniki badań umożliwiły charakterystykę przydatności danej lokalizacji dla zastosowania GPC i ocenę potencjału geotermii niskotemperaturowej.

SŁOWA KLUCZOWE

Geotermia niskotemperaturowa, geologiczne bazy danych, przetwarzanie i reklasyfikacja danych, kartowanie geotermiczne

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

WPROWADZENIE

Pakiet klimatyczno-energetyczny do roku 2020 przyjęty przez kraje Unii Europejskiej stanowi zestawienie przepisów prawa dotyczących energii i zmian klimatycznych i zakłada:

- 1) ograniczenie o 20% emisji gazów cieplarnianych (w stosunku do poziomu z 1990 r.),
- 2) zwiększenie do 20% udziału OZE w całkowitym zużyciu energii w UE oraz
- 3) zwiększenie o 20% efektywności energetycznej (Komunikat Komisji. EUROPA 2020 2010).

Częścią pakietu jest obowiązująca obecnie Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych, inaczej nazywana Dyrektywą OZE. Działania Komisji Europejskiej zmierzają do kontynuacji restrykcyjnej polityki dotyczącej klimatu i energii także po roku 2020 (Komunikat Komisji. Ramy polityczne na okres 2020–2030 dotyczące klimatu i energii 2014; Porozumienie Paryskie 2016).

Zgodnie z danymi Głównego Urzędu Statystycznego (Berent-Kowalska i in. 2016) udział energii ze źródeł odnawialnych w energii pierwotnej ogółem w roku 2015 wynosił dla 28 krajów Unii Europejskiej (UE-28) 26,7%, a dla Polski – 13,1%. W tym samym roku udział energii geotermalnej (wszystkie rodzaje ogółem) pośród wszystkich nośników energii odnawialnej wynosił 3,2 i 0,2%, odpowiednio dla UE-28 i Polski. Wdrażanie Dyrektywy OZE i potrzeba mitygowania skutków niskiej emisji, w tym smogu, na obszarach zurbanizowanych powodują zwiększone zainteresowanie inwestycjami w branżę geotermalną (Kępińska 2015). Nowe inwestycje można stymulować nowelizacją polityki i regulacji prawnych państwa oraz Unii Europejskiej. Obecnie najbardziej istotne znaczenie dla rozwoju branży OZE w Polsce, w tym geotermii, ma tzw. Program „Czyste Powietrze” (2018–2020), którego celem jest poprawa efektywności energetycznej budynków i redukcja emisji pyłów i gazów przez istniejące lub nowo budowane jednorodzinne budynki mieszkalne (Ministerstwo Energii 2018).

Ogrzewanie i chłodzenie budynków stanowi główną część zużycia energii pierwotnej (Nejat i in. 2015), a powszechne tanie systemy ogrzewania na paliwo stałe przyczyniają się do zanieczyszczenia atmosfery m.in. pyłami zawieszonymi i gazami cieplarnianymi, oraz powstawania niskiej emisji i smogu na obszarach zurbanizowanych (Molina M.J. i Molina L.T. 2004; Juda-Rezler i Toczko red. 2016). Alternatywą są pompy ciepła, w tym tzw. gruntowe pompy ciepła działające w systemie zamkniętym (GPC), pozyskujące energię cieplną z podłoża skalnego poprzez otworowe wymienniki ciepła (OWC), z głębokości od około 100 do około 300–400 metrów p.p.t., w zależności m.in. od lokalnych warunków naturalnych i obowiązujących przepisów prawa. Ten rodzaj energii jest najczęściej nazywany „geotermią niskotemperaturową”, a czasami także „geotermią niskiej entalpii”, czy też „płytką energią geotermalną”. Wszystkie wymienione terminy w sposób mniej lub bardziej dokładny opisują wybrane charakterystyczne cechy opisywanego zjawiska przyrodniczego, choć żaden z nich nie czyni tego w pełni. Technologia GPC jest wydajna ze względu na niewielką zmienność temperatury środowiska skalnego w otoczeniu OWC, pozwalającą

osiągać wyższe wartości sezonowego współczynnika efektywności w porównaniu do np. powietrznych pomp ciepła (Safa i in. 2015). W roku 2015 całkowita liczba instalacji GPC w Europie przekroczyła 1,7 miliona (EGEC 2017), jednak udział technologii GPC w redukcji zanieczyszczenia atmosfery w większości miast Europy jest wciąż relatywnie niski (Casasso 2017), co może być spowodowane m.in.: znacznymi kosztami początkowymi inwestycji – zakupem GPC, wykonaniem OWC, a w następnej kolejności także relatywnie wysokimi cenami energii elektrycznej (Casasso 2017).

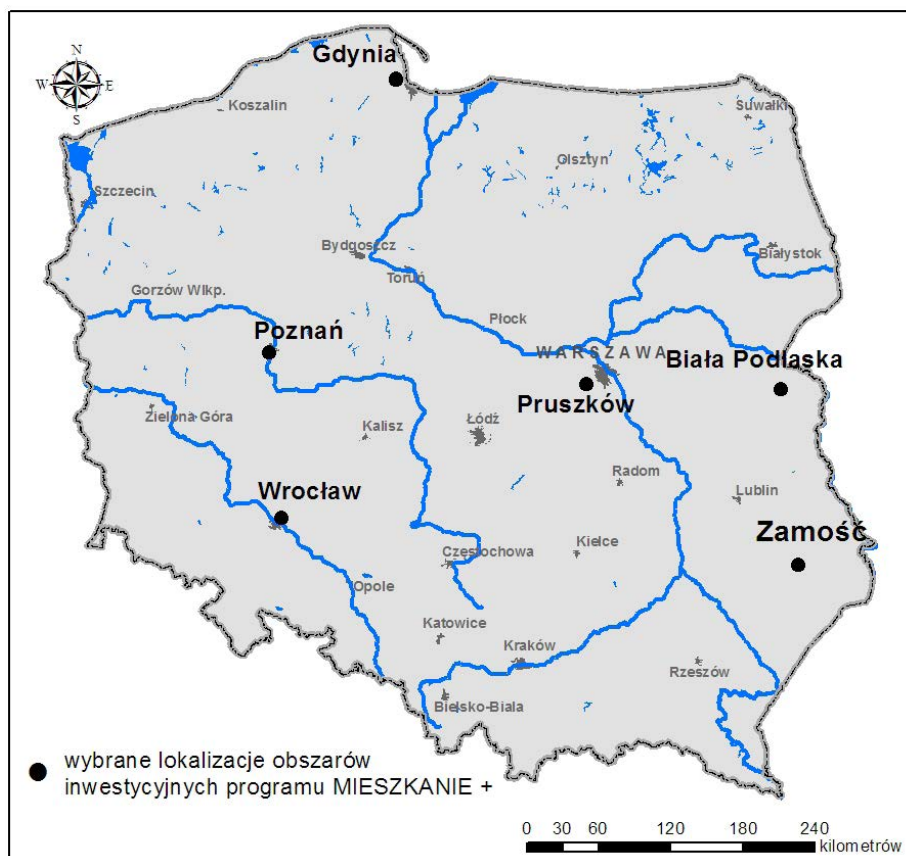
Energia produkowana przez GPC jest często zaliczana do OZE (Kapuściński i Rodzoch 2010), jednak może być traktowana jako OZE wyłącznie w przypadku skojarzenia z np. geotermalnymi instalacjami wysokotemperaturowymi, panelami fotowoltaicznymi lub turbinami wiatrowymi. Współdziałanie GPC z OZE generującymi energię cieplną lub elektryczną ma pozytywny wpływ na efektywność energetyczną oraz końcowy efekt ekologiczny całego systemu (Sarbu i Sebarchievici 2014). Dodatkowo sprawność technologiczną GPC można zwiększyć stosując je zarówno do ogrzewania zimą i chłodzenia latem, jak też sezonowego magazynowania energii w podłożu skalnym i wodach podziemnych.

Proces rozwoju technologii GPC wiąże się z potrzebą ujednoczenia i dostosowania polskiego prawodawstwa, rozwoju tzw. dobrych praktyk, czyli opracowania metodyki i wytycznych wykonywania, odbioru instalacji oraz serwisu i monitoringu powykonawczego w celu zmniejszenia ryzyka ekologicznego związanego z np. zwiększoną ilością wierceń i ewentualnymi wyciekami z nieszczelnych instalacji podziemnych (Lachman i in. 2013; Kozdrój i Kłonowski red. 2014; Kłonowski i Kozdrój 2016; Hofmann red. 2014; Ryżyński i Majer 2015).

Niniejszy artykuł prezentuje wyniki prac i badań zrealizowanych pomiędzy kwietniem a listopadem 2017 r. w ramach dwustronnego polsko-norweskiego projektu Geothermal4PL, którego celem było wsparcie zrównoważonego rozwoju i wykorzystania geotermii niskotemperaturowej w Polsce na terenach miejskich poprzez ocenę możliwości jej wykorzystania za pomocą technologii GPC w systemie zamkniętym. W projekcie przeanalizowano sześć wybranych obszarów inwestycyjnych, dla których wykonano serię map: dokumentacyjnych, geologicznych, hydrogeologicznych i wartości średnich parametrów geotermalnych w otworach wiertniczych, stanowiących narzędzie przydatne w lokalizacji i optymalizacji wydajności instalacji GPC. Opracowane mapy przeznaczone są m.in. dla jednostek samorządu terytorialnego, inwestorów prywatnych, miejscowej społeczności oraz wszystkich zainteresowanych użytkowników. Ponadto w wyniku realizacji projektu Geothermal4PL powstały raporty metodologiczne „Wytyczne dotyczące metodyki przeliczania otworowych baz danych na parametry geotermiczne” (Ryżyński i in. 2017a) i „Wskazówki dotyczące wykorzystania danych geologicznych do oceny potencjału geotermii niskotemperaturowej w obszarach zabudowy mieszkaniowej” (Ryżyński i in. 2017b).

1. LOKALIZACJA OBSZARU BADAŃ

W związku z typowo metodycznym i pilotażowym charakterem prac w projekcie Geothermal4PL oraz ramami czasowymi jego realizacji wybrano sześć przykładowych lokalizacji obszarów planowanych lub realizowanych (Biała Podlaska) inwestycji w ramach programu Mieszkanie Plus (rys. 1). Należą do nich: Biała Podlaska, Gdynia, Poznań, Pruszków, Wrocław i Zamość. Główne kryterium lokalizacji stanowiła dostępność danych ewidencyjnych (działki przeznaczone pod inwestycje mieszkaniowe) w początkowej fazie realizacji programu i projektu oraz występowanie terenów inwestycyjnych w miejscach o budowie geologicznej reprezentatywnej dla wybranych obszarów kraju. Wokół działek, ze względu na ich niedużą powierzchnię, zostały wyznaczone strefy buforowe o promieniu 2 km jako obszary, dla których przygotowano zbiory danych geologicznych wykorzystanych następnie do przeprowadzenia analiz potencjału i możliwości zastosowania niskotemperaturowej energii geotermalnej (Ryżyński i in. 2017a).



Rys. 1. Mapa lokalizacji wybranych inwestycji Programu Mieszkanie Plus

Fig. 1. Map showing selected locations of the Mieszkanie Plus Programme

2. BUDOWA GEOLOGICZNA I WARUNKI HYDROGEOLOGICZNE

Wybrane lokalizacje obszarów inwestycyjnych Programu Mieszkanie Plus analizowane w ramach projektu odzwierciedlają zróżnicowaną budowę geologiczną oraz warunki hydrogeologiczne panujące na głębokości do około 100 metrów p.p.t. (Ryżyński i in. 2017a) w wybranych obszarach kraju. W większości badanych obszarów na powierzchni terenu w sposób ciągły zalegają osady czwartorzędu cechujące się zmienną miąższością i zróżnicowaną litologią. Są to przewarstwione utwory słabo- i łatwoprzepuszczalne, takie jak: gliny zwałowe, mułki, gliny piaszczyste, piaski, żwiry i pospółki. Te ostatnie to w większości silnie zawadnione osady pochodzenia fluwialnego i glacialfluwialnego. Budują one ciągle poziomy wodonośne i soczewy w obrębie utworów słaboprzepuszczalnych. Największe całkowite miąższości utworów łatwoprzepuszczalnych – rzędu 20–50 metrów, odnotowano w rejonie Białej Podlaskiej, Gdyni i Pruszkowa. Zwierciadło wód podziemnych pierwszego poziomu wodonośnego występuje tam zazwyczaj płytko – na głębokości kilku metrów p.p.t.

Budowa geologiczna rejonu Zamościa jest nieco odmienna – na powierzchni terenu ciąglą warstwą występują gliny, które częściowo zalegają na piaskach czwartorzędu o miąższości maksymalnej do około 30 metrów, a częściowo na marglisto-wapiennych osadach kredy górnej nieprzewierconych w rejonie badań. Wody podziemne występują zarówno w piaskach czwartorzędowych jak i w osadach kredowych.

W rejonie Poznania i Wrocławia przeważają utwory słaboprzepuszczalne – w większości są to gliny zwałowe i mułki, czasami zapiaszczone, z lokalnymi wystąpieniami wodonośnych piasków i żwirów w postaci wtrąceń, soczew i nieciągłych przewarstwień o niewielkiej miąższości. Użytkowe poziomy wodonośne związane są z osadami neogenu – piaskami i żwirami, występującymi w obrębie osadów ilastych o znacznej miąższości.

3. ŹRÓDŁA DANYCH ORAZ ICH WERYFIKACJA, ANALIZA I PRZETWARZANIE

W celu poprawnej oceny potencjału niskotemperaturowej energii geotermalnej należy wykorzystywać wszystkie dostępne źródła informacji geologicznej. W tabeli 1 zestawiono pozycje, których uwzględnienie jest wymagane w projektach robót geologicznych, wykonywanych w celu pozyskiwania ciepła Ziemi. Są to mapy geologiczne publikowane przez Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy (PIG-PIB), w tym: Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski – **SMGP**, Mapa Hydrogeologiczna Polski – **MHP** i Mapa Geośrodowiskowa Polski – **MGŚP** oraz bazy danych geologicznych obejmujące Centralną Bazę Danych Geologicznych (**CBDG**), Centralną Bazę Danych Hydrogeologicznych (**CBDH**) oraz Bazę Danych Geologiczno-Inżynierskich (**BDGI**). Źródła danych wymienione w tabeli 1 – przede wszystkim ww. mapy i bazy danych, jak również opracowania archiwalne z rejonu projektowanych prac, stanowią podstawę do opracowania opisu budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych oraz sporządzenia przewidywanych profili geologicznych projektowanych otworów. Szczególną uwagę należy poświęcić CBDH,

Tabela 1

Źródła informacji i danych geologicznych i hydrogeologicznych dla geotermii niskotemperaturowej

Table 1

Sources of geological and hydrogeological information and data for shallow geothermal energy

| Źródło danych | Skala | Adres internetowy | Treść | Przydatność do projektowania dolnych źródeł ciepła dla GPC |
|----------------------------|-------|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| SMGP | 1:50k | www.pgi.gov.pl/dane-geologiczne/geologiczne-bazy-danych.html (do pobrania z przeglądark mapowych CBDG) | podstawowa mapa geologiczna kraju, główne źródło informacji geologicznej | załącznik do projektu robót geologicznych |
| MHP | 1:50k | www.pgi.gov.pl/dane-geologiczne/geologiczne-bazy-danych.html | kartograficzny obraz warunków występowania, hydrodynamiki, zasobności i jakości głównego użytkowego poziomu wodonośnego | załącznik do projektu robót geologicznych |
| MGŚP | 1:50k | www.pgi.gov.pl/dane-geologiczne/geologiczne-bazy-danych.html | stan i zasoby środowiska naturalnego, w tym obszary chronione | załącznik do projektu robót geologicznych |
| CBDH | różna | www.psh.gov.pl/bazy_danych_mapy_i_aplikacje/bazy_danych_mapy/bankhydro.html | otwory hydrogeologiczne (dostępne po złożeniu wniosku i uiszczeniu opłaty za udostępnienie informacji geologicznej) | opracowanie przewidywanego profilu geologicznego w projekcie robót geologicznych główne źródło informacji do projektowania OWC |
| CBDG | różna | baza.pgi.gov.pl | baza otworowa Polski, mapa geologiczna w skali 1:500k, badania geofizyczne | opracowanie przewidywanego profilu geologicznego w projekcie robót geologicznych |
| BDGI | 1:10k | atlasy.pgi.gov.pl | atlasy geologiczno-inżynierskie dla miast, w tym otwory i mapy tematyczne (pobieranie map i kart otworów z przeglądark mapowych CBDG) | opracowania przewidywanego profilu geologicznego w projekcie robót geologicznych baza użyteczna do systemów typu zamkniętego i otwartego |
| Przeglądarka mapowa e-PSH* | różna | epsh.pgi.gov.pl/epsh | dane hydrogeologiczne, m.in. główne zbiorniki wód podziemnych (GZWP), jednolite części wód podziemnych | źródło informacji o głównych zbiornikach wód podziemnych |

Tabela 1. cd.

Table 1. cont.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|----------------------------|------------------------------------|---|--|
| | | | (JCWPD), otwory z bazy CBDH, monitoring wód podziemnych | |
| MIDAS** | różna | geoportal.pgi.gov.pl/ midas-web | złoża, obszary i tereny górnicze | źródło informacji o złożach, obszarach i terenach górniczych |
| Serwis mapowy Miasta Stołecznego Warszawa | różna | www.mapa.um.warszawa.pl | kompozycja „Mapa OZE” zawiera m.in. mapę geotermii niskotemperaturowej dla obszaru miasta st. Warszawy oraz kalkulator energetyczny OZE | mapa sporządzona dla głębokości 80 [m p.p.t.] i 2400 [godz. pracy GPC/rok] |
| TansGeoTherm | siatka modelu 3D 25 x 25 m | transgeotherm.eu | mapy i model geologiczny 3D broszura informacyjna na temat stosowania płytkiej geotermii | mapy geotermalne jednostkowej wydajności cieplnej [W/m] oraz wartości przewodności cieplnej skał podłoża [W/m·K] |
| ThermoMap | 1:250k 1:5k 1:50k | thermomap-project.eu | Poglądowa mapa potencjału niskotemperaturowej energii geotermalnej do głębokości 10 [m p.p.t.] (obszar Europy) | Dane do głębokości 10 [m p.p.t.]. Projektowanie systemów otwartych i zamkniętych, informacja o obszarach z ograniczeniami w wykorzystaniu energii geotermalnej |

* PSH – Państwowa Służba Hydrogeologiczna.

** MIDAS – System Gospodarki i Ochrony Bogactw Mineralnych.

w której zgromadzono m.in. dane o profilach studni wierconych i ujęć wód podziemnych. Baza ta jest podstawowym źródłem informacji przy opracowywaniu projektów robót geologicznych w celu wykonania GPC. Należy zaznaczyć, że poprawnie opracowany profil geologiczny dla projektowanego OWC umożliwi dokładniejsze oszacowanie wydajności systemu.

W tabeli 1 zestawiono trzy podstawowe źródła danych otworowych niezbędnych do poprawnego projektowania instalacji geotermii niskotemperaturowej opartych o technologię GPC:

- **CBDG** – jest to największy w Polsce zbiór danych cyfrowych związanych z naukami o ziemi, zawierający m.in. dokumentacje i opracowania geologiczne, informacje nt. otworów wiertniczych oraz wyniki badań i pomiarów geofizycznych. W CBDG zgromadzone są przede wszystkim głębokie otwory badawcze i złożowe;
- **CBDH** – jest to baza gromadząca dane hydrogeologiczne dotyczące zarówno pojedynczych otworów hydrogeologicznych (studni, piezometrów, otworów badaw-

czych), jak też ujęć wód podziemnych. CBDG, często nazywana także Bankiem Hydro, zawierająca profile litologiczne otworów, wyniki analiz składu chemicznego wód podziemnych oraz dane dotyczące wydajności i hydrodynamiki ujętych poziomów wodonośnych. Ze względu na głębokość rozpoznania, otwory z CBDH mają przeważnie do 100–200 metrów głębokości, a dostępność danych dotyczących poziomów wodonośnych i utworów słaboprzepuszczalnych CBDH jest podstawowym źródłem informacji geologicznej i hydrogeologicznej do projektowania OWC i oceny potencjału geotermii niskotemperaturowej;

- **BDGI** – jest to największy w Polsce zbiór cyfrowych danych geologiczno-inżynierskich niezbędnych do projektowania inwestycji budowlanych. Baza zawiera informacje z dokumentacji geologiczno-inżynierskich i geotechnicznych uzyskanych z Narodowego Archiwum Geologicznego, archiwów prywatnych przedsiębiorstw oraz kartowania terenowego. BDGI to głównie otwory płytkie, średnio o głębokości do 10 m p.p.t.

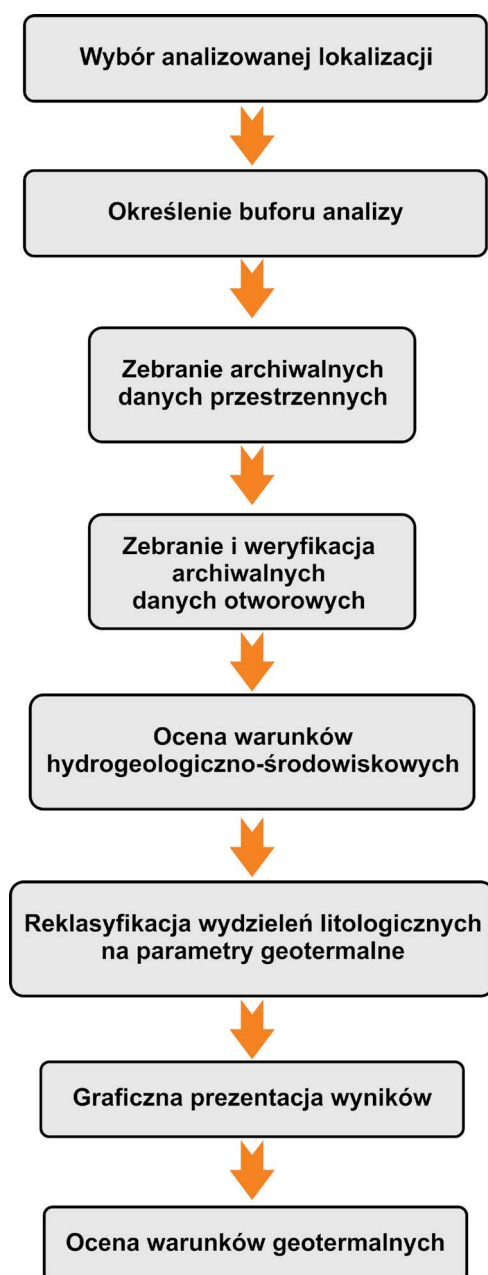
Jednym z najważniejszych elementów w złożonym procesie przetwarzania danych geologicznych i hydrogeologicznych (rys. 2) dla oceny potencjału geotermalnego danego obszaru jest zebranie oraz weryfikacja danych otworowych oraz ustalenie wzorców i schematów tabel oraz algorytmów wykorzystywanych w przeliczaniu parametrów geotermalnych dla danych przedziałów głębokościowych.

W związku z takim podejściem przestrzenne dane geologiczne, środowiskowe i topograficzne oraz dane tabelaryczne (tabele przeliczeniowe) powinny zostać odpowiednio przygotowane i umieszczone w strukturach bazodanowych w wybranym środowisku oprogramowania GIS typu Open Source lub komercyjnego, np.: PostgreSQL, QuantumGIS, ArcGIS – ESRI file geodatabase i inne. Podstawą wszelkich obliczeń są zintegrowane geologiczne dane otworowe zawierające kompletne informacje dotyczące położenia otworu wiertniczego, profilu litologicznego i głębokości zalegania zwierciadła wody w otworze wiertniczym oraz tabela średnich parametrów geotermalnych, w tym przewodności cieplnej λ i jednostkowej wydajności cieplnej q_v , obliczonych dla poszczególnych wydziałów litologicznych. Tak przygotowane dane mogą być przetworzone algorytmami przeliczeniowymi i stanowić podstawę utworzenia przekrojów geologicznych, profili syntetycznych, tabel wynikowych oraz wymaganych kompozycji mapowych. Termin „profil syntetyczny” dotyczy profilu litostratygraficznego opracowanego dla środka geometrycznego danej działki inwestycyjnej – punktu wygenerowanego z użyciem oprogramowania GIS.

4. WYNIKI BADAŃ I ICH INTERPRETACJA

Do najistotniejszych wyników analiz należy tabela 2 podająca średnie wartości parametrów geotermalnych (przewodności ciepła λ) na danej głębokości 40, 70, 100 i 130 m p.p.t. dla poszczególnych wierceń w obrębie sześciu obszarów badawczych – co stanowi podstawę do wygenerowania punktowych warstw przestrzennych i ich prezentacji w postaci kompozycji

mapowych (rys. 3). Na potrzeby niniejszego artykułu jako przykładowy został wybrany do prezentacji wyników analiz obszar inwestycyjny Biała Podlaska (Ryżyński i in. 2017a).



Rys. 2. Schemat procesu analizy, weryfikacji i przetwarzania danych

Fig. 2. Scheme of analysis, verification and processing of data

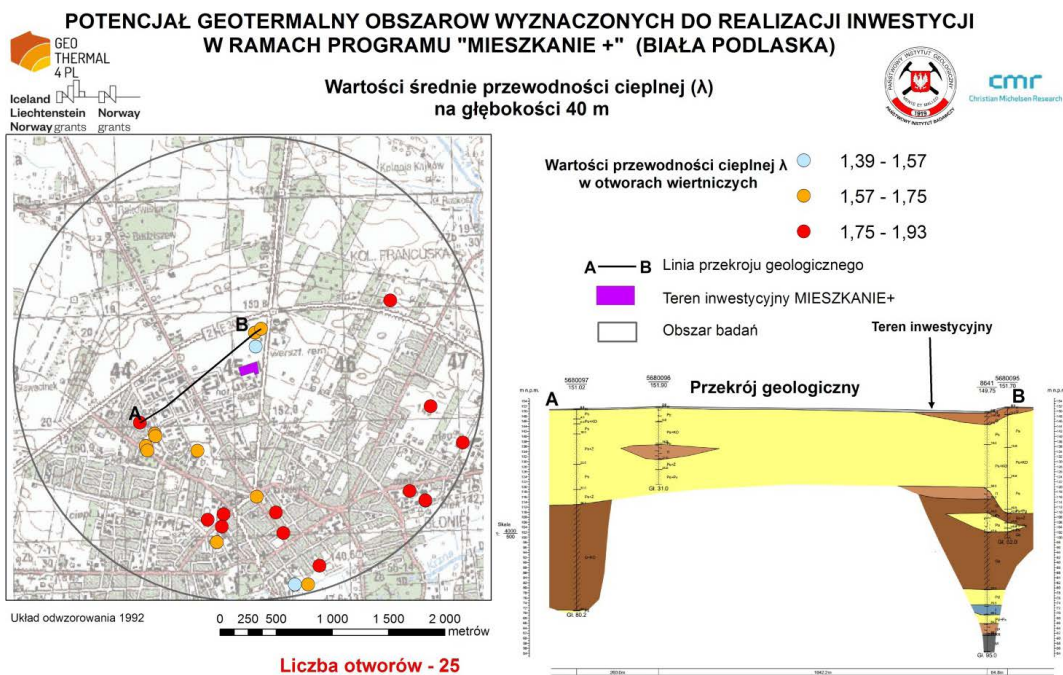
Tabela 2

Tabela wyników średniej wartości przewodności cieplnej λ na głębokości 40 m p.p.t.

Table 2

Table showing the results of the average thermal conductivity λ at the depth of 40 m below ground level

| id | numer_id | nazwa | x_92 | y_92 | rzedna | rok_wier | glub | baza | obszar | sr_wla | sr_qvk_t18 | sr_qvr_t18 | sr_qvo_t18 |
|----|--------------|----------------------------|------------------------|------------------------|------------------|-----------|------------------|-----------|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| ▲ | [PK] integer | character varying (101) | character varying (25) | character varying (25) | double precision | character | double precision | character | character | double precision | double precision | double precision | double precision |
| 1 | 8639 | BIALA PODLASKA | 783731.629 | 471475.954 | 141 | 1976 | 58.7 | CBDG | BP | 1.82975 | 43.35625 | 50.04375 | 56.73125 |
| 2 | 8641 | BIALA PODLASKA | 782214.494 | 472968.947 | 149.75 | 1973 | 95 | CBDG | BP | 1.618 | 48.5125 | 55.65 | 62.7875 |
| 3 | 58052 | BIALA PODLASKA | 782400.841 | 471369.25 | 142 | 1960 | 75 | CBDG | BP | 1.775 | 50.75 | 57.54375 | 64.3375 |
| 4 | 58084 | BIALA PODLASKA | 782229.67 | 471509.55 | 146.5 | 1944 | 70 | CBDG | BP | 1.6 | 35 | 42.5 | 50 |
| 5 | 58093 | BIALA PODLASKA 2 | 782688.61 | 470728.324 | 138.31 | 1956 | 52.6 | CBDG | BP | 1.71025 | 50.3 | 57.14375 | 63.9875 |
| 6 | 58117 | BIALA PODLASKA | 784065.086 | 471990.547 | 142.13 | 1968 | 64 | CBDG | BP | 1.7755 | 49.25 | 56.1125 | 62.975 |
| 7 | 3173573 | BIALA PODLASKA | 781875 | 471105 | 145.49 | 1940 | 42 | CBDG | BP | 1.695 | 44 | 50.25 | 56.5 |
| 8 | 3173574 | BIALA PODLASKA | 781701.285 | 471917.917 | 147.43 | 1980 | 68.25 | CBDG | BP | 1.70625 | 48.1875 | 55.03125 | 61.875 |
| 9 | 5680004 | UJĘCIE MIEJSKIE - ST. 2 | 782790.31045 | 470896.04809 | 138.3 | 07-1956 | 52.6 | COBH | BP | 1.922 | 60.0875 | 67.525 | 74.9625 |
| 10 | 5680007 | PRZEMYSŁ TERENOWY | 783592.77512 | 471561.07463 | 146 | 11-1960 | 70 | COBH | BP | 1.8815 | 47.0375 | 54.3375 | 61.6375 |
| 11 | 5680009 | UJĘCIE MIEJSKIE - ST. 3 | 782570.62036 | 470728.72499 | 140.6 | 1938 | 58 | COBH | BP | 1.46 | 34.25 | 39.5 | 44.75 |
| 12 | 5680025 | GOŚPODARKA KOMUNALN... | 782468.15994 | 471187.40316 | 146 | 11-1965 | 75 | COBH | BP | 1.7975 | 51.875 | 58.73125 | 65.5875 |
| 13 | 5680028 | ZASAD SZKOŁA ZAWODOWA | 783419.80586 | 473254.43433 | 142.13 | 10-1966 | 64 | COBH | BP | 1.79175 | 49.4375 | 56.7375 | 64.0375 |
| 14 | 5680034 | SPÓŁDZIELNIA OGRODNICZ... | 783778.91506 | 472314.93882 | 142.13 | 02-1968 | 64 | COBH | BP | 1.9355 | 61.7375 | 69.0375 | 76.3375 |
| 15 | 5680046 | SZPITAL MIEJSKI - ST. 1 | 782221.20486 | 472845.57426 | 149.75 | 02-1973 | 95 | COBH | BP | 1.393 | 37.2625 | 43.775 | 50.2875 |
| 16 | 5680057 | PIEKARNIA - ST. 1 | 783731.31723 | 471476.10075 | 142.3 | 1954 | 58.7 | COBH | BP | 1.80825 | 52.4375 | 59.5 | 66.5625 |
| 17 | 5680059 | SZPITAL WOJEWÓDZKI - ST. 1 | 781793.10919 | 471303.92816 | 145.5 | 1940 | 42 | COBH | BP | 1.7825 | 47.75 | 54.625 | 61.5 |
| 18 | 5680061 | OKRĘDEK SPORTU I REKREA... | 781935.50138 | 471352.5898 | 147.43 | 1951 | 68.25 | COBH | BP | 1.76975 | 50.675 | 57.65 | 64.625 |
| 19 | 5680089 | WODOCIĄG - ST. 1 | 781242.39904 | 471961.46074 | 151 | 06-1982 | 83 | COBH | BP | 1.697 | 47.5625 | 54.45 | 61.3375 |
| 20 | 5680091 | WODOCIĄG - ST. 2 | 781322.06414 | 472068.77286 | 152 | 08-1982 | 83 | COBH | BP | 1.7245 | 50.1875 | 57.0125 | 63.8375 |
| 21 | 5680095 | SZPITAL MIEJSKI 2 | 782269.52995 | 473003.15251 | 151.7 | 10-1983 | 52 | COBH | BP | 1.6255 | 47.325 | 54.2125 | 61.1 |
| 22 | 5680097 | WODOCIĄG - ST. 3 | 781190.40452 | 472167.81603 | 151.02 | 01-1995 | 80.2 | COBH | BP | 1.7625 | 52.5875 | 59.4625 | 66.3375 |
| 23 | 5680101 | SZPITAL - ST. 1A | 781919.12661 | 471243.90018 | 145.39 | 05-1989 | 470 | COBH | BP | 1.7975 | 53.1875 | 60.21875 | 67.25 |
| 24 | 5680104 | WODOCIĄG - ST. 4 | 781528.9966 | 472047.48918 | 152 | 09-1995 | 470 | COBH | BP | 1.73875 | 49.4375 | 56.28125 | 63.125 |
| 25 | 5680131 | WODOCIĄG - ST. 1A | 781256.34908 | 471920.75577 | 151.29 | 08-2003 | 83 | COBH | BP | 1.676 | 46.25 | 53.1 | 59.95 |



Rys. 3. Mapa wynikowa średniej wartości przewodności cieplnej λ na głębokości 40 m p.p.t. dla obszaru analizy o promieniu 2 km

Fig. 3. Map showing values of average thermal conductivity λ at the depth of 40 metres below ground level for the analyzed area with a radius of 2 km

Ocena warunków geotermalnych dla obszaru badawczego Białą Podlaską została przeprowadzona na podstawie analiz otworów wiertniczych z archiwalnych zasobów PIG-PIB. Dodatkowo dla działki, na której są zlokalizowane budynki mieszkalne, został przygotowany profil syntetyczny na podstawie analiz profili otworów sąsiadujących oraz danych z SMGP. Dane otworowe oraz wartości parametrów geotermalnych na głębokościach do 40, 70, 100 i 130 m p.p.t. zostały przedstawione w tabelach 3 i 4. Jako podstawę do reklasyfikacji wydzieleni litologicznych na parametry geotermiczne wykorzystano wytyczne metodologiczne opracowane przez Polską Organizację Rozwoju Technologii Pomp Ciepła (Lachman 2013).

Do podstawowych elementów analiz umożliwiających ocenę warunków geotermalnych wybranego obszaru badań należą:

- całkowita liczba i rozmieszczenie dostępnych archiwalnych otworów wiertniczych: 31 otworów o gęstości 2,3/[km²];
- liczba otworów posiadająca opis profilu litologicznego na zadanej głębokości;
- wartości średniej przewodności cieplnej i średniej jednostkowej wydajności cieplnej dla otworów archiwalnych na zadanych głębokościach;
- wartości przewodności cieplnej i jednostkowej wydajności cieplnej dla profili syntetycznych.

Tabela 3

Statystyczna ocena warunków geotermalnych dla wartości przewodności cieplnej λ

Table 3

Statistical analysis of geothermal conditions for values of thermal conductivity λ

| Obszar | Dane otworowe powierzchni objęta analizą: 13,6 km ² | | | | | | Średnia przewodność cieplna obliczona dla danych archiwalnych $\lambda_{\text{śr}}$ [W/m·K] $(\lambda_{\text{śr}} - 2\sigma) - (\lambda_{\text{śr}} + 2\sigma)$ $\lambda_{\text{śr}}$ | | | | Przewodność cieplna określona z profilu syntetycznego λ^1 [W/m·K] | | | |
|----------------|--|---------------------------|-----------|-----------|------------|------------|--|-----------|------------|------------|--|-----------|------------|------------|
| | Liczba otworów razem* | Otwory [km ²] | Do 40 [m] | Do 70 [m] | Do 100 [m] | Do 130 [m] | Do 40 [m] | Do 70 [m] | Do 100 [m] | Do 130 [m] | Do 40 [m] | Do 70 [m] | Do 100 [m] | Do 130 [m] |
| Biała Podlaska | 31 | 2,3 | 25 | 12 | 1 | 1 | 1,48–1,98 | 1,48–2,02 | 1,84 | 1,83 | 1,62 | 1,66 | 1,72 | 1,74 |
| | | | | | | | 1,73 | 1,75 | 1,84 | 1,83 | | | | |

* Liczba otworów razem nie jest sumą otworów w poszczególnych analizowanych przedziałach głębokościowych: do 40, 70, 100 i 130 m p.p.t.

Tabela 4

Statystyczna ocena warunków geotermalnych dla wartości jednostkowej wydajności cieplnej q_v

Table 4

Statistical analysis of geothermal conditions for values of specific heat extraction rate q_v

| Obszar | Dane otworowe powierzchni objęta analizą: 13,6 km ² | | | | | | Średnia jednostkowa wydajność cieplna obliczona dla danych archiwalnych $q_{v\text{śr}}$ [W/m] $(q_{v\text{śr}} - 2\sigma) - (q_{v\text{śr}} + 2\sigma)$ $q_{v\text{śr}}$ | | | | Jednostkowa wydajność cieplna obliczona dla profilu syntetycznego $q_{v\text{śr}}$ [W/m] | | | |
|----------------|--|---------------------------|-----------|-----------|------------|------------|--|-----------|------------|------------|---|-----------|------------|------------|
| | Liczba otworów razem* | Otwory [km ²] | Do 40 [m] | Do 70 [m] | Do 100 [m] | Do 130 [m] | Do 40 [m] | Do 70 [m] | Do 100 [m] | Do 130 [m] | Do 40 [m] | Do 70 [m] | Do 100 [m] | Do 130 [m] |
| Biała Podlaska | 31 | 2,3 | 25 | 12 | 1 | 1 | 42,1–68,4 | 43,4–69,8 | 57,4 | 55,1 | 55,8 | 55,9 | 54 | 52,3 |
| | | | | | | | 55,2 | 56,5 | 57,4 | 55,1 | | | | |

* Liczba otworów razem nie jest sumą otworów w poszczególnych analizowanych przedziałach głębokościowych: do 40, 70, 100 i 130 m p.p.t.

Biorąc pod uwagę wyniki badań i obliczeń przedstawione w tabelach 5, 6 i 7 najkorzystniejsze warunki geotermiczne podłoża skalnego zanotowano na obszarze Zamościa, co spowodowane jest występowaniem w profilu litologicznym zawodnionych utworów piaszczysto-żwirowych czwartorzędu oraz spękanych i zwietrzałych marglisto-wapiennych zawodnionych osadów kredy górnej o dużej miąższości. Należy zwrócić uwagę, że poniższe parametry przedstawiają: średnia przewodność cieplna λ_{sr} – wartości na wybranych głębokościach w archiwalnych otworach wiertniczych, natomiast przewodność cieplna dla syntetycznego profilu litologicznego λ_1 – wartości średnie wartości na wybranych głębokościach w otworach wirtualnych (syntetycznych) zaprojektowanych w obrębie działki danej inwestycji.

W ocenie statystycznej wyników przedstawiono informację o ilości otworów na analizowanych terenach oraz ich ilości w poszczególnych przedziałach głębokościowych reklasyfikacji geotermalnej – w tabeli 5 dla przewodności cieplnej λ , a w tabeli 6 dla jednostkowej wydajności cieplnej q_v . Analizie statystycznej poddano otwory archiwalne, przedstawiając nie tylko wartość średnią, ale również przedział ufności 95% (przy założeniu normalności rozkładu) czyli dwukrotnej wartości odchylenia standardowego od wartości średniej analizowanego parametru. Dane zestawione w tabeli oceny statystycznej (tab. 5) mogą być w przypadku różnych lokalizacji projektowanych inwestycji Mieszkanie Plus porównywane ze sobą oraz poddawane rankingowi.

Wyniki rankingu przedstawione w tabeli 7 oparte zostały na poniższych kryteriach (Ryżyński i in. 2017b):

- Przewodność cieplna λ_1 [W/m·K] określona z profilu syntetycznego, dla głębokości reklasyfikacji 70 m p.p.t.:
 - $\lambda_1 < 1,3$: 1 punkt rankingowy;
 - $\lambda_1 = 1,3-1,8$: 2 punkty rankingowe;
 - $\lambda_1 > 1,8$: 3 punkty rankingowe.
- Średnia przewodność cieplna λ_{sr} [W/m·K] z otworów archiwalnych, dla głębokości reklasyfikacji 70 m p.p.t.:
 - $\lambda_{sr} < 1,3$: 1 punkt rankingowy;
 - $\lambda_{sr} = 1,3-1,8$: 2 punkty rankingowe;
 - $\lambda_{sr} > 1,8$: 3 punkty rankingowe.
- Różnica między przewodnością cieplną wyznaczoną z profilu syntetycznego a wyznaczoną statystycznie z archiwalnych danych $\lambda_1 - \lambda_{sr}$ [W/m·K]:
 - $\lambda_1 - \lambda_{sr} < 0,08$: 3 punkty rankingowe;
 - $\lambda_1 - \lambda_{sr} = 0,08-0,20$: 2 punkty rankingowe;
 - $\lambda_1 - \lambda_{sr} > 0,20$: 1 punkt rankingowy.
- Ilość otworów archiwalnych/[km²] dla głębokości reklasyfikacji 70 m:
 - < 1: 1 punkt rankingowy;
 - 1–3: 2 punkty rankingowe;
 - > 3 – 3: punkty rankingowe.

Ocena potencjału niskotemperaturowej energii geotermalnej dla badanych lokalizacji Programu Mieszkanie Plus – analiza wartości przewodności cieplnej λ

Table 5

Assessment of geothermal conditions for the locations of the Mieszkanie Plus Programme – analysis of the values of thermal conductivity λ

| Obszar | Dane otworowe powierzchnia objęta analizą: 12,5 [km ²] | | | | Średnia przewodność cieplna obliczona dla danych archiwalnych λ_{sr} [W/m·K] $(\lambda_{sr} - 2\sigma) - (\lambda_{sr} - 2\sigma)$ | | | | Przewodność cieplna obliczona dla profilu syntetycznego λ_1 [W/m·K] | | | | | |
|-------------------|---|-------------------------------|----------------------|-------|--|-----------|----------------------|-----------|--|-----------|----------------------|-------|--------|--------|
| | Liczba otworów razem* | Otwory/ [km ²] | Głębokość [m p.p.t.] | | | do 40 | Głębokość [m p.p.t.] | | | do 40 | Głębokość [m p.p.t.] | | | |
| | | | do 40 | do 70 | do 100 | | do 70 | do 100 | do 130 | | do 40 | do 70 | do 100 | do 130 |
| Biała Podlaska | 31 | 2,48 | 25 | 12 | 1 | 1 | 1,48-1,98 | 1,48-2,02 | 1,84 | 1,83 | 1,62 | 1,66 | 1,72 | 1,74 |
| Gdynia | 38 | 3,04 | 32 | 13 | 7 | 0,41-1,64 | 0,97-1,74 | 1,37-1,62 | 1,51-1,69 | 1,26 | 1,46 | 1,62 | 1,62 | 1,68 |
| Poznań | 353 | 28,24 | 17 | 17 | 16 | 10 | 0,05-1,95 | 0,45-2,05 | 0,66-2,06 | 1,02-2,10 | 0,61 | 0,92 | 1,15 | 1,22 |
| Pruszków | 312 | 24,96 | 67 | 12 | 10 | 10 | 1,40-2,13 | 0,85-2,47 | 0,75-2,58 | 0,75-2,6 | 1,84 | 1,9 | 1,94 | 1,95 |
| Wrocław | 94 | 7,52 | 39 | 39 | 31 | 10 | 0,42-2,19 | 0,68-2,33 | 0,91-2,31 | 1,73-1,93 | 1,56 | 1,75 | 1,8 | 1,84 |
| Zamość | 53 | 4,24 | 45 | 22 | 3 | 0 | 1,26-2,40 | 1,67-2,32 | 2,08-2,29 | bd | 1,59 | 1,93 | 2,04 | 2,1 |

* Liczba otworów razem nie jest sumą otworów w poszczególnych analizowanych przedziałach głębokościowych: do 40, 70, 100 i 130 [m p.p.t.].

Tabela 6

Ocena potencjału niskotemperaturowej energii geotermalnej dla badanych lokalizacji Programu Mieszkanie Plus – analiza wartości jednostkowej wydajności cieplnej q_v

Table 6

Assessment of geothermal conditions for the locations of the Mieszkanie Plus Programme – analysis of the values of specific heat extraction rate q_v

| Obszar | Dane otworowe powierzchnia objęta analizą: 12,5 [km ²] | | | | Średnia jednostkowa wydajność cieplna dla danych archiwalnych $q_{v,śr}$ [W/m] ($q_{v,śr} - 2\sigma$) – ($q_{v,śr} + 2\sigma$) | | | | | Jednostkowa wydajność cieplna z profilu syntetycznego q_1 [W/m] | | | | | | | | |
|------------------|---|-------------------------------|----------------------|----|--|-----|----------------------|-------------|-----------|--|------|----------------------|------|------|------|------|------|------|
| | Liczba otworów razem | Otwory/ [km ²] | Głębokość [m p.p.t.] | | | | Głębokość [m p.p.t.] | | | | | Głębokość [m p.p.t.] | | | | | | |
| | | | 40 | 70 | 100 | 130 | 40 | 70 | 100 | 130 | 40 | 70 | 100 | 130 | | | | |
| Biła Podlaska | 31 | 2,48 | 25 | 12 | 1 | 1 | 40 | 42,1–68,4 | 70 | 43,4–69,8 | 100 | 57,4 | 130 | 55,1 | 55,8 | 55,9 | 54 | 52,3 |
| | | | | | | | 55,2 | 56,5 | 57,4 | 55,1 | | | | | | | | |
| Gdynia | 38 | 3,04 | 32 | 13 | 7 | 7 | 20–54,8 | 33,9–59,3 | 41,8–59,5 | 47,3–61,1 | 54,2 | 44,6 | 48,9 | 56,3 | | | | |
| | | | | | | | 37,4 | 46,6 | 50,6 | | | | | | | | | |
| Poznań | 353 | 28,24 | 17 | 17 | 16 | 10 | 25,5–44,9 | 28,3–45,1 | 31,5–45,3 | 38,3–48,9 | 43,6 | 38,4 | 34,6 | 35,9 | 31,8 | 34,6 | 35,9 | 38 |
| | | | | | | | 35,2 | 36,7 | 38,4 | | | | | | | | | |
| Pruszków | 312 | 24,96 | 67 | 12 | 10 | 10 | 41,3–76,9 | 24,6–66,0 | 24,6–60,7 | 25,8–58,5 | 42,1 | 45,3 | 42,6 | 59,2 | 52 | 49,2 | 47,6 | |
| | | | | | | | 59,1 | 45,3 | 42,6 | | | | | | | | | |
| Wrocław | 94 | 7,52 | 39 | 39 | 31 | 10 | 29,5–51,6 | 30,4,1–54,0 | 35,0–54,2 | 43,1–52,8 | 48 | 44,6 | 49,2 | 48 | 42,1 | 49,2 | 48 | 50,9 |
| | | | | | | | 40,5 | 42,2 | 44,6 | | | | | | | | | |
| Zamość | 53 | 4,24 | 45 | 22 | 3 | 0 | 31,9–60,1 | 39,8–55 | 44,7–56,7 | bd | 47,4 | 50,7 | 55,8 | 50,4 | 54 | 56 | | |
| | | | | | | | 46 | 47,4 | 50,7 | bd | | | | | | | | |

Tabela 7

Ocena potencjału niskotemperaturowej geotermii dla głębokości 70 m p.p.t.
na podstawie wartości przewodności cieplnej λ

Table 7

Assessment of shallow geothermal energy for the depth of 70 metres
below ground level based on the values of thermal conductivity λ

| Lokalizacja | Przewodność cieplna λ_1 [W/m·K] dla profilu syntetycznego | | Średnia przewodność cieplna λ_{sr} [W/m·K] obliczona dla danych archiwalnych | | $\lambda_1 - \lambda_{\text{sr}}$ [W/m·K] | | Otwory/[km ²] | | Punkty rankingowe razem |
|----------------|---|---------|---|---------|---|---------|---------------------------|---------|-------------------------|
| | | ranking | | ranking | | ranking | | ranking | |
| Zamość | 1,93 | 3 | 2,00 | 3 | 0,07 | 3 | 1,7 | 2 | 11 |
| Pruszków | 1,90 | 3 | 1,66 | 2 | 0,24 | 1 | 0,9 | 1 | 7 |
| Wrocław | 1,75 | 2 | 1,51 | 2 | 0,24 | 1 | 2,9 | 3 | 8 |
| Biała Podlaska | 1,66 | 2 | 1,75 | 2 | 0,09 | 2 | 0,9 | 1 | 7 |
| Gdynia | 1,46 | 2 | 1,35 | 2 | 0,11 | 2 | 0,9 | 1 | 7 |
| Poznań | 0,92 | 1 | 1,25 | 1 | 0,33 | 1 | 1,2 | 2 | 5 |

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W ramach badań zrealizowanych w dwustronnym polsko-norweskim projekcie Geothermal4PL zweryfikowano dane geologiczne i hydrogeologiczne, a następnie przeprowadzono ich analizę i przetwarzanie (reklasyfikację) w celu oceny możliwości wykorzystania niskotemperaturowej energii geotermalnej za pomocą GPC z OWC dla sześciu wybranych inwestycji Programu Mieszkanie Plus zlokalizowanych w różnych częściach Polski. Otrzymane wyniki potwierdzają, że GPC stanowią alternatywne i efektywne źródło energii cieplnej i z powodzeniem mogą być wykorzystane do ogrzewania i chłodzenia oraz produkcji ciepłej wody użytkowej, zarówno w budynkach mieszkalnych, jak i użyteczności publicznej w obrębie wszystkich badanych lokalizacji. Wydajność projektowanych systemów GPC w dużej mierze zależy od budowy geologicznej podłoża, w tym przede wszystkim litologii profilu OWC, oraz warunków hydrogeologicznych ze względu na fakt, że skały zawodnione cechują się wyższymi wartościami przewodnictwa cieplnego niż skały suche. Z tego powodu rozpoznanie geologiczne terenu, w tym zebranie wiarygodnych i zweryfikowanych danych otworowych dotyczących profili litologicznych otworów, występowania poziomów

wodonośnych i głębokości zalegania zwierciadła wód podziemnych, jest sprawą zasadniczą. Kolejnym istotnym elementem w procesie oceny możliwości zastosowania GPC i projektowania instalacji jest utworzenie słownika litologicznego wraz z przypisaniem poszczególnym rodzajom skał średnich wartości wybranych parametrów geotermalnych w celu reklasyfikacji i pozyskania ostatecznych wyników obliczeń. Wykonane obliczenia i reklasyfikacja umożliwiły przeprowadzenie rankingu wybranych lokalizacji pod względem przydatności dla budowy instalacji GPC i ich potencjalnej wydajności. Wyniki rankingu przedstawione w tabeli 7 przeprowadzone były głównie na podstawie analizy przewodności cieplnej skał λ – zarówno dla profili archiwalnych, jak i syntetycznych. Zdaniem autorów ostateczne wyniki obliczeń parametrów geotermalnych przeprowadzonych na podstawie uśrednionych danych literaturowych przedstawione w niniejszym artykule odpowiadają wariantowi pesymistycznemu, a ich wartości są zaniżone. W celu precyzyjnego określenia średnich parametrów termicznych niezbędne jest wykonanie dodatkowych badań laboratoryjnych dla próbek skał pobranych bezpośrednio z otworów wiertniczych zlokalizowanych w obrębie planowanych inwestycji.

Podziękowania

Autorzy dziękują za dofinansowanie bilateralnego polsko-norweskiego projektu „Geothermal4PL – Wsparcie zrównoważonego rozwoju i wykorzystania płytkiej energii geotermalnej na terenie obszarów objętych programem Mieszkanie Plus w Polsce”, nr umowy 102/2017/Wn50/OA-XN-04/D, ze środków Mechanizmu Finansowego EOG 2009–2014 w ramach Funduszu Współpracy Dwustronnej, Program PL04 „Oszczędzanie energii i promowanie odnawialnych źródeł energii”. Osobne podziękowania za wkład w realizację projektu składają dr Kirsti Midtømme z Christian Michelsen Research AS – norweskiego partnera projektu, i prof. Randi Kalskin Ramstad, ekspertowi z Norwegian University of Science and Technology.

LITERATURA

- Berent-Kowalska i in. 2017 – Berent-Kowalska, G., Kacprowska, J., Moskal, I., Piwko, D. i Jurgaś, A. 2017. *Energia ze źródeł odnawialnych w 2016 r.* Warszawa: Główny Urząd Statystyczny.
- Casasso i in. 2017 – Casasso, A., Pestotnik, S., Rajver, D., Jez, J., Prestor, J. i Sethi, R. 2017. Assessment and mapping of the closed-loop shallow geothermal potential in Cerno (Slovenia). *Energy Procedia*, [W:] *“European Geosciences Union General Assembly 2017, EGU Division Energy, Resources and Environment, ERE”*.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE.
- EGEC 2017 – Geothermal market report, EGEC, Brussels.
- Hofmann, K. red. 2014. *Erdwärmesonden. Informationsbroschüre zur Nutzung oberflächennaher Geothermie.* Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Abteilung Geologie, Projektgruppe Geothermie. Dresden.

- Juda-Rezler, K. i Toczko, B. red. 2016. *Pyły drobne w atmosferze. Kompendium wiedzy o zanieczyszczeniu powietrza pyłem zawieszonym w Polsce*. Warszawa: Biblioteka Monitoringu Środowiska.
- Kapuściński, J. i Rodzoch, A. 2010. *Geotermia niskotemperaturowa w Polsce i na świecie. Stan aktualny i perspektywy rozwoju. Uwarunkowania techniczne, środowiskowe i ekonomiczne*. Warszawa: Ministerstwo Środowiska.
- Kępińska, B. 2015. Geothermal Energy Country Update Report from Poland, 2010–2014. [W:] *Proceedings of World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia, 19–25 April 2015*.
- Komunikat Komisji EUROPA 2020, Strategia na rzecz inteligentnego i zrównoważonego rozwoju sprzyjającego włączeniu społecznemu, Bruksela, 3.3.2010 COM(2010) 2020, wersja ostateczna.
- Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Ramy polityczne na okres 2020–2030 dotyczące klimatu i energii, Bruksela, 22.1.2014 Com(2014), 15 wersja ostateczna.
- Kłonowski, M.R. i Kozdrój, W. 2016. Planowanie lokalizacji i optymalizacja wydajności instalacji gruntowych pomp ciepła w obiegu zamkniętym za pomocą map geotermicznych. Wyniki projektu TransGeoTherm. *Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój* vol. 55, 2, s. 93–103.
- Kozdrój, W. i Kłonowski, M.R. red. 2014. *TransGeoTherm – Energia geotermalna dla transgranicznego rozwoju regionu Nysy. Projekt pilotażowy. Broszura informacyjna na temat stosowania płytkiej geotermii*. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie i Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Dresden.
- Lachmann i in. 2013 – Lachmann, P., Mirowski, A., Oczko, A., Karczmarzyk, A., Sawicki, C., Koczowski, J., Smuczyńska, M., Franke, M. i Zbrojkiewicz, S. 2013. *Wtyczne projektowania wykonania i odbioru instalacji z pompami ciepła*. Kraków: Polska Organizacja Rozwoju Technologii Pomp Ciepła PORT PC.
- Ministerstwo Energii, 2018 [Online] <https://www.gov.pl/energia/minister-tchorzewski-na-uroczystosci-podpisania-porozumienia-dotyczacego-realizacji-programu-czyste-powietrze> [Dostęp: 1.07.2018].
- Molina, M.J. i Molina, L.T. 2004. Megacities and Atmospheric Pollution. *Journal of the Air & Waste Management Association* 54, 6, s. 644–680.
- Nejat i in. 2015 – Nejat, P., Jomehzadeh, F., Taher, M.M., Gohari, M. i Abd Majid, M.Z. 2015. A global review of energy consumption, CO₂ emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO₂ emitting countries). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43, s. 843–862.
- Porozumienie Paryskie, 2016 – Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, L 282/4.
- Ryżyński, G. i Majer, E. 2015. Geotermia niskotemperaturowa – informacja geologiczna i procedury prawne. *Prz. Geol.* R. 63, nr 12/1, s. 1388–1396.
- Ryżyński i in. 2017a – Ryżyński, G., Kocyła, J., Żeruń, M., Dziekan-Kamińska, E., Nałęcz, T., Midtømme, K., Sivertsen, O. i Kalskin Ramstad, R. 2017a. Geothermal4PL, Report no. 5, Wskazówki dotyczące wykorzystania danych geologicznych do oceny potencjału geotermii niskotemperaturowej w obszarach zabudowy mieszkaniowej (*Guidelines on use of geological data for assessment of shallow geothermal potential in residential areas*). Praca niepublikowana, 27 stron z załącznikami.

- Ryżyński i in. 2017b – Ryżyński, G., Kocyła, J., Żeruń, M., Dziekan-Kamińska, E., Midttømme, K., Stavland, S. i Kalskin Ramstad, R., 2017b. Geothermal4PL, Report no. 5, Wytyczne dotyczące metodyki przeliczania otworowych baz danych na parametry geotermiczne (*Guidelines on use of geological data for assessment of shallow geothermal potential in residential areas*). Praca niepublikowana, 32 strony z załącznikami.
- Safa i in. 2015 – Safa, A.A., Fung, A.F. i Kumar, R. 2015. Comparative thermal performances of a ground source heat pump and a variable capacity air source heat pump systems for sustainable houses. *Applied Thermal Engineering* 81, s. 279–287.
- Sarbu, I. i Sebarchievici, C. 2014. General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. *Energy and Buildings* 70, s. 441–454.

ASSESSMENT OF LOW-TEMPERATURE GEOTHERMAL ENERGY POTENTIAL BASED ON ANALYSIS, INTERPRETATION AND RECLASSIFICATION OF GEOLOGICAL DATA IN URBAN AREAS

ABSTRACT

The ground source heat pumps (GSHP) using low temperature geothermal energy are the modern and valuable source of heating and cooling of buildings. Recently, the application of GSHP in Europe, especially the closed loop systems with borehole heat exchangers (BHE) has constantly been growing. The GSHPs provide for the reduction of low emissions, and their application refers to both urban and rural areas. Effectiveness of GSHPs is mainly determined by the geothermal conditions of underground which in turn depend on local geology and hydrogeology, thus their identification is crucial for an appropriate design and exploitation of GSHPs installations.

This paper presents the methodology of processing, analysis and interpretation of underground data for urban areas of the selected investment as developed within the framework of the Geothermal4PL project. Data originating from the thematic databases, atlases and serial maps were gathered in a unified database showing a uniform structure enabling their spatial analysis with use of GIS. According to an algorithm accepted for the sake of the project the reclassification of lithological parameters into the geothermal parameters was performed as well as the values of geothermal conductivity λ [W/m·K] and geothermal power unit q_v [W/m] of analyzed rocks and soils were calculated. Based on the results of calculations four maps of average geothermal conductivity coefficient λ for every investment area were prepared, each for the depth interval up to 40, 70, 100 and 130 metres. The results of the presented research made possible characteristics and an evaluation of the usefulness of selected locations for applications of shallow geothermal energy and GSHPs as well as assessment of shallow geothermal energy potential.

KEYWORDS

Shallow geothermal energy, geological data bases, processing and reclassification of data, mapping of shallow geothermal energy potential

Acknowledgements

The authors acknowledge financing of the bilateral Polish – Norwegian project Geothermal4PL – Support for the sustainable development and use of shallow geothermal energy in the areas covered by the Mieszkanie Plus Programme in Poland, agreement number 102/2017/Wn50/OA-XN-04/D, by the EEA Financial Mechanism 2009–2014 within the framework of the Bilateral Cooperation Fund (BCF), Programme PL04 “Energy saving and promotion of renewable sources of energy”. The authors are distinctly thankful for the contribution to the project to dr. Kirsti Midttømme of Christian Michelsen Research AS – the Norwegian partner of the project, and prof. Randi Kalskin Ramstad – the expert from the Norwegian University of Science and Technology.