

INSTYTUT GOSPODARKI SUROWCAMI MINERALNYMI I ENERGIĄ
POLSKIEJ AKADEMII NAUK — KRAKÓW

STUDIA, ROZPRAWY, MONOGRAFIE **193**

Wiesław Bujakowski

GEOLOGICZNE, ŚRODOWISKOWE I TECHNICZNE
UWARUNKOWANIA PROJEKTOWANIA I FUNKCJONOWANIA
ZAKŁADÓW GEOTERMALNYCH W POLSCE

WYDAWNICTWO INSTYTUTU GOSPODARKI SUROWCAMI MINERALNYMI
I ENERGIĄ PAN • KRAKÓW • 2015

KOMITET REDAKCYJNY

prof. dr hab. inż. Eugeniusz Mokrzycki (redaktor naczelny serii)
dr hab. inż. Lidia Gawlik (sekretarz redakcji), prof. IGSMiE PAN
dr hab. inż. Zenon Pilecki, prof. IGSMiE PAN
dr hab. inż. Wojciech Suwała, prof. IGSMiE PAN
dr hab. inż. Alicja Uliasz-Bocheńczyk, prof. AGH

RECENZENCI

prof. dr hab. inż. Eugeniusz Mokrzycki
prof. dr hab. inż. Stanisław Nagy

ADRES REDAKCJI

31-261 Kraków, ul. Józefa Wybickiego 7
tel. 12-632-33-00, fax 12-632-35-24

Redaktor Wydawnictwa: mgr Emilia Rydzewska
Redaktor techniczny: Barbara Sudoł

© *Copyright by Wiesław Bujakowski*
© *Copyright by Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN – Wydawnictwo*

Printed in Poland
Kraków 2015
ISSN 1895-6823
ISBN 978-83-62922-50-5

Spis treści

Wprowadzenie	5
1. Ogólna charakterystyka wykorzystania energii geotermalnej	9
2. Etap rozpoznawczy	25
3. Rozpoznanie w skali makroregionalnej	27
4. Rozpoznanie w skali krajowej	30
5. Rozpoznanie w skali regionalnej	43
6. Rozpoznanie w skali lokalnej	73
7. Etap projektowania i wykonania ujęcia wód	90
8. Etap projektowania i wykonania części powierzchniowej zakładu geotermalnego	114
9. Etap funkcjonowania systemu geotermalnego	128
Podsumowanie	144
Literatura	153
Dodatek. Wybrane niepublikowane prace wykonane pod kierunkiem autora	163
Geologiczne, środowiskowe i techniczne uwarunkowania projektowania i funkcjonowania zakładów geotermalnych – Streszczenie	168
Geological, Environmental and Technical Factors Affecting the Design and Operation of Geothermal Plants – Abstract	171

Wprowadzenie

Monografia niniejsza stanowi przegląd i podsumowanie prac badawczych autora, które zostały przedstawione w odniesieniu do podstawowych etapów tworzenia projektów geotermalnych.

Głównym wynikiem naukowym związanym z realizacją przedstawionych badań jest szczegółowe rozpoznanie warunków hydrogeotermalnych wybranych stref na terenie Polski. Uzyskane wyniki badań były i są podstawą racjonalnego planowania i projektowania przyszłych systemów geotermalnych. Wybrane przykłady zrealizowanych badań z tego zakresu przedstawiono w rozdziale siódmym i ósmym monografii.

Szczegółowa analiza lokalnych warunków hydrogeotermalnych i geotermicznych w aspekcie możliwości ich zagospodarowania dotyczyła:

- na terenie Niżu Polskiego m.in. stref rejonu: Łowicza (Bujakowski red. i in. 2009; Bujakowski i in. 2010; Pussak i in. 2014; Bauer i in. 2014; Praca zbiorowa pod kierunkiem W. Bujakowskiego 2009f), Inowrocławia (Bujakowski i Tarkowski 2003; Bujakowski red. i in. 2003), Mszczonowa (Bujakowski red. 2000; Bujakowski i in. 2013a, b; Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2002), Skierniewic (Kępińska i Bujakowski red. 2011; Bujakowski i in. 2011; Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2005c), Piotrkowa Trybunalskiego (Bujakowski red. 2014; Barbacki i in. 2014), Gostynina (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2004c), Sulejówka (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2003a), Warszawy (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2009h, i), Kielc (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2009b), Zamościa (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2003b), Bełchatowa (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2008a),
- Karpat m.in. stref rejonu: podhalańskiego (Sokołowski, Długosz i Bujakowski 1994); Bujakowski 2006b; Bujakowski i in. 2001; Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 1998, 2005d, 2007b, 2011a, 2014), śląskiego (Bujakowski i in. 2008), Poręby Wielkiej (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2005g, 2010c, 2013a), Międzybrodzia Żywieckiego (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2009a), Jeleśni (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2008c), Szczyrku (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2001b), Krynicy (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2011b, 2013b), Jasła (Bujakowski i in. 2014),
- Zapadliska przedkarpackiego m.in. stref rejonu: Krakowa (Bujakowski i Barbacki 2004; Barbacki i Bujakowski 2005; Bujakowski, Barbacki i Pająk 2003; Bujako-

wski 2015; Barbacki, Bujakowski i Pająk 2006; Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego 2005a, i), Słownik (Bujakowski 2000b; Bujakowski i Barbacki 2000; Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2001a), Tarnowa (Bujakowski red. i in. 2007), Bochni i Brzeska (Bujakowski i Barbacki 2007), Gdowa (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2005b), Niepołomic (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2008b), Wierchosławic (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2009e, g),
— Sudetów m.in. stref rejonu: Nysy (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2004a, 2010b, 2011c), Ciepłowód (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 1996a), Głucholąz (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2007c, e).

Zgodnie z Ustawą o odnawialnych źródłach energii z dnia 20 lutego 2015 r. (Dz.U. 2015 poz. 478) odnawialne źródła energii (OZE) to „odnawialne, niekopalne źródła energii obejmujące energię wiatru, energię promieniowania słonecznego, energię aerotermalną, energię geotermalną, energię hydrotermalną, hydroenergię, energię fal, prądów i pływów morskich, energię otrzymywaną z biomasy, biogazu, biogazu rolniczego oraz z biopłynów”.

W tym dokumencie energia geotermalna została zdefiniowana jako „energia o charakterze nieantropogenicznym skumulowana w postaci ciepła pod powierzchnią ziemi”. Zatem w tym ujęciu niezależnie od głębokości poniżej powierzchni terenu, mamy do czynienia z energią geotermalną, związaną bądź z ciepłem skumulowanym w wyniku procesów geodezyjnych, radiogenicznych czy też z aktywnością słońca.

W Polsce założenia do rozwoju energetyki odnawialnej zostały określone w wielu dokumentach, m.in. „Strategia rozwoju energetyki odnawialnej” z 2001 roku, „Program dla elektroenergetyki” z 2006 roku, „Polityka energetyczna Polski do roku 2030” z 2009 roku, „Krajowy plan działań w zakresie energii ze źródeł odnawialnych” z 2010 roku, oraz „Ustawa o Odnawialnych Źródłach Energii” przyjęta przez sejm 20.02.2015 roku.

Zgodnie z tymi dokumentami, celem strategicznym polityki państwa jest zwiększanie wykorzystania zasobów energii odnawialnej, tak aby udział tej energii w finalnym zużyciu energii brutto osiągnął w 2020 roku 15%, jak przyjęto w tzw. pakiecie klimatycznym. Udział OZE w bilansie energii pierwotnej ogółem w Polsce szacowany jest na około 11,9% (GUS 2014). Obserwowany coroczny wzrost tego udziału na poziomie 0,5%, daje nadzieję na spełnienie wymogów pakietu klimatycznego.

Spośród różnych rodzajów Odnawialnych Źródeł Energii możliwych do zagospodarowania w polskich warunkach naturalnych oraz infrastrukturalnych, najistotniejszy udział ma biomasa w formie biopaliw stałych i ciekłych (ponad 88%), natomiast energia geotermalna (0,22%) i pompy ciepła (0,33%) nie są zaliczane do najważniejszych źródeł energii odnawialnej w Polsce (GUS 2014). Wykorzystanie tej energii jakkolwiek nie rozwiąże problemów energetycznych w skali kraju, to może mieć duże znaczenie w skali lokalnej i dla lokalnego rynku pracy. Przykładem istotnej roli geotermii w tej skali jest Podhale, gdzie udział energii geotermalnej w bilansie wytwarzanego ciepła komunalnego w tym regionie oceniany jest na 25–30% a adekwatny wpływ na środowisko przyrodnicze, zwłaszcza poprzez ograniczenie niskiej emisji, ma ogromne znaczenie środowiskowe. Ponadto uruchomienie w obszarze Podhala pięciu kąpielisk geotermalnych, spowodowało utworzenie nowych

miejsc pracy bezpośrednio w tych obiektach, oraz w miejscowych domach wczasowych. Także w innych miejscowościach, np. w Uniejowie czy Mszczonowie działające instalacje geotermalne, oprócz walorów energetycznych i ekologicznych, wniosły bardzo duży wkład w aktywizację lokalnych społeczności, zwłaszcza poprzez utworzenie wielu nowych miejsc pracy przy kąpieliskach geotermalnych.

W tym aspekcie i takiej skali energetyka geotermalna ma realne szanse rozwoju w wielu innych regionach kraju, warunkiem niezbędnym jest jednakże dostępność do wiarygodnych informacji o warunkach hydrogeotermalnych i związanych z nimi możliwościami zagospodarowania występujących złóż.

W rozwoju projektu bezpośredniego wykorzystania energii geotermalnej w konkretnej lokalizacji można wydzielić następujące kroki działań przygotowawczych, formalno-prawnych i technicznych:

- zebranie informacji wstępnych o warunkach hydrogeotermalnych,
- uzyskanie decyzji formalnych w zakresie: statusu terenu, dostępności informacji geologicznej,
- wstępna ekspertyza geologiczna, technologiczna, ekonomiczna i ekologiczna planowanego przedsięwzięcia,
- projekt robót geologicznych uprawniający do uzyskania warunków dla wykonania odwiertu,
- wybór wykonawcy prac i wykonanie odwiertu wraz z testami złożowymi,
- analiza wyników wiercenia w aspekcie wykorzystania wód złożowych,
- wykonanie dokumentacji hydrogeologicznej wraz z zatwierdzeniem zasobów wód,
- uzyskanie koncesji na eksploatację wód,
- opracowanie końcowego projektu całego przedsięwzięcia,
- uzyskanie pozwolenia budowlanego i budowa powierzchniowej części instalacji geotermalnej,
- utworzenie zakładu górniczego,
- uruchomienie eksploatacji, monitorowanie i zarządzanie pracą systemu geotermalnego.

Aby prace badawcze były przydatne gospodarczo, powinny praktycznie we wszystkich wymienionych krokach mieć swoje miejsce wynikające ze zrozumienia ich ekonomicznego znaczenia. Już na etapie określenia wstępnych warunków i zakresu przedsięwzięcia geotermalnego winno się uwzględniać spodziewane parametry złożowe. Niezbędne to jest nawet dla czysto teoretycznych rozważań koncepcyjnych ujmowanych we wstępnej ekspertyzie. Kolejne kroki rozwoju inwestycji od Projektu Robót Geologicznych, poprzez analizę wyników testów złożowych itd., aż po uruchomienie i monitorowanie pracy systemu geotermalnego, winny być wsparte wiedzą badawczą wskazującą najlepszy i najnowocześniejszy sposób rozwiązania.

W sferze zagadnień związanych z wykorzystaniem energii geotermalnej można wyróżnić następujące etapy badawcze:

- I. Etap rozpoznawczy obejmujący ogólne informacje, badania i analizy warunków geotermalnych o różnej szczegółowości rozpoznania:

1. Rozpoznanie w skali makroregionalnej.
 2. Rozpoznanie w skali krajowej.
 3. Rozpoznanie w skali regionalnej.
 4. Rozpoznanie w skali lokalnej.
- II. Etap projektowania oraz wykonania ujęcia wód geotermalnych oraz przeprowadzenia testów złożowych zawierający analizy i oceny technologii udostępniania złoża wód geotermalnych.
- III. Etap projektowania i wykonania części powierzchniowej instalacji geotermalnej obejmujący synchronizację parametrów geotermalnego źródła energii i potencjalnego odbiorcy.
- IV. Etap funkcjonowania systemu geotermalnego.

Przedstawione etapy stanowią główne rozdziały pracy, przy czym w obrębie etapu I wydzielono cztery części odpowiadające skali rozpoznania warunków geologiczno-geotermalnych, od rozpoznania w skali makro do rozpoznania w skali lokalnej, dotyczącego konkretnego obiektu objętego inwestycją (np. odwiert lub instalacja wężła grzewczego). W kolejnych rozdziałach opisano badania związane z pracami projektowymi, wykonaniem prac geologicznych przy odwiercie oraz przeprowadzenia testów hydrodynamicznych, wnoszących informacje niezbędne do prawidłowego zaprojektowania powierzchniowych instalacji geotermalnych. W ostatnim rozdziale przedstawiono badania dotyczące eksploatacji systemu geotermalnego gwarantujące wieloletnią, efektywną pracę instalacji przekładającą się na sukces finansowy przedsięwzięcia. W podsumowaniu przedstawiono aktualny stan rozpoznania warunków hydrogeotermalnych oraz stan zagospodarowania potencjału geotermalnego w naszym kraju, uzupełniając je o informacje dotyczące walorów wód i energii geotermalnej i wyróżniające je wśród innych OZE.

W niniejszej pracy posłużono się terminem „wody geotermalne”, który uznano za równoważny z terminem „wody termalne” określonym Ustawą Prawo Geologiczne i Górnicze (Dz.U. Nr 27 z 1994 r.). Termin „wody geotermalne” jest powszechnie stosowany zagranicą (*geothermal waters*) i jednocześnie wskazuje naturę pochodzenia tych wód i ich walor energetyczny.

1. Ogólna charakterystyka wykorzystania energii geotermalnej

Pierwsze wykorzystania energii geotermalnej datowane są na około 10 000 lat temu, kiedy to ówczesni ludzie gromadzili się wokół miejsc naturalnych wypływów gorących wód. Miejsca takie, uznawane za szczególne, dawały zdrowie, odpoczynek i co niezwykle istotne – bezpieczeństwo. Informacje o nich znajdujemy głównie w legendach i przekazach ustnych. Zapisy historyczne pochodzą ze starożytnego Rzymu, Japonii, Turcji, Chin i innych miejsc, a mówią o wykorzystaniu gorących wód głównie w łaźniach, pralniach, rekreacji i w lecznictwie, a także o odzyskiwaniu z nich cennych minerałów.

Wydana w 1999 roku książka „Stories from a Heated Earth” (Cataldi i in. 1999) w sposób bardzo atrakcyjny przedstawia historię wykorzystania energii geotermalnej na przestrzeni dziejów człowieka zawierając dokumenty, podania i przykłady historycznych zastosowań energii geotermalnej na świecie. W 2005 roku ukazała się pozycja książkowa „Il Calore della terra” (Ciardi i Cataldi 2005), w której autorzy przypuszczają że pierwsze kontakty pierwotnego człowieka miały miejsce w rejonie wulkanicznego obszaru wschodniej Afryki w niedającym się precyzyjnie określić momencie dolnego paleolitu, gdzieś pomiędzy 1 000 000 a 500 000 lat temu. Pracami archeologicznymi odkopano ośrodki japońskiej kultury znajdujące się w pobliżu gorących źródeł. Do najważniejszych takich miejsc należą gorące źródła w Yuda (Prefektura Iwate) – sprzed okresu porcelany (11 000 p.n.e.); gorące źródła Oyou (Prefektura Nagano) oraz gorące źródła w Kawazu (Prefektura Nagasaki) z czasu poprzedzającego okres Jomon (11 000–300 p.n.e.) (Sekioka 1995). Japonia posiada zatem bogatą historię korzystania z gorących źródeł dokumentującą ponad 10 000-letni okres a i w obecnym okresie, obserwując przydomowe geotermalne piece – grille czy gotowanie jaj w naturalnych gorących oczkach wodnych, można jeszcze odnaleźć mentalne ślady ówczesnej współegzystencji człowieka i sił natury (Bujakowski i Kępińska 2000).

Innym obszarem z którego pochodzą zapisy sprzed ponad tysiąca lat świadczące o zastosowaniu energii geotermalnej są Chiny oraz obszar Cesarstwa Rzymskiego, gdzie już około dwóch tysięcy lat temu dużą popularnością cieszyły się łaźnie publiczne znajdujące się w miejscach, gdzie wypływały gorące źródła (Ciardi i Cataldi 2005). Zwyczaj ten dokumentowany jest na obszarze od Anglii na północy do Tunezji i Syrii na południu. W starych instalacjach kąpielowych w Chinach i Europie stosowano rury do dostarczania ciepłej i zimnej wody, jednak systemy rurowego przesyłu wód geotermalnych upowszechniły się dopiero na początku XX wieku. Już w czasach rzymskich używano ciepłego powietrza do ogrzewania

pomieszczeń, jednakże grzejniki zaczęto powszechnie używać dopiero w ubiegłym stuleciu. Z kolei we Włoszech, począwszy od czasów Etrusków, z wód geotermalnych odzyskiwano wiele minerałów. Uważa się, że pierwsze wykorzystanie energii geotermalnej jako źródła ciepła dla systemu miejskiego miało miejsce w latach trzydziestych ubiegłego wieku w stolicy Islandii – Reykjaviku (Fridleifsson 1995), natomiast pierwsze prace i doświadczalne instalacje wytwarzające energię elektryczną z energii geotermalnej zrealizowane zostały na złożu geotermalnym Larderello we włoskiej Toskanii. Badania o charakterze eksperymen-



Fot. 1.1. Zdjęcia z lat 1905–1920 przedstawiające P.G. Contiego przy instalacji wytwarzającej energię elektryczną z energii geotermalnej i mobilne laboratorium geotermalne (Ciardi i Cataldi 2005)

Phot. 1.1. Photos from the years 1905–1920 of the Prince Conti with the installation generates electricity from geothermal energy and geothermal mobile laboratory (Ciardi i Cataldi 2005)

talnym prowadził książe Trevignano Piero Ginori Conti i 4 lipca 1904 roku po raz pierwszy w świecie dokonano konwersji energii geotermalnej w energię elektryczną, dzięki której zaświeciło pięć żarówek. Dzięki pracy M. Ciardi i R. Cataldi (2005) możemy zobaczyć na archiwalnych zdjęciach, jak proste to były urządzenia.

Współczesne wykorzystanie energii geotermalnej datuje się, jak wspomniano, od początku XX wieku i realizowane jest zasadniczo w dwóch głównych kierunkach:

- **pośrednie wykorzystanie** polegające na generacji energii elektrycznej z gorących par i wód, których temperatura przekracza 150°C;
- **bezpośrednie wykorzystanie** polegające na odebraniu ciepła płynom geotermalnym (głównie wodzie) i skierowaniu go do użytkowników. Uznaje się, że kierunek ten dotyczy zastosowania wód o temperaturach niższych niż 150°C. W tym obszarze wyróżnia się kierunek związany z wykorzystaniem pomp ciepła, zagospodarowujący niskotemperaturowe źródła energii o temperaturze poniżej 20°C pochodzące z gruntu i płynów występujących na niewielkich głębokościach.

W ostatnich latach upowszechniło się wiele nowych rozwiązań technologicznych, które znalazły zastosowanie przy produkcji lub wykorzystaniu energii. Wśród tego typu urządzeń i rozwiązań można wymienić: absorpcyjne i sprężarkowe pompy ciepła, agregaty kogeneracyjne (tzw. jednostki ciepłno-prądowe) na gaz, biogaz i biomasę, turbiny prądowe, kotły na biomasę, niskotemperaturowe systemy grzewcze, ogrzewanie podłogowe i ścienne oraz wiele różnych innych rozwiązań niemal futurystycznych jak np. produkcja energii elektrycznej z ciepła gruntu. Wiele z tych rozwiązań znalazło już obecnie zastosowanie przy zagospodarowaniu energii geotermalnej.

Jak wcześniej wspomniano, zgodnie z najnowszą Ustawą o odnawialnych źródłach energii z 2015 roku, energia geotermalna jest to energia o pochodzeniu nieantropogenicznym i występująca w postaci ciepła pod powierzchnią ziemi (Dz.U. 2015 poz. 478). Dziewański (Dziewański 1993) definiuje ją jako energię wnętrza Ziemi skumulowaną w skałach i wodach podziemnych. Ciepło we wnętrzu Ziemi jest częściowo ciepłem pierwotnym, które pochodzi z okresu formowania się naszej planety a częściowo jest ciepłem współczesnym pochodzącym głównie z rozpadu pierwiastków promieniotwórczych m.in. z szeregu uranowego, aktynowego i torowego oraz promieniotwórczego izotopu potasu.

Definicje te nie określają głębokości, w jakiej występuje energia oraz wartości temperatur, z jakimi jest związana. Wynika z tego, że pojęcie energii geotermalnej dotyczy praktycznie każdej temperatury wód wglębnych lub skał, z których jest możliwe jej pozyskanie i zagospodarowanie. Nośnikami energii geotermalnej są naturalne płyny złożowe, zwykle wody, ale także ropa naftowa, gaz ziemny i para wodna, występujące w porach i szczelinach skał budujących skorupę ziemską oraz ciecze specjalne, jak np. glikol w pionowych i poziomych systemach gruntowego źródła ciepła dla pomp grzewczych. W świetle powyższego, wody i inne ciecze powinny być klasyfikowane według temperatury określającej sposób ich wykorzystania. Podział ten, bazujący na sposobie wykorzystania energii geotermalnej, można przedstawić następująco (Bujakowski 2010):

1. Energia geotermalna do bezpośredniego wykorzystania jako energia cieplna.

Nośniki o temperaturze do 100°C obejmujące:

- płyny zimne – do 25°C (wykorzystywane jako woda lub glikol w sprężarkowych pompach ciepła z ewentualnym źródłem szczytowym),
- płyny niskotemperaturowe – od 25–60°C (wykorzystywane w absorpcyjnych pompach ciepła z ewentualnym źródłem szczytowym),
- płyny średnotemperaturowe – od 60–100°C (wykorzystywane bezpośrednio u odbiorcy z ewentualnym źródłem szczytowym).

2. Energia geotermalna do pośredniego wykorzystania poprzez produkcję energii elektrycznej.

Nośniki o temperaturze powyżej 100°C obejmujące:

- płyny wysokotemperaturowe – od 100–150°C, (wykorzystywane w elektrowniach binarnych – produkujących energię elektryczną i ciepłą),
- płyny bardzo wysokotemperaturowe – ponad 150°C, (wykorzystywane w konwencjonalnych elektrowniach geotermalnych).

Klasyfikacja ta obejmuje praktycznie wszystkie istniejące płyny występujące w warunkach naturalnych i wprowadzone sztucznie w grunt, poniżej powierzchni terenu (niezależnie od ich temperatury). Jest to propozycja rozbudowanej i zmodyfikowanej klasyfikacji Sokołowskiego (Sokołowski 1996), zgodnie z którą wody o niskiej entalpii dzielą się na:

- zimne do 20°C,
- ciepłe 20–35°C,
- gorące 35–80°C,
- bardzo gorące 80–100°C,
- przegrzane 100–130°C.

Powyższe klasyfikacje mają zastosowanie szczególnie dla wód geotermalnych obecnych powszechnie w polskich zbiornikach hydrogeotermalnych.

Inne stosowane klasyfikacje nie mają dla tych warunków większego znaczenia i zastosowania np.: podział według Rowleya dzieli wody złożowe na cztery klasy (Kapuściński i in. 1997):

- I – <100°C,
- II – 100–150°C,
- III – 150–250°C,
- IV – >250°C.

W klasie I tej klasyfikacji mieści się praktycznie przeważająca ilość wód geotermalnych rozpoznanych w Polsce. Mało przydatny jest także podział na *liquid-dominated* i *vapor-dominated* opisujący nisko- i wysokotemperaturowe hydrogeotermalne systemy. Podział ten znajduje zastosowanie dla warunków, gdzie z energii geotermalnej wytwarzana jest energia elektryczna np. dla złoża *Geysers* w północnej Kalifornii (Shook 1995; Cleveland i Morris 2006). Podobnie dla warunków geologicznych Islandii używany jest podział zasobów geotermalnych opracowany przez Bøðvarssona (Kjara i Eliasson 1983), dzielący zasoby z progową temperaturą 150°C, na nisko- i wysokotemperaturowe.

Klasyfikacja stosowana w balneologii wydzielająca wody: hipotermalne (20–34°C), homeotermalne (34–38°C) i hipertermalne (>38°C), a także stosowana w hydrogeologii; wody chłodne ($t_{\text{wody}} < t_{\text{średnia temperatura powietrza}}$), zwykle ($t_{\text{w}} \approx t_{\text{stp}}$) i ciepłe ($t_{\text{w}} > t_{\text{stp}}$) (Kapuściński i in. 1997), mogą być stosowane dla polskich warunków geologicznych, aczkolwiek są one mało informatywne z energetycznego punktu widzenia.

Jak wspomniano, współczesne wykorzystanie energii geotermalnej realizowane jest w dwóch głównych kierunkach: do wytwarzania energii elektrycznej oraz do wytwarzania energii cieplnej. W XX wieku po raz pierwszy „ujarzmiono” energię geotermalną i rozpoczęto jej wykorzystywanie na dużą skalę dla potrzeb ciepłowniczych, przemysłowych i produkcji energii elektrycznej. W 1904 roku zapoczątkowano wytwarzanie energii elektrycznej w Larderello we Włoszech, a w latach trzydziestych w stolicy Islandii – Reykjavíku rozpoczął funkcjonowanie pierwszy duży miejski system ciepłowniczy (Fridleifsson 1995).

Produkcja i sprzedaż energii z energii geotermalnej na świecie prowadzona jest zatem już od ponad wieku, przy czym w ostatnich czterech dekadach naszego stulecia osiągnęła wielkość rzędu setek MW (zarówno do produkcji energii elektrycznej jak i do zastosowań bezpośrednich).

Skalę obecnego wykorzystania energii geotermalnej przedstawia tabela 1.1. Dane do jej opracowania pozyskiwane są w cyklu pięcioletnim i prezentowane na Światowych Kongresach Geotermalnych (WGC). Od momentu prowadzenia statystyki ogólnoświatowej, tj. od 1995 roku (pierwszy WGC we Florencji) rejestruje się systematyczny wzrost liczby państw ujętych w statystykach, od 28 w 1995 roku do 82 w 2015 roku. Wielkość mocy zainstalowanej i wielkość wytwarzanej energii systematycznie rośnie. Warto zauważyć, że liczba otworów, które były wykonane w latach 2010–2014 dla obydwu kierunków wykorzystania energii geotermalnej (z wyłączeniem odwiertów dla pomp ciepła), wyniosła około 2218, wśród których aż 1074 otwory wykonane zostały w 8 krajach Azji. Prace te wymagały

Tabela 1.1

Wykorzystanie energii geotermalnej w świecie w roku 2010 i 2015
(na podstawie Bertani 2015 oraz Lund i Boyd 2015)

Table 1.1

The use of geothermal energy in the world in 2010 and 2015
(based on Bertani 2015 and Lund and Boyd 2015)

Pośrednie wykorzystanie energii geotermalnej (wytwarzanie energii elektrycznej) 2010 i 2015 rok						Bezpośrednie wykorzystanie energii geotermalnej (wytwarzanie energii cieplnej) 2010 i 2015 rok					
moc [MW _e]			energia [GWh/r]			moc [MW _t]			energia [TJ/r]		
2010	2015	%*	2010	2015	%*	2010	2015	%*	2010	2015	%*
10 897	12 635	16	67 246	73 549	9	48 400	70 329	45	423 780	587 786	39

* Procentowy przyrost mocy i energii w latach 2010–2015.

zaangażowania ogromnych środków finansowych, które szacuje się na poziomie 20 miliardów USD.

Na podstawie danych zawartych w tabeli 1.1 można oszacować wzrost zainstalowanych mocy oraz ilości wytwarzanej energii. W analizowanym okresie pięciu lat zaznacza się wyjątkowo wysoki wzrost zainstalowanej mocy – około 45% i związany z tym wzrost ilości energii oceniony na 39%. Liczby te dotyczą wykorzystania bezpośredniego i wynikają głównie z ogromnego przyrostu liczby nowych instalacji geotermalnych, bazujących na pompach ciepła. Oszacowano, że już teraz udział mocy zainstalowanych w tych instalacjach przekracza 70%, a ilość energii przekracza 55% (Lund i Boyd 2015). Biorąc pod uwagę nową politykę nie tylko światową, ale i polską polegającą na promowaniu m.in. w Ustawie o Odnawialnych Źródłach Energii z 2015 r. tzw. energetyki prosumenckiej, można sądzić, że ten kierunek wykorzystania zasobów geotermalnych będzie dalej się dynamicznie rozwijał i w następnej pięcioletce.

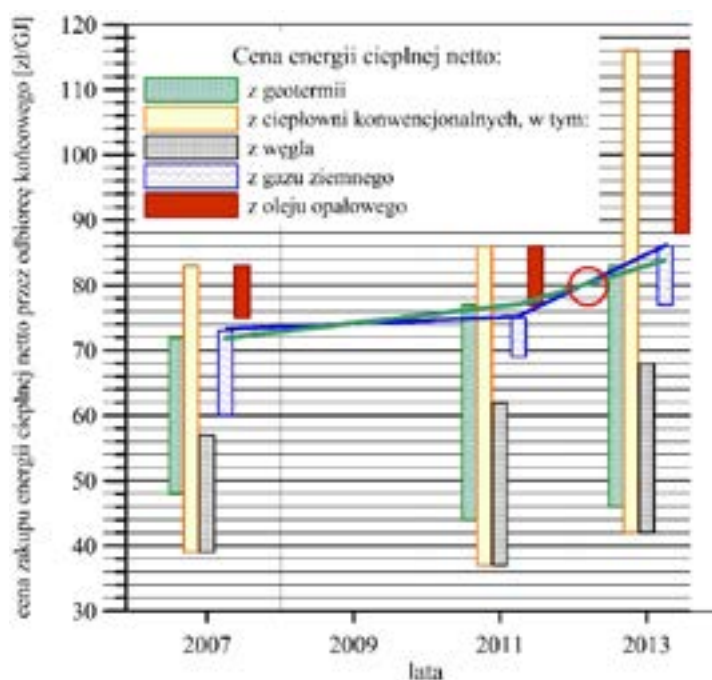
Do tej pory do wytwarzania energii elektrycznej wykorzystuje się na świecie jedynie niewielki procent potencjału energetycznego źródła geotermalnego, jakkolwiek w niedalekiej przyszłości istnieje realna możliwość zwiększenia produkcji energii elektrycznej z zasobów o dominującym udziale pary (*vapor-dominated reservoir*) oraz złóż pary przegrzanej (*water superheated reservoir*) (Bertani 2015). Zakres możliwości bezpośredniego wykorzystania energii geotermalnej jest znacznie większy, gdyż całą dostępną bazę zasobów użytecznych ocenia się na 600 000 EJ, co przy założeniu obecnego poziomu wykorzystania powinno starczyć na 5 mln lat (Fridleiffson 2000). W Polsce zasoby eksploatacyjne wód i energii geotermalnej oszacowane zostały na od ponad 92 tys. TJ/rok (Bujakowski 2010) do 138–230 tys. TJ/rok (Górecki red. 2006a). Dla wyobrażenia skali tych liczb można określić, że wielkości te stanowią równowartość energii wytwarzanej w około 300 do blisko 800 instalacji wielkości zakładu geotermalnego w Bańskiej Niżnej. A zatem przy istniejących zasobach, jak i stosunkowo zaawansowanych technologiach udostępniania i wytwarzania energii, dalszy rozwój zastosowań geotermalnych tak w Polsce, jak i w świecie sprowadza się w zasadzie do problemu opłacalności i konkurencyjności na rynku z innymi nośnikami energii w poszczególnych krajach.

Wykorzystanie naturalnych zasobów energii geotermalnej do celów bezpośrednich w Polsce ma uzasadnienie ekologiczne, energetyczne i społeczne a często również ekonomiczne. Dominującym argumentem za ich zagospodarowaniem jest praktycznie minimalne oddziaływanie na środowisko przyrodnicze w procesie pozyskiwania energii cieplnej. Cecha ta wyróżnia ten rodzaj zasobów energii także wśród innych tzw. odnawialnych. Produkcja ciepła z geotermalnego źródła energii nie wiąże się ze spalaniem i emisją jak to ma miejsce np. w przypadku pozyskiwania bioenergii (biomasa, biopaliwa, biogaz) oraz nie wpływa niekorzystnie na krajobraz czy zmiany środowiska atmosferycznego, gleby i cieków wodnych z czym należy się liczyć np. w przypadku stosowania energetyki wiatrowej czy wykorzystania wód powierzchniowych. W takim ujęciu jedynie energia słoneczna jest równie nieinwazyjna środowiskowo jak energia geotermalna.

Zwolennicy wykorzystania geotermalnego źródła energii do celów bezpośrednich wskazują także na jego powszechne występowanie i stabilność parametrów energetycznych

w długim okresie czasu co decyduje o jego dyspozycyjności. Energetyka wiatrowa i słoneczna nie mogą pochwalić się takimi walorami, zwłaszcza w polskich warunkach klimatycznych. Niezależnie od tego należy stwierdzić, że każdy rodzaj odnawialnego źródła energii jest zawsze bardziej korzystny, z ekologicznego punktu widzenia, od tradycyjnych – konwencjonalnych źródeł energii.

Niezaprzeczalne zalety energii geotermalnej są obniżane a niekiedy całkowicie dezawuowane opiniami o bardzo dużych kosztach jej pozyskiwania oraz o problemach technicznych, dotyczących głównie korozji instalacji i procesu zatłaczania wód do górotworu. Te opinie mają swoje uzasadnienie wynikające z dotychczasowych doświadczeń z wdrażania technologii wykorzystania energii geotermalnej w Polsce (Kępińska i Bujakowski 2011), są jednak dyskusyjne zwłaszcza w świetle wyników pochodzących z wieloletniej eksploatacji instalacji geotermalnych (Pająk i Bujakowski 2007, 2011 i 2013). Analizy ekonomiczne przeprowadzone na informacjach pochodzących z blisko dwudziestoletnich doświadczeń płynących z działających instalacji wskazują, że ciepło wytwarzane w zakładach geotermalnych już jest lub może być konkurencyjne kosztowo z ciepłem wytwarzanym z konwencjonalnych paliw (Pająk i Bujakowski 2007, 2011 i 2013). Na rysunku 1.1 zaznaczono kółkiem



Rys. 1.1. Zmiany jednostkowych cen zakupu energii cieplnej netto obowiązujących odbiorcę końcowego w Polsce, opracowane na podstawie danych z taryf rozliczeniowych dla lat 2007, 2011 i 2013 (Pająk i Bujakowski 2013)

Fig. 1.1. Changes of unit purchase price of the net heat in the end user, based on data from billing tariffs for the years 2007, 2011 and 2013 (Pająk and Bujakowski 2013)

punkt przecięcia się krzywych wzrostu cen z gazu (kolor niebieski) i z geotermii (kolor zielony). Z wykresu wynika, że ceny ciepła z geotermii już obecnie mogą być znacznie niższe niż wytwarzane z oleju opałowego oraz bardzo konkurencyjne w porównaniu do cen ciepła z gazu ziemnego. Jedynie ciepło pochodzące z węgla kamiennego jest wyraźnie tańsze.

W tabeli 1.2 przedstawiono zestawienie wyników zmian cen ciepła z różnych nośników energii w Polsce. Ważnym odnotowaniem jest stwierdzony fakt najmniejszego tempa wzrostu cen ciepła pochodzącego z energii geotermalnej w porównaniu do wzrostu cen ciepła pochodzącego z gazu, oleju opałowego a nawet z węgla. To najmniejsze tempo wzrostu cen ciepła odnotowane zostało w ujęciu wieloletnim (od 2007 roku) oraz w skali jednego roku (Pająk i Bujakowski 2013). Ta ostatnia informacja wskazuje, że średni wzrost był na poziomie poniżej rocznej inflacji i dobitnie potwierdza, że cena ciepła z geotermii jest bardzo stabilna w czasie i tylko nieznacznie wrażliwa na zmiany cen innych nośników energii i kosztów funkcjonowania zakładu geotermalnego.

Tabela 1.2

Zmiany procentowe średnich cen zakupu energii cieplnej netto przez odbiorcę końcowego dla wybranych pierwotnych nośników energii w Polsce (Pająk i Bujakowski 2013)

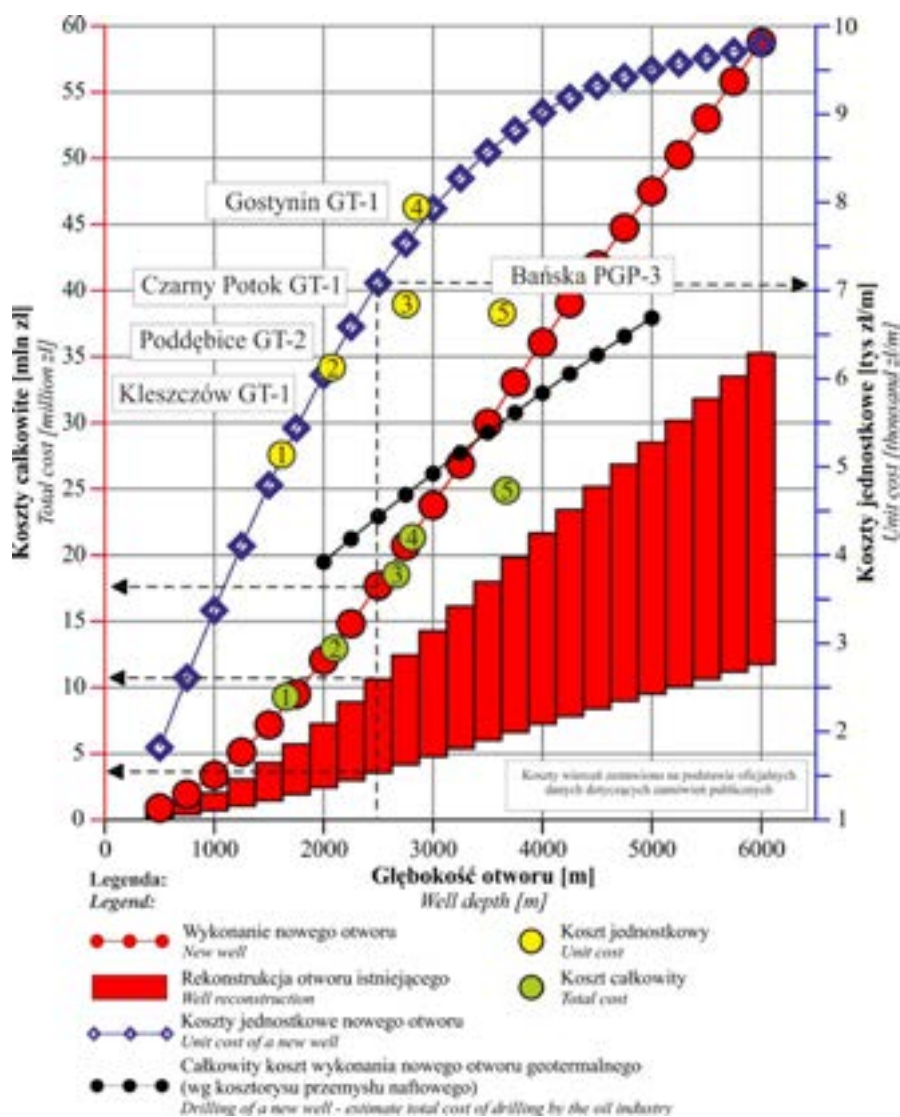
Table 1.2

Percentage changes in average purchase net prices of the heat, values applicable for a final customer and selected primary energy carriers in Poland (Pająk, Bujakowski 2013)

Wyszczególnienie	Wzrost średniej ceny energii w latach 2007–2013	
	[% odniesione do 2007]	[%/rok]
Ciepłownie wykorzystujące energię geotermalną	8,3	1,4
Ciepłownie na węgiel	14,6	2,4
Ciepłownie na gaz ziemny	22,4	3,7
Ciepłownie na olej opałowy	29,1	4,9

Podstawowym czynnikiem cenotwórczym wpływającym na poziom ceny ciepła z zakładu geotermalnego są koszty związane z wykonaniem odwiertów. Przeprowadzono ocenę porównawczą kosztów odwiertów geotermalnych wykonanych w ostatnim czasie, tj. Kleszczów GT-1, Poddębice GT-1, Czarny Potok GT-1, Gostynin GT-1 oraz Bańska PGP-3. Wyniki przedstawiono na rysunku 1.2 (Barbacki in. 2013), który ukazuje krzywą kosztów wykonania nowego odwiertu, krzywą kosztów jednostkowych wykonania 1 mb nowego odwiertu oraz zakres kosztów wykonania rekonstrukcji istniejącego odwiertu. Obszary wykresu obejmujące głębokości poniżej 1000 m i powyżej 4000 m zawierają dane, które zostały oszacowane na podstawie własnych informacji pochodzących z wiertniczych prac hydrogeologicznych i przemysłu naftowego.

Z analizy zestawienia przedstawionego na rysunku 1.2 wynika, że koszty całkowite jak i jednostkowe wykazują stały trend wzrostowy związany z głębokością końcową odwiertu. Niezależnie od tego należy liczyć się z faktem konieczności poniesienia bardzo dużych nakładów finansowych na prace wiertnicze. Dodatkową niedogodnością jest to, że są one ponoszone na wstępnych etapach rozwoju przedsięwzięcia inwestycyjnego i zwykle związane są z poziomem ryzyka geologicznego, tj. niepewnością osiągnięcia planowanych parametrów złożowych.



Rys. 1.2. Koszty otworów geotermalnych w ujęciu nakładów inwestycyjnych wykonania nowego lub rekonstrukcji istniejącego otworu (wg Barbacki i in. 2013)

Fig. 1.2. The costs of geothermal wells in terms of investment performance of new or reconstruction of the existing borehole (by Barbacki et al. 2013)

W naszym kraju pierwsze badania w zakresie geotermii wykonane zostały w latach sześćdziesiątych XX wieku i dotyczyły podstawowych zagadnień związanych z rozkładem pola geotermicznego (Plewa 1966, 1994a, b; Majorowicz 1976, 1977). Najistotniejszy wkład w rozwój tej dziedziny miały trzy ośrodki badawcze, tj. Państwowy Instytut Geologiczny, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk i Akademia Górniczo-Hutnicza. Naukowcy tych instytucji wydali liczne publikacje w zakresie rozpoznania warunków geotermicznych, wśród których należy wymienić m.in. następujące prace: Paczyński 1993 i 1995; Ney, Sokołowski 1987; Ney 1992 i 1997; Sokołowski 1987, 1998 i 1999; Płochniewski 1985; Dowgiałło 1976, 2007; Sobański, Nowak 1994 oraz Kępińska 2003, 2015. Należy podkreślić wydanie zestawu atlasów geotermalnych (Górecki red. 1990, 1995, 2006a, 2006b, 2011, 2012 i 2013; Barbacki, Bujakowski, Pająk 2006; Bujakowski, Tomaszewska red. 2014; Sonik-Heliasz red. 2009; Karwasiecka 1996).

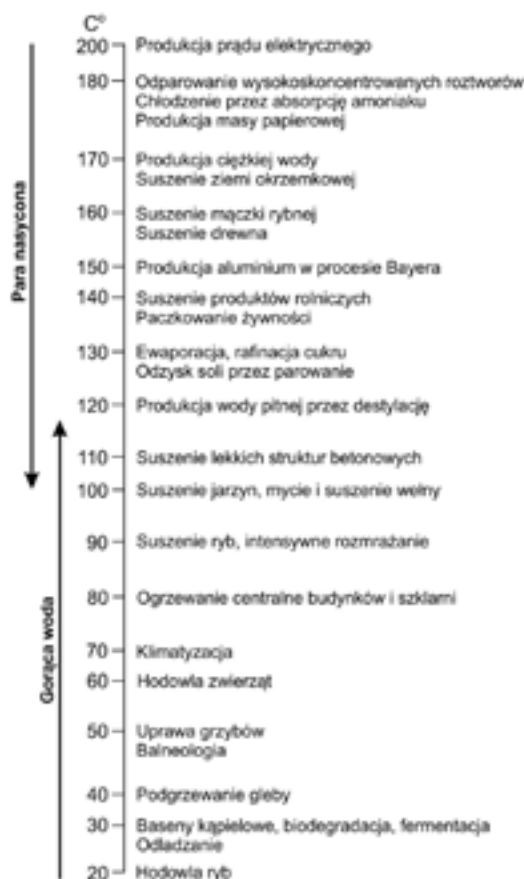
Obecnie w naszym kraju wykorzystanie energii geotermalnej ma miejsce jedynie w bezpośredni sposób tj. do wytwarzania energii cieplnej. Pierwsza instalacja geotermalna w naszym kraju uruchomiona przez Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk rozpoczęła swoją działalność w 1994 roku. Wtedy to popłynęła gorąca woda z Doświadczalnego Zakładu Geotermalnego PAN w Białym Dunajcu do 7 domów prywatnych w miejscowości Bańska Niżna oraz do obiektów tzw. kaskadowego systemu wykorzystania energii. Energia geotermalna została wykorzystana:

- do wytwarzania ciepła w centralnym systemie ogrzewania pomieszczeń mieszkalnych,
- do produkcji ciepłej wody użytkowej,
- do ogrzewania komory suszarni drewna,
- do wytwarzania ciepła w instalacjach grzewczych szklarni parapetowej,
- w instalacjach grzewczych i technologicznych hodowli ryb,
- w instalacji ogrzewającej grunt w tunelach upraw roślin pod osłonami foliowymi.

Wykorzystany w Doświadczalnym Zakładzie Geotermalnym PAN zakres wykorzystania energii geotermalnej stanowi jedynie ułamek możliwości zastosowania tego źródła. Potencjalny zakres możliwych zastosowań geotermalnej energii został zestawiony przez islandzkiego badacza geotermalnego Baldura Lindala (rys. 1.3) (Lindal 1973).

Aktualnie (2015 r.) w Polsce w 23 lokalizacjach prowadzona jest eksploatacja wód złożowych o temperaturze ponad 20°C, a więc wód geotermalnych (symbol w tab. 1.3 – T). Często są to wody zmineralizowane (symbol Z) i uznane za lecznicze (symbol Lz) o mineralizacji ponad 1 g/dm³ (tab. 1.3) (Bilans zasobów złóż i kopalin w Polsce wg stanu na 31.12.2013 r.). Zgodnie z polskim prawem wody takie uznawane są za kopalinę podstawową, która może być pozyskiwana na podstawie koncesji eksploatacyjnej i w warunkach funkcjonującego zakładu górniczego.

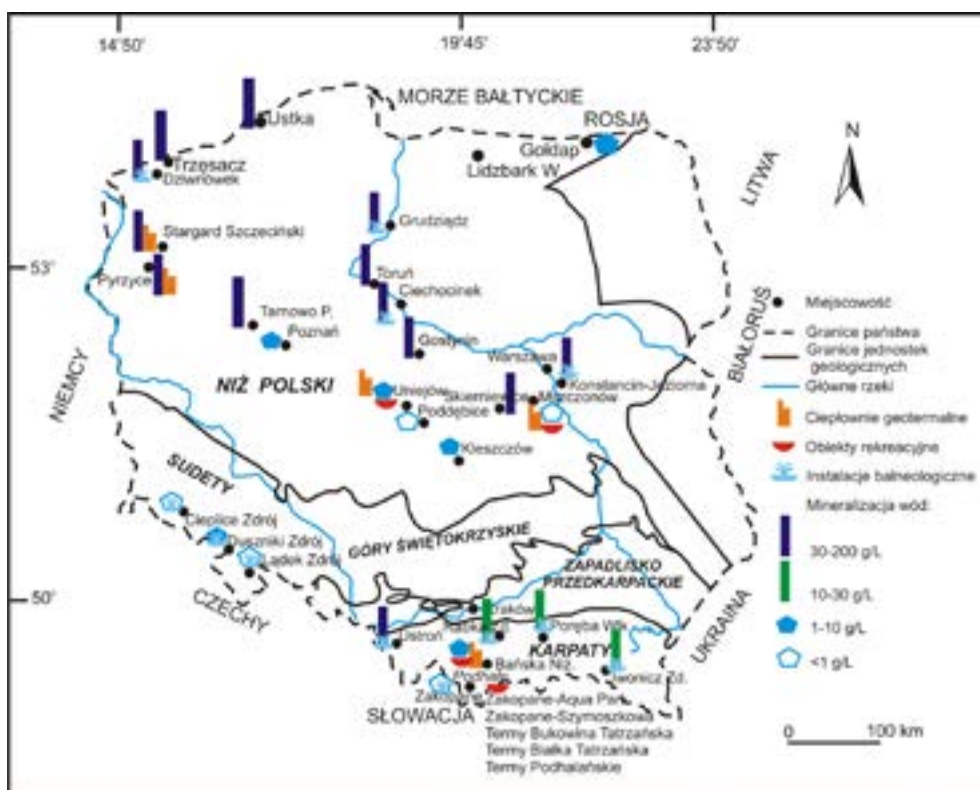
Na rysunku 1.4 (Tomaszewska 2014) oraz w tabeli 1.3. zestawiono wszystkie działające instalacje wydzielając grupę I obejmującą 13 lokalizacji w których odbywa się eksploatacja wód geotermalnych często zmineralizowanych. W tej grupie znalazły się obiekty wydobywające wody do celów dostarczania energii cieplnej dla odbiorców indywidualnych podłączonych do centralnych sieci ciepłowniczych oraz dla obiektów rekreacyjnych, w których oprócz ciepła



Rys. 1.3. Diagram Lindala wykorzystania energii geotermalnej (wg Lindal 1973)

Fig. 1.3. Lindal's diagram of geothermal energy utilization (acc. Lindal 1973)

często wykorzystywana jest woda złożowa w celach konsumpcyjnych. W jednym obiekcie, tj. w Mszczonowie, wykorzystuje się wodę geotermalną po jej uzdatnieniu także jako wodę pitną. Warunki umożliwiające takie wykorzystanie wód posiadają również Poddębice, gdzie można zakładać, że w ramach optymalizacji pracy całego systemu także tu znajdzie zastosowanie ten sposób wykorzystania wód podziemnych. Jak wspomniano, w trzynastu lokalizacjach wody geotermalne wykorzystywane są do ogrzewania pomieszczeń, wytwarzania ciepłej wody użytkowej i do rekreacji. W obrębie grupy II zestawiono dziesięć lokalizacji, w których eksploatacja wód geotermalnych, a jednocześnie zmineralizowanych, prowadzona jest niekiedy od bardzo dawna dla potrzeb balneologicznych głównie poprzez inhalacje, kąpiele oraz kuracje pitne. Potencjał energetyczny tych wód jest raczej niewysoki, aczkolwiek nawet taki może być zagospodarowany dla celów ciepłowniczych własnych obiektów leczniczych. Decyzja o takim kierunku pełniejszego wykorzystania wydobywanych wód musi być każdorazowo poprzedzona indywidualną oceną efektywności ekonomicznej takiego przedsięwzięcia.



Rys. 1.4. Lokalizacja funkcjonujących i budowanych zakładów geotermalnych i balneologicznych w Polsce (Tomaszewska 2014)

Fig. 1.4. Location of existing and built geothermal plants and balneology in Poland (Tomaszewska 2014)

Na obszarze Polski dominują zbiorniki wód geotermalnych o temperaturach od 20 do 130°C znajdujące się na głębokościach do 4 km. W istniejących zakładach geotermalnych pozyskiwane są wody o temperaturach od 27 do 87°C. Energetyczne wykorzystanie tych wód odbywa się w większości przypadków przy zastosowaniu pomp ciepła absorpcyjnych i sprężarkowych oraz urządzeń wspomaganie szczytowego (zwykle kotły gazowe). Konieczność stosowania tych urządzeń związana jest z charakterystyką odbiorców energii, gdyż większość instalacji centralnego ogrzewania w kraju zaprojektowano i wykonano jako instalacje grzejnikowe o nominalnych parametrach zasilania 90/70°C, przy zewnętrznych temperaturach obliczeniowych zmieniających się w przedziale od -16 do -24°C (zależnie od lokalizacji). Parametry grzewcze odbiorców energii powodują potrzebę stosowania dodatkowych urządzeń dogrzewających wody technologiczne w szczytowych okresach niskich temperatur. Z tym faktem związane są większe nakłady finansowe związane z budową geotermalnego źródła energii, znacznie przekraczające koszty budowy źródła tradycyjnego, a co z tego wynika – wyższy koszt wytworzenia jednostki energii. Koszt ten mógłby być niższy pod warunkiem zwiększenia produkcji energii, co jest możliwe np. poprzez większe wykorzystanie

Tabela 1.3

Główne parametry energetyczne instalacji geotermalnych, balneologicznych i pomp ciepła w Polsce
(opracowane na podstawie Bujakowski 2010; Kępińska 2015; Lisik i Szczepański 2014;
Ciężkowski i Liber-Makowska 2011; Baza PSH – www.mineralne.pgi.gov.pl; Bilans Zasobów 2014)

Table 1.3

Principal energetic parameters of geothermal, balneological and heat pumps installations in Poland
(basic Bujakowski 2010; Kępińska 2015; Lisik and Szczepański 2014; Ciężkowski and Liber-Makowska 2011;
Baza PSH – www.mineralne.pgi.gov.pl; Bilans Zasobów 2014)

Lokalizacja instalacji	Data uruchomienia*, sposób wykorzystania	Zasoby eksploatacyjne [m ³ /godz.]	Temperatura [°C]	Moc zainstalowana z geotermii (wartości oszacowane) [MW _t]	Pobór wód (w 2013 r.) [m ³ /godz.]	Produkcja energii z geotermii (wartości oszacowane) [TJ/rok]
1	2	3	4	5	6	7
Grupa I – Instalacje wykorzystujące wody geotermalne do ogrzewania i rekreacji (temp. > 25°C)						
1. Podhale – Bańska Niżna	1994 rok, sieć grzewcza, ogrzewanie i woda do kąpieliska T, Z	960	86	40,8	3 455 191	300
2. Pyrzyce	1996 rok, sieć grzewcza T, Z	340	61	12,0	789 997	54
3. Mszczonów	2000 rok, sieć grzewcza, ogrzewanie i woda do kąpieliska, wody pitne T	60	41	3,7	337 501	15
4. Uniejów	2001 rok, ogrzewanie i woda do kąpieliska, sieć grzewcza T, Z	120	68	3,1	857 497	28
5. Podhale – Zakopane Antałówka	2006 rok, ogrzewanie i woda do kąpieliska T	130	33,5	0,52	318 455	4
6. Podhale – Bukowina Tatrzańska	2008 rok, ogrzewanie i woda do kąpieliska T	48	64,5	2,46	275 290	15
7. Stargard Szczeciński	2008 rok, sieć grzewcza T, Z	200	87	12,6	1 277 970	168

Tabela 1.3. cd.

Table 1.3. cont.

1	2	3	4	5	6	7
8. Podhale – Zakopane Szymoszkowa	2009 rok, ogrzewanie i woda do kąpieliska T	70	27	0,3	178 775	3
9. Poznań – otw. Swarzędz IGH-1	2011 rok, ogrzewanie i woda do kąpieliska T, Z	10	38	0,44	5 806	10
10. Podhale – Białka	2011 rok, ogrzewanie i woda do kąpieliska T, Z	32	73	0,37	145 036	12
11. Poddębice	2012 rok, sieć grzewcza, ogrzewanie i woda do kąpieliska T	190	71	10,0	401 353	15
12. Podhale – Witów	2013 rok, ogrzewanie kąpieliska T,	120	82	0,2	88 837	6
13. Cieplice	2014 rok, ogrzewanie i woda do kąpieliska Ls, T,	56,54	87	0,3	52 609	10
Razem				86,79		640
Grupa II – Instalacje wykorzystujące wody lecznicze – geotermalne do balneologii i lecznictwa						
1. Ciechocinek	XII w. 1932 r. Lz, T	345	27–32	3,2	91 609	3,0
2. Duszniki	XV/XVI w. 1797 Ls, T	107,48	16–21	1,0	304 935	10,2
3. Grudziądz-Marusza	2006 r. Lz, T	20	44	0,5	4 005	0,3
4. ŁądekZdrój	XIII w. 1976 r.(otw. L2) Ls, T	59,85	20–44	0,8	170 419	8,6
5. Lubatówka-Iwonicz	1955 r. Ls, Lz, T	41,09	24	0,38	15 656	0,8
6. Rabka Zdrój	XIX w. 2007 Lz, T	6,44	28	0,09	3 731	0,2

Tabela 1.3. cd.

Table 1.3. cont.

1	2	3	4	5	6	7
7. Ustroń	Lata 60' XXw. 1994 r. Lz, T	2,2	28	0,03	6 202	0,3
8. Gołdap	Uzdrowisko 2000 2012 Lz, T	22	21	0,2	705	0,02
9. Ustka	Uzdrowisko 1987 2014 Lz, T	31	21	0,29	bd	0,02
10. Busko Zdrój	XVIII w. 2012 Lz, T	6	25	0,08	22 148	1,1
Razem				6,57		24,54
Grupa III– Instalacje wykorzystujące ciepło gruntu i wód w pompach ciepła (temp. < 25°C)						
Pompy ciepła (ok. 35 000)			od –7 do 25	290		2 500
SUMA WSZYSTKICH INSTALACJI				383,36		3 164,54

* W grupie II – daty o pierwszych wzmiankach i/lub udokumentowanej działalności zestawiono na podstawie dostępnych źródeł.

Symbole użyte w tabeli: Z – wody zmineralizowane (mineralizacja >1 g/dm³), Lz – wody lecznicze zmineralizowane (mineralizacja >1 g/dm³), Ls – wody lecznicze słabozmineralizowane (mineralizacja <1 g/dm³), T – wody geotermalne, bd – brak danych.

temperatury ciepłej wody użytkowej, tj. poniżej 50–45°C. Jednakże aby to osiągnąć, należałoby włączyć w taki system odbiorców energii, którzy będą wykorzystywać właśnie ten zakres temperatur (np. ogrzewanie podłogowe i ścienne, domy pasywne).

Pomimo często stwierdzanego interesującego składu chemicznego, wody geotermalne jednocześnie uznawane za lecznicze nie są szeroko wykorzystywane do celów terapeutycznych. Według zestawienia Państwowego Instytutu Geologicznego (www.mineralne.pgi.gov.pl) obecnie w Polsce na ogólną liczbę 45 uzdrowisk, 39 posiada udokumentowane wody lecznicze, a w tej liczbie w 10 korzysta się z dobrodziejstwa wód geotermalnych dla naszego zdrowia (tab. 1.3). Można uznać, że są to nieliczne przedsięwzięcia w skali możliwości i potencjału zasobowego. Jak wielkie są to możliwości przedstawiają szczegółowe zestawienia i informacje zawarte w wielu monografiach i publikacjach m.in. (Ciężkowski 2007; Ciężkowski i in. 2005; Dowgiałło 2007; Dowgiałło i Fistek 2007; Szczepański i Szklarczyk 2005; Szczepański i Porwisz 2007; Lisik i Szczepański 2014; Chowaniec 2007 i 2009; Chowaniec i in. 2010; Porwisz 2013).

Odrębnym obszarem wykorzystania energii geotermalnej jest zastosowanie pomp ciepła, których dolnym źródłem są wody podziemne lub grunt. Instalacje te jakkolwiek o niewiel-

kich mocach (zestawione w grupie III tab. 1.3), z racji bardzo dużej liczby rzędu kilkudziesięciu tysięcy, już obecnie stanowią około 75% mocy zainstalowanej w źródłach opartych na energii geotermalnej (tab.1.3). Można przypuszczać, że instalacje te będą coraz powszechniej stosowane i ich udział w bilansie energetycznym będzie rósł podobnie jak to ma miejsce w świecie, gdzie oszacowany został na ponad 70% (Lund i Boyd 2015).

Dotychczasowa, polska droga wykorzystania energii geotermalnej niskiej entalpii koncentrowała się zasadniczo na trzech głównych kierunkach, tj. wytwarzaniu ciepła dla instalacji centralnego ogrzewania, na instalacjach pomp ciepła oraz w bardzo niewielkim stopniu na wykorzystaniu w instalacjach balneologicznych. Obecna światowa i krajowa sytuacja energetyczna, społeczna świadomość ekologiczna, przykłady państw ościennych oraz wzrost zamożności społeczeństwa są przyczynami dużego zainteresowania odnawialnymi źródłami energii, a w przypadku energii geotermalnej oprócz cech energetycznych dodatkowo fizykochemicznymi walorami jej nośnika, tzn. wody geotermalnej.

2. Etap rozpoznawczy

Pierwszy etap badawczy dotyczący rozpoznania warunków geologiczno-geotermalnych obejmuje zakres badań rozpoczynający się oceną sytuacji w skali makroregionalnej, a kończy rozpoznaniem w skali lokalnej dla konkretnej lokalizacji planowanego zakładu geotermalnego. Gromadzone i analizowane w tym etapie informacje pochodzą z badań geofizycznych, geologicznych, wiertniczych, hydrogeologicznych oraz geomorfologicznych. Ilość i jakość tych danych ma zwykle decydujący wpływ na dalszy przebieg i rozwój projektu inwestycji geotermalnej. Na podstawie zbioru informacji oraz po wykonaniu wstępnej analizy ekonomicznej podejmuje się decyzje albo o zaniechaniu realizacji inwestycji, albo też opracowuje się program prac badawczych, które mają na celu pozyskanie danych w celu wykonania projektu inwestycji.

Podstawowe badania wykonywane na etapie rozpoznawczym dotyczą rozpoznania warunków geologiczno-geotermalnych i określenia wielkości zasobów dyspozycyjnych wód i energii geotermalnej wykonanych w planowanej skali.

Generalny podział stopnia rozpoznania rejonu badań oparty został na skali obszaru objętego badaniami oraz na szczegółowości przedstawianych informacji. Proponowana klasyfikacja rozpoznania przedstawia się następująco:

1. **Rozpoznanie makroregionalne** – obszar objęty rozpoznaniem obejmuje kilka krajów, jednostek geologicznych itp.,
2. **Rozpoznanie krajowe** – obszar jest ograniczony do powierzchni jednego państwa,
3. **Rozpoznanie regionalne** – dotyczy jednostki administracyjnej posiadającej realny wpływ na rozwój przedsięwzięć gospodarczych,
4. **Rozpoznanie lokalne** – dotyczy obszaru najmniejszej jednostki administracyjnej realizującej zadania gospodarcze identyfikowane z obszarem bezpośredniej lokalizacji inwestycji.

Powyżej wymienione stopnie rozpoznania nie uwzględniają informacji wprowadzających w problematykę lub systematyzujących stan wiedzy. Mają one zwykle charakter popularno-naukowy lub doniesień naukowych zestawiających dane o zjawisku naturalnym, jakim są zasoby energii geotermalnej, sposobie i skali jej wykorzystania oraz jej usytuowanie w obszarze energetyki światowej. Tego typu opisy można znaleźć m.in. w opracowaniach „Energia geotermalna: Świat–Polska–Środowisko” oraz „Energia wokół nas” (Bujakowski red. 2000, 2001). Publikacje te skierowane są głównie do niespecjalistów, uczniów

szkół podstawowych i średnich, a także mogą być przydatne dla nauczycieli zajmujących się ochroną środowiska i racjonalnym wykorzystaniem różnych rodzajów energii. Przybliżanie tematyki i propagowanie wykorzystania energii geotermalnej jest istotnym elementem rozwijania świadomości ekologicznej powinno być realizowane m.in. poprzez wywiady dla mediów, wystąpienia na konferencjach oraz publikacje w artykułach i broszurach informacyjnych.

Potrzeba pogłębienia wiedzy dotyczy grup i osób z różnorodnych środowisk społecznych, które wcześniej zetknęły się zagadnieniem wykorzystania geotermii, często jednak bez udziału wiedzy specjalistycznej. Dla tego rodzaju odbiorcy dużą wagę mają artykuły, monografie i prezentacje zestawiające informacje i dane w szerszym kontekście. Rolę taką pełnią prace książkowe, w których znalazły się informacje mówiące o energii geotermalnej wydane przez Polskie Towarzystwo Inżynierii Ekologicznej „Zielone prądy w edukacji” (Bujakowski 2006) i przez Stowarzyszenie Gmin Polska Sieć Energie Cities „Odnawialne źródła energii w Małopolsce” (Bujakowski 2007). Tematyka informacyjna w tym zakresie prezentowana była w artykułach zamieszczonych w polskich czasopismach specjalistycznych np. w *Przeglądzie Geologicznym* (Bujakowski 2000, 2010), *Technice Poszukiwań Geologicznych – Geotermia Zrównoważony Rozwój* (Bujakowski 1999). Czynnikiem statystyczny ukazujący m.in. pozycję energii geotermalnej na tle innych OZE, był wiodący w materiałach prezentowanych na konferencjach zagranicznych np. w Bazylei (Kępińska, Bujakowski i Ney 1999) i Światowych Kongresach Geotermalnych (Kępińska, Bujakowski i Ney 2000; Kępińska 2015; Bujakowski 2005).

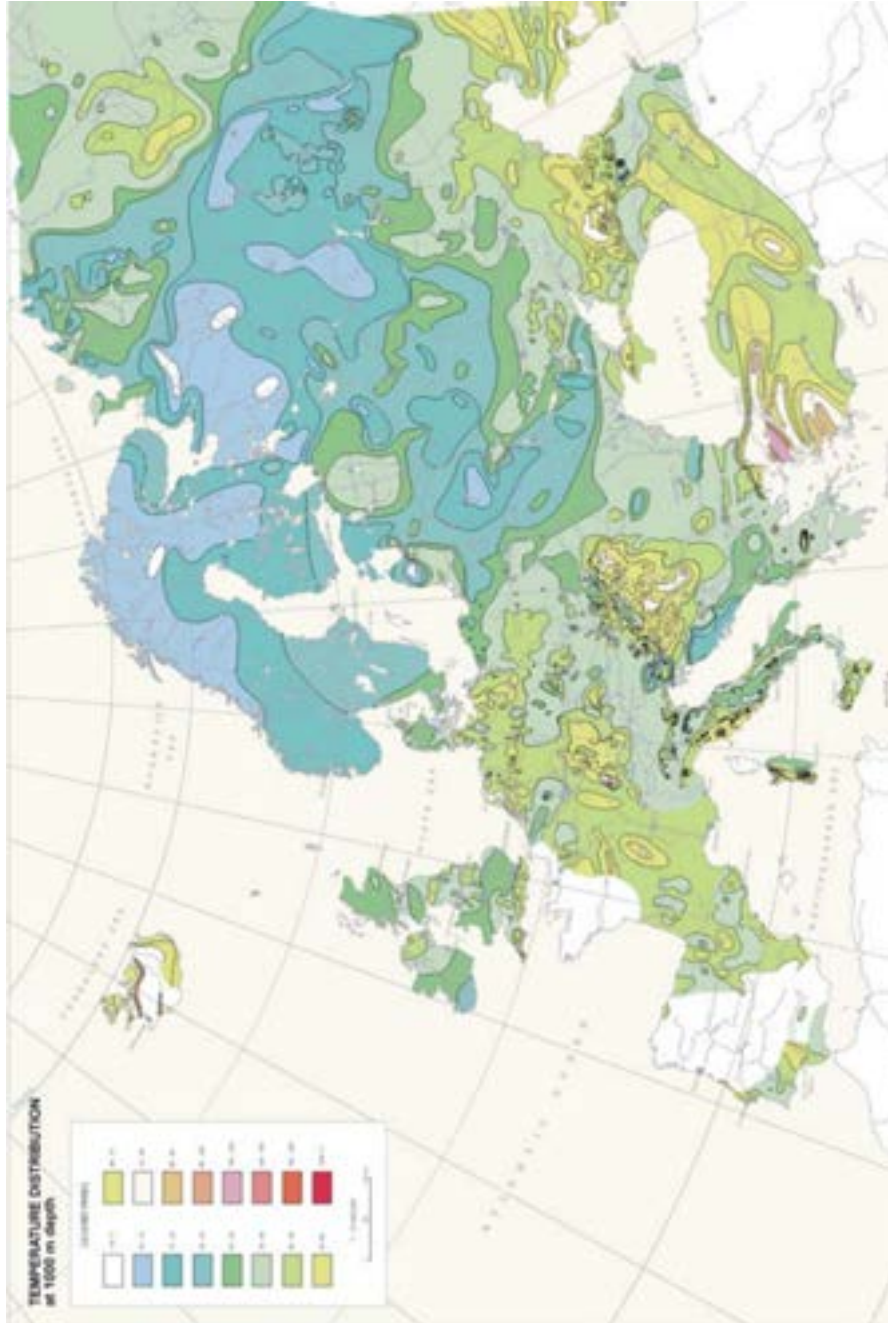
3. Rozpoznanie w skali makroregionalnej

Przykładem tego typu rozpoznania są opracowania dające ogólny obraz zasobów energii geotermalnej np. dla obszaru Europy (Sigfússon Uilhlein 2015). Powstały one w wyniku kompilacji danych pochodzących z poszczególnych krajów co powoduje, że syntetyczny obraz wynikowy rozpoznania makroregionalnego nie jest wystarczająco ujednoczony i dlatego nie może być przedmiotem szczegółowych wniosków dotyczących rozpoznania krajowego. Skala map oraz zastosowanie znacznych uproszczeń powoduje, że wynik takiego rozpoznania winien być odczytywany jedynie jako poglądowy i informacyjny. Wydane zostały także prace o znacznie wyższym poziomie szczegółowości i pozwalające na porównanie warunków między różnymi krajami (Lund i Boyd 2015; Bertani 2015). Warunkiem wiarygodności informacji jest ujednoczenie kryteriów oceny analizowanych parametrów i sposobu prezentacji. Zestawienia takie są zawarte w artykułach publikowanych w cyklu pięcioletnim na Światowych Kongresach Geotermalnych o zasięgu światowym (Lund i Boyd 2015; Bertani 2015) oraz pracach przeglądowych o zasięgu europejskim (Hurter i Schellschmidt 2003; Fridleifsson i Freeston 1994; Hurter i Heanel 2002). Przykład prezentacji wyników w makroregionalnej skali rozpoznania przedstawiono na rysunku 3.1.

Cechą zasadniczą tych pozycji jest to, że wykorzystano w nich dane opisujące sytuację i warunki geotermalne poszczególnych państw, opracowane przez autorów danego kraju. Z jednej strony jest to pozytywne, że prace analityczne wykonali eksperci krajowi, z drugiej zestawienie takich wyników jest ryzykowne z uwagi na to, że dane nie zostały wystarczająco zweryfikowane poprzez zastosowanie ujednoczonych kryteriów.

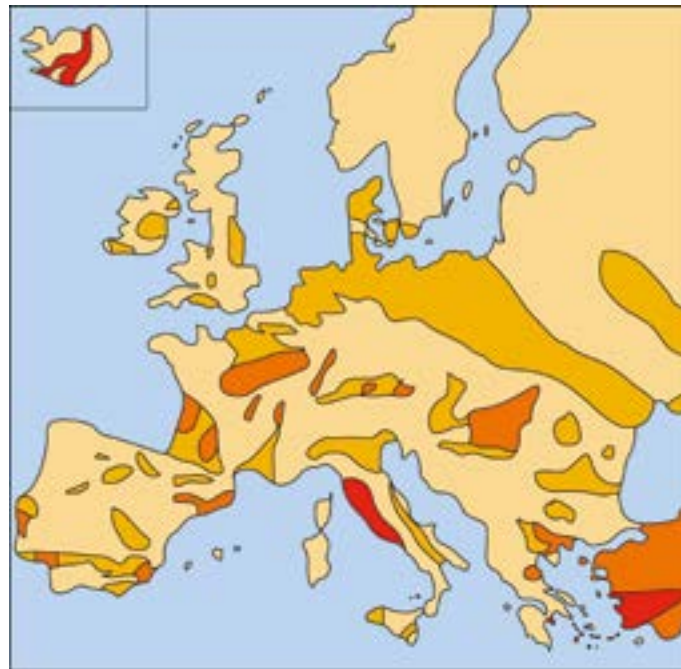
Przykład przedstawiony na rysunku 3.2 pochodzi ze strony EGEC (European Geothermal Energy Council) ma charakter obrazu okładkowego, gdzie można się domyślać, że intensywność koloru oznacza obszar korzystniejszych warunków geotermalnych. Wysuwanie na tej podstawie wniosków, że np. Polska posiada jedno z największych zasobów energii geotermalnej w Europie jest nieuzasadnione.

Jakkolwiek oceniając rozpoznanie tej skali, jest ono przydatne we wszelkiego typu prezentacjach mówiących w sposób ogólny o potencjale geotermalnym poszczególnych krajów.



Rys. 3.1. Rozkład temperatury na głębokości 1000 m w Europie (Hurter i Schellschmidt 2003)

Fig. 3.1. Temperature distribution at 1000 m depth in Europe (Hurter and Schellschmidt 2003)



Rys. 3.2. Warunki geotermalne w Europie (www.egec.info/publications)

Fig. 3.2. Geothermal conditions in Europe (www.egec.info/publications)

4. Rozpoznanie w skali krajowej

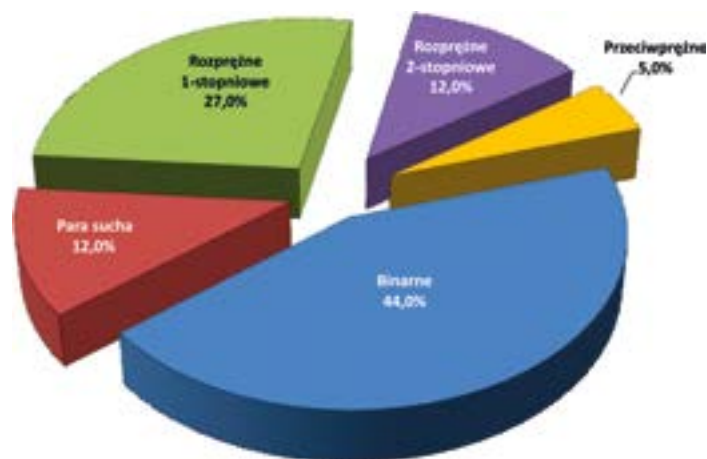
Ten typ rozpoznania warunków hydrogeotermalnych jest stosowany dla konkretnego kraju. Wynikiem prac dotyczących rozpoznania w skali kraju jest zestaw specjalistycznych map z opisami z zachowaniem formy atlasu. W wielu krajach ten typ formy informacji naukowej jest bardzo podobny jak np. w opracowaniu Franko O., Remšik A., Fendek M. red. (1995) czy Gordienko V.V., Gordienko I.V. red. (2004). Dla obszaru Polski opracowane zostały w tej tematyce specjalistyczne atlasy pod kierownictwem prof. W. Góreckiego. Opracowano zestaw atlasów przedstawiających warunki hydrogeotermalne panujące na Niżu Polskim (Górecki red. 1990, 1995, 2006a, 2006b). Ta grupa atlasów odpowiada rozpoznaniu w skali krajowej i prezentowany mapami obszar obejmuje cały kraj, a część opisowa zawiera informacje dotyczące całego kraju. Oprócz najistotniejszej części zawierającej zestaw map poszczególnych zbiorników wód geotermalnych w atlasach tych znajdują się wyniki badań dotyczących krajowego wykorzystania energii geotermalnej (Bujakowski i in. 2006; Bujakowski i in. 2011), funkcjonujących zakładów geotermalnych (Bujakowski i in. 2006) oraz informacje opisujące problemy zatłaczania wykorzystywanych wód geotermalnych do górotworu (Bujakowski i in. 2006; Bujakowski i Kępińska 2006; Górecki i in. 2011; Barbacki i in. 2013). Prace te stanowią kluczowy zestaw danych rozpoznania geotermicznego w skali kraju zawierając syntezę rozpoznania geologicznego, hydrogeologicznego i geofizycznego głównych jednostek geologicznych tzw. prowincji geotermalnych Polski, także w aspekcie możliwości wykorzystania zasobów wód geotermalnych do celów ciepłowniczych. Materiały te różnią się zarówno formą prezentacji, jak i zawartością wyrażającą się znacznie większym zakresem parametrów w stosunku do pierwszych tego typu opracowań wykonanych dla tej skali rozpoznania (Ney i Sokołowski 1987). Poziom szczegółowości przedstawianych informacji jest adekwatny dla krajowej skali rozpoznania przedstawianej zwykle na formacie graficznym arkusza A3 lub mniejszym. Zastosowana skala map rzędu 1 : 2 500 000 umożliwia ukazanie jedynie głównych form regionalnych geologicznych, trendów i ewentualnych lokalnych anomalii. Opracowania takie mają istotną wartość przy opracowaniu wstępnych opinii i ekspertyz oraz są pomocne przy określaniu zakresu obszaru badań i ilości informacji geologicznej dla dalszych bardziej szczegółowych analiz.

Rozpoznanie w skali kraju wykorzystane było również w przypadku analiz krajowych warunków geotermicznych np. rozkładu temperatury na różnych głębokościach i strumienia ciepłego w Polsce (Plewa 1966, 1994a, b; Szewczyk 2010).

Innym przykładem krajowego rozpoznania regionalnego jest „Atlas wykorzystania wód geotermalnych do skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepłej w układach binarnych w Polsce” (Bujakowski i Tomaszewska red. 2014). Opracowanie zrealizowane zostało na zamówienie Ministerstwa Środowiska za środki finansowe Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Prace realizowało konsorcjum trzech specjalistycznych jednostek naukowych, tj. IGSMiE PAN (lider konsorcjum), AGH oraz PIG-PIB Oddział Karpacki, przy współpracy ze specjalistami z Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego ze Szczecina, Politechniki Wrocławskiej, Politechniki Lubelskiej, Geofizyki Kraków oraz Instytutu Nafty i Gazu z Krakowa. Podstawowym celem badań była analiza polskich warunków hydrogeotermalnych w kontekście konwersji energii wód geotermalnych w energię elektryczną i ciepłą oraz wskazanie sposobu efektywnego wdrożenia technologii binarnych, coraz powszechniej stosowanych w instalacjach geotermalnych. W Polsce powstała dotychczas jedynie prototypowa instalacja minisiłowni z ORC zasilana wodą ciepłowniczą o temperaturze rzędu 100°C uruchomiona w zespole prof. W. Nowaka z Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technicznego (Nowak i in. 2010; Borsukiewicz-Gozdur 2010).

Obecnie funkcjonują w świecie różne rozwiązania technologiczne instalacji elektrowni geotermalnych (wytwarzających energię elektryczną z energii geotermalnej). Ze względu na zasadę działania i parametry pracy dzielą się one na elektrownie: na parę suchą (temperatura płynu wynosi 180°C do >300°C), na parę mokrą z jedno- (temp. 200–260°C) i dwustopniowym (temp. 240–320°C) rozprężaniem oraz na binarne wykorzystujące czynnik pośredniczący (125–165°C) (Stachel 2013).

Według stanu na 2010 r. na całym świecie funkcjonuje 526 elektrowni geotermalnych wśród których jest 236 elektrowni binarnych, działających w systemie ORC i Kalina, co stanowi ponad 44% ilości zakładów geotermalnych wytwarzających energię elektryczną (rys. 4.1).



Rys. 4.1. Struktura jednostek generujących energię elektryczną z energii geotermalnej (wg Bertani 2010; Stachel 2013; Bujakowski i Tomaszewska red. 2014)

Fig. 4.1. Structure of the number of generation units depending on Power plant type (after Bertani 2010; Stachel 2013; Bujakowski and Tomaszewska ed. 2014)

Pozostałe 56% stanowią instalacje zasilane nośnikami energii o temperaturze ponad 150°C, tj. instalacje z turbiną przeciwprężną, rozprężne na parę mokrą i na parę suchą (rys. 4.1, Stachel 2013). Warto jednak odnotować, że pomimo tak dużej ilości instalacji binarnych ilość wytwarzanej z nich energii elektrycznej stanowi jedynie 9% w bilansie energii elektrycznej pozyskiwanej z energii geotermalnej (Stachel 2013).

Szczególnie intensywny rozwój wykorzystania technologii binarnych odnotowano ostatnio w Niemczech, gdzie na koniec 2012 roku całkowita moc zainstalowana w instalacjach binarnych wyniosła 12,1 MW_e (Ganz i in. 2013), a roczna produkcja energii elektrycznej osiągnęła 25,4 GWh. Temperatura wód złożowych wykorzystywanych w tej technologii oscylują wokół 100–120°C. Najniższa temperatura wykorzystywana w tego typu instalacjach w Chena Hot Springs na Alasce wynosi 74°C (tab. 4.1) (regułą jest, że im wyższa temperatura, tym wyższa efektywność energetyczna systemu binarnego).

Wstępna ocena warunków hydrogeotermalnych panujących w Polsce, określona na podstawie badań oraz istniejącej bogatej literatury (głównie atlasów zasobów geotermalnych), wskazywała na możliwość pozyskania wód złożowych o odpowiedniej temperaturze i skłoniła do rozpoczęcia badań dla oceny możliwości realizacji instalacji binarnych w naszym kraju. Na podstawie istniejących danych stwierdzono, że uzyskanie odpowiednich parametrów energetycznych jest możliwe w obrębie zbiornika liasowego i lokalnie pstręgo piaskowca Niżu Polski, jak również z utworów niecki podhalańskiej i na obszarze Sudetów.

Metodyka badawcza zrealizowanego tego projektu obejmowała:

- 1) ocenę krajowych warunków hydrogeotermalnych i wykazanie możliwości uzyskania w Polsce parametrów wód geotermalnych wymaganych dla układów binarnych,
- 2) wytypowanie stref perspektywicznych dla skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepłej przy zastosowaniu układów binarnych,
- 3) wykonanie oceny wielkości produkcji energii i dostępnych mocy z wykorzystaniem modeli numerycznych pracy złoża,
- 4) rozpoznanie potencjalnych użytkowników/odbiorców energii, wraz z określeniem występujących parametrów cieplowniczych: istniejących źródeł ciepła, odbiorców ciepła oraz systemów dystrybucji energii,
- 5) dokonanie oceny przewidywanych efektów: finansowych, energetycznych, ekologicznych i społecznych w wyniku realizacji wytypowanych przedsięwzięć.

W pierwszym etapie prac analizie poddano informacje zawarte w dokumentacjach i kartach otworowych odwiertów zlokalizowanych w wytypowanych strefach. Dla potrzeb realizacji pracy pozyskano z Narodowego Archiwum Geologicznego w Warszawie podstawowe informacje o ponad 2000 otworach, których głębokość przekraczała 2500 m p.p.t. Spośród uzyskanych danych wytypowano blisko 140 otworów dokumentujących warunki hydrogeotermalne niecki mogileńsko-łódzkiej, niecki szczecińskiej, niecki podhalańskiej i rejonu Sudetów. Dane otworowe poddano szczegółowej analizie uwzględniającej: warunki hydrogeotermalne wytypowanych rejonów badań, stan techniczny odwiertów (w aspekcie rozpoznania możliwości udostępnienia wybranych otworów i/lub ich rekonstrukcji dla potrzeb jego wykorzystania w systemie binarnym), jak również położenie otworu względem

Tabela 4.1

Wybrane elektrownie geotermalne ORC i Kaliny zasilane wodą o niskiej entalpii (wg Pająk, Bujakowski 2013; Bujakowski, Tomaszewska red. 2014)

Table 4.1

Selected ORC and Kalina geothermal plants fed with low enthalpy water (after Pająk, Bujakowski 2013; Bujakowski, Tomaszewska ed. 2014)

Parametr	Lokalizacja elektrowni						
	Altheim	Bad-Blumau	Husavik	Neustadt-Glewe*	Underhaching	Chena Hot Springs, Alaska	Bruchsal
	Niemcy	Austria	Islandia	Niemcy	Niemcy	USA	Niemcy
Temperatura wody geotermalnej na wlocie do instalacji binarnej [°C]	106	110	121	98	120	74	122
Strumień plynu geotermalnego, [kg/s]	81,7	80,0	95,0	30,6	150,0	32,0	25,0
Moc elektryczna (b – brutto, n – netto, i – zainstalowana) [kW]	1 000 (i) 500 (n)	250 (i) 180 (n)	1 823 (i) 1 700 (n)	210 (b)	3 360 (n)	200 (i)	500 (i)
Moc cieplna [MW]	9	~5	44	6	40	?	5,5
Stosowana technologia	ORC	ORC	Kalina	ORC	Kalina	ORC	Kalina
Rodzaj niskotemperaturowego źródła energii	woda z górskiego potoku	chłodnie wentylatorowe	woda z górskiego potoku	chłodnie wentylatorowe	chłodnie wentylatorowe	woda z rzeki	chłodnie wentylatorowe
Temperatura niskotemperaturowego źródła energii [°C]	10 (podgrzewana do 18°C)	~10	4	~10	~10	4	~10

* Turbina została w 2012 r. zdemontowana (Ganz i in. 2013).

większych miejscowości – potencjalnych odbiorców energii cieplnej również uzyskiwanej z instalacji binarnej. Na rysunku 4.2 zaprezentowano zbiorczą mapę lokalizacji obszarów spełniających wymagania temperaturowe dla systemu binarnego na Niziu Polskim, w Karpatach i Sudetach wraz z lokalizacją analizowanych odwiertów.

Następnym krokiem było wykonanie badań poszerzających dotychczasowe rozpoznanie geologiczne i geofizyczne wytypowanych stref, w tym m.in. *reprocessing* geofizyki powierzchniowej, archiwalnych danych sejsmicznych wykonanych wcześniej dla potrzeb naftowych i danych geofizyki wiertniczej. W atlasie będącym finalnym etapem badań zawarto informacje uzyskane po reinterpretacji archiwalnych danych geofizycznych dla rejonów: Skierniewice-Łowicz, rejon Kompina (2006 i 2007); Turek, Wartkowice-Poddębice i Koło-Ponętów (2013). Dane pochodzące z dokumentacji geologicznych i hydrogeologicznych złożowych otworów z tych rejonów posłużyły do wytypowania i pobrania około 5 mb próbek skalnych z rdzeni wiertniczych. Do badań wytypowano:

- 10 próbek reprezentujących utwory jury dolnej z otworów: Banachów IG-1, Koło IG-3 i Koło IG-4, Poddębice PIG-2 i Damasławek 22,
- 8 próbek reprezentujących utwory triasu dolnego z otworów: Września IG-1, Florentyna IG-2, Piotrków Trybunalski IG-1,
- 3 próbki z otworu Biały Dunajec PAN-1,
- 1 próbkę skalną z zakładu górniczego w Szklarskiej Porębie – Huta.

Na wytypowanych próbkach przeprowadzone zostały badania mineralogiczno-petrograficzne i petrofizyczne materiału skalnego pod kątem oceny porowatości i przepuszczalności oraz oceny właściwości cieplnych. Wszystkie wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz ich metodyka opisane zostały w rozdziałach atlasu (Bujakowski i Tomaszewska red. 2014).

Kluczowymi kryteriami, którymi kierowano się dokonując wskazania w obrębie analizowanych obszarów (Niz Polski, Karpaty i Sudety – rys. 4.2) 10 stref perspektywicznych dla skojarzonej produkcji energii elektrycznej i cieplnej przy zastosowaniu układów binarnych były:

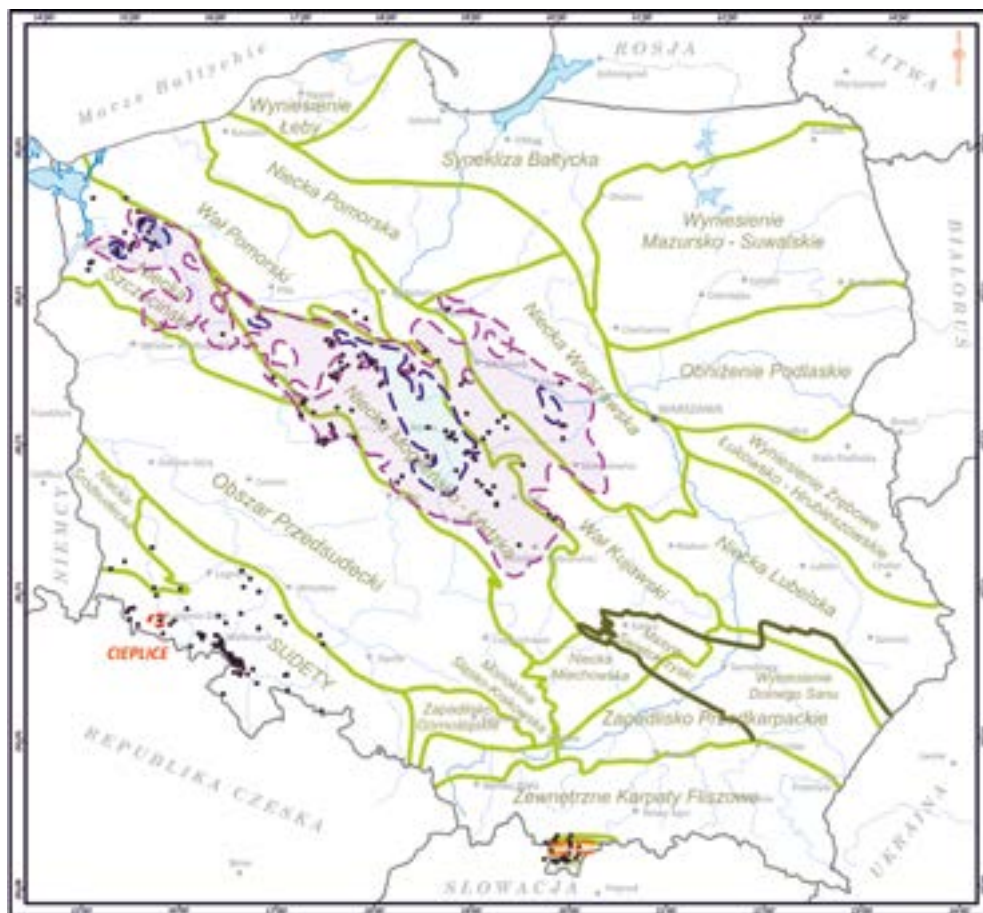
- charakterystyka hydrogeotermalna badanych struktur geologicznych,
- stopień rozpoznania geologicznego z dostępnością i jakością informacji geologicznej,
- obecność potencjalnych odbiorców energii (rejony większych miast),
- lokalizacja starych otworów wiertniczych/poszukiwawczych w kontekście ich rekonstrukcji.

W efekcie na Niziu Polskim wytypowano 8 stref, z których 7 w aspekcie wykorzystania perspektywicznego zbiornika jury dolnej i 1 – zbiornika triasu dolnego.

Do pierwszej grupy lokalizacji ukierunkowanych na wykorzystanie zbiornika jury dolnej zaliczono strefy położone na obszarze:

- niecki mogileńsko-lódzkiej – rejon miejscowości: Koło, Turek, Ślesin, Żnin i Konin,
- niecki szczecińskiej – rejon miejscowości: Stargard Szczeciński i Chociwel.

W odniesieniu do zbiornika triasowego za strefę perspektywiczną uznano rejon miasta Łowicza, położonego w granicach niecki warszawskiej.



LEGENDA:
LEGEND:

Granica obszaru perspektywnego
Boundary of the perspective area

- Jury dolnej (niecka mogiłańsko-lódzka)
Lower Jurassic (Mogiłańsko-Lódz Trough)
- Jury dolnej (niecka szczecińska)
Lower Jurassic (Mogiłańsko-Lódz Trough)
- Triasu dolnego
Lower Triassic
- Niecki podhalańskiej
Podhale Basin
- Sudetów
Sudetes Mountains
- Granice jednostek strukturalnych
Boundaries of the structural units

- Otwory
Boreholes
- Rzeki
Rivers
- Zbiorniki wodne
Water reservoirs
- Miejscowości
Cities
- Granica państwa
National border
- Linia brzegowa
Shoreline

Rys. 4.2. Mapa lokalizacji odwiertów i obszarów perspektywnych dla technologii binarnej (Bujakowski i Tomaszewska red. 2014)

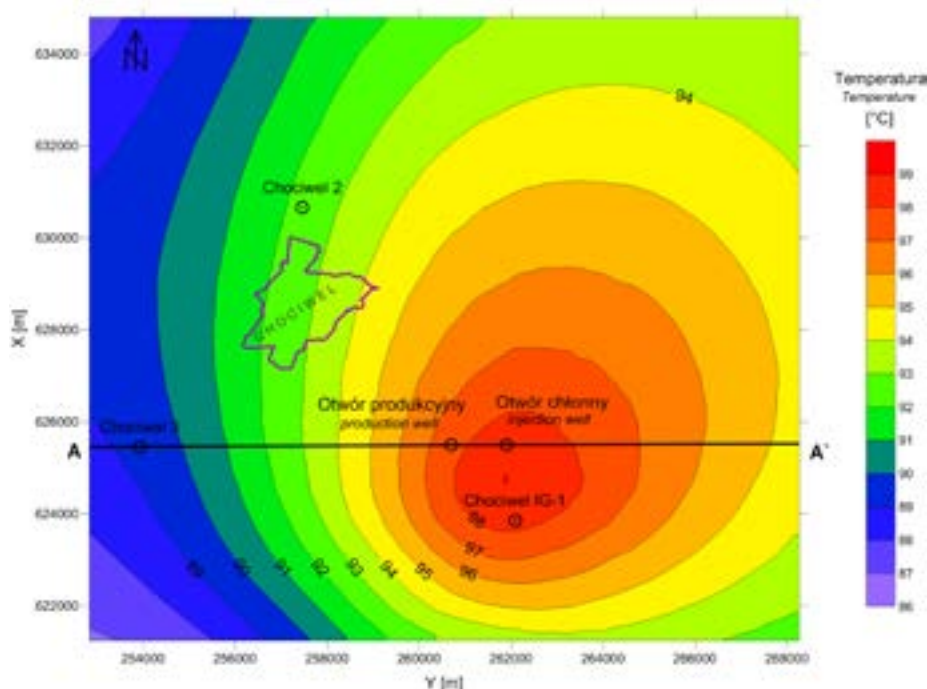
Fig. 4.2. Location map of boreholes and perspective areas (Bujakowski and Tomaszewska ed. 2014)

Na obszarze Karpat wewnętrznych, najlepsze warunki geotermalne dla systemów binarnych (wydajność, temperatura) występują w północnej części niecki podhalańskiej i tutaj, z uwagi na istniejącą infrastrukturę geotermalną wytypowano strefę Bańskiej Niziny.

W Sudetach potencjalne wykorzystanie energii geotermalnej w systemach binarnych wskazano w strefie plutonu karkonoskiego i strefie Cieplic Śląskich – Zdrój.

Dla każdej z dziesięciu stref perspektywicznych opracowano model lokalnych warunków geologicznych dla konstrukcji modelu numerycznego symulującego warunki pracy potencjalnego systemu binarnego. Arbitralnie przyjęta powierzchnia każdej strefy perspektywicznej wynosiła około 150 km², obejmując wytypowaną miejscowość, rejon optymalnych lokalnych warunków hydrogeotermalnych dla lokalizacji ujęć otworowych oraz kluczowe, do analizy i/lub rekonstrukcji, otwory wiertnicze. Przykład mapy temperatury w strefie prognostycznej rejonu Chociwła (jura dolna niecki mogileńsko-łódzkiej – rys. 4.2) przedstawia rysunek 4.3.

W kolejnym kroku dla każdej wytypowanej strefy opracowano koncepcyjny model geologiczny, który prezentował zasięg występowania i głębokość zalegania perspektywicznych zbiorników hydrogeotermalnych oraz niżej i wyżej zalegających struktur geologicznych. Na podstawie analizy uzyskanych dostępnych materiałów publikowanych i archiwalnych,

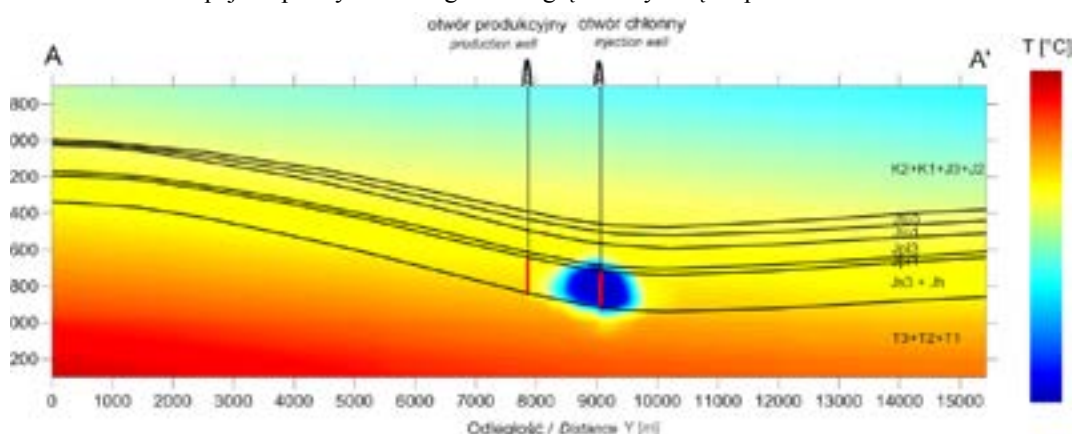


Rys. 4.3. Prognozowana temperatura spągu jury dolnej w warunkach stacjonarnych strefy geotermalnej Chociwła (Bujakowski i Tomaszewska red. 2014)

Fig. 4.3. Forecasted temperature distribution in the Chociwel area in the bottom of the lower Jurassic structures (Bujakowski and Tomaszewska ed. 2014)

jak również wyników badań w zakresie oceny mineralogiczno-petrograficznej i petrofizycznej skał oraz reinterpretacji archiwalnych danych sejsmicznych, wykonano mapy ukształtowania stropu wytypowanych zbiorników oraz przekroje geologiczne z oszacowanymi miąższościami utworów skalnych. Rozpoznane parametry hydrogeotermalne oraz dane litostratygraficzne stanowiły podstawę dla opracowania numerycznych modeli przestrzennych.

Podstawowym narzędziem do analizy systemu wodonośnego były badania modelowe prowadzone z wykorzystaniem powszechnie stosowanych i ciągle rozbudowywanych pakietów programów obliczeniowych wykorzystywanych zarówno w modelowaniu procesów filtracji, jak i transportu masy i ciepła w wodach podziemnych. Modele numeryczne zastosowano w celu opracowania ilościowej charakterystyki parametrów złoża w trakcie eksploatacji oraz w celu prognozowania ich zmian w czasie eksploatacji złoża. Celem analizy było między innymi określenie warunków eksploatacji zapewniającej stabilność pracy systemu geotermalnego w długim okresie czasu (rys. 4.4). Każda ze stref lokalizowana była, jak wcześniej wspomniano, w rejonie miast, które spełniałyby warunki energetyczne i techniczne dla konsumpcji współwytworzanego z energią elektryczną ciepła.

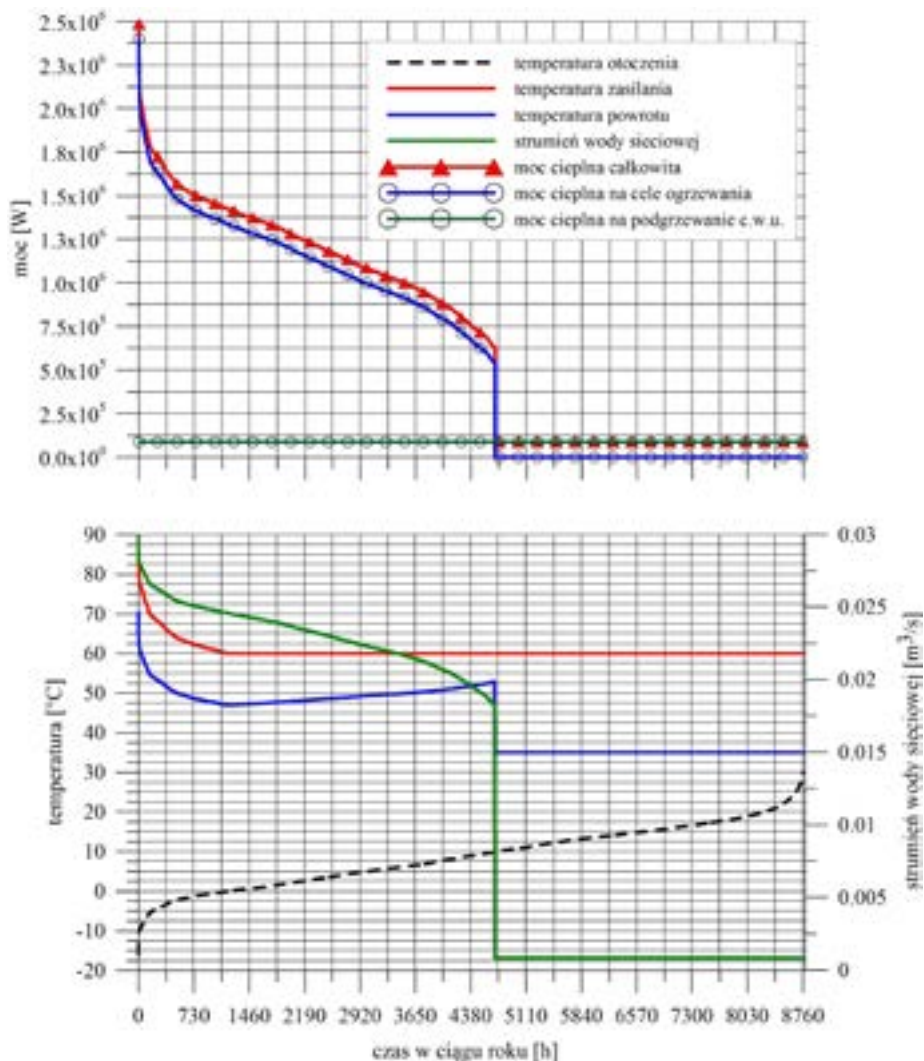


Rys. 4.4. Temperatura złożowa po 50 latach eksploatacji – strefa Chociwła (Bujakowski i Tomaszewska red. 2014)

Fig. 4.4 Forecasted temperature distribution after 50 years of operations – Chociwel area (Bujakowski and Tomaszewska ed. 2014)

Sieci miejskie wybranego obszaru badawczego poddane zostały ocenie w zakresie obecności potencjalnych użytkowników/odbiorców energii, wraz z określeniem występujących parametrów ciepłowniczych: istniejących źródeł ciepła, odbiorców ciepła oraz systemów dystrybucji energii. Na tej podstawie sporządzone zostały krzywe mocy i parametrów cieplnych istniejącego źródła ciepła i jego odbiorców. Na rysunku 4.5 przedstawiono przykładowe wykresy parametrów cieplnych dla miasta Chociwel zlokalizowanego w strefie geotermalnej Chociwła (rys. 4.2 i 4.3).

Przy wykorzystaniu modeli numerycznych pracy złoża dla każdej z wytypowanych stref dokonano oceny produkcji energii i dostępnych mocy. Modele te określają wielkość pro-

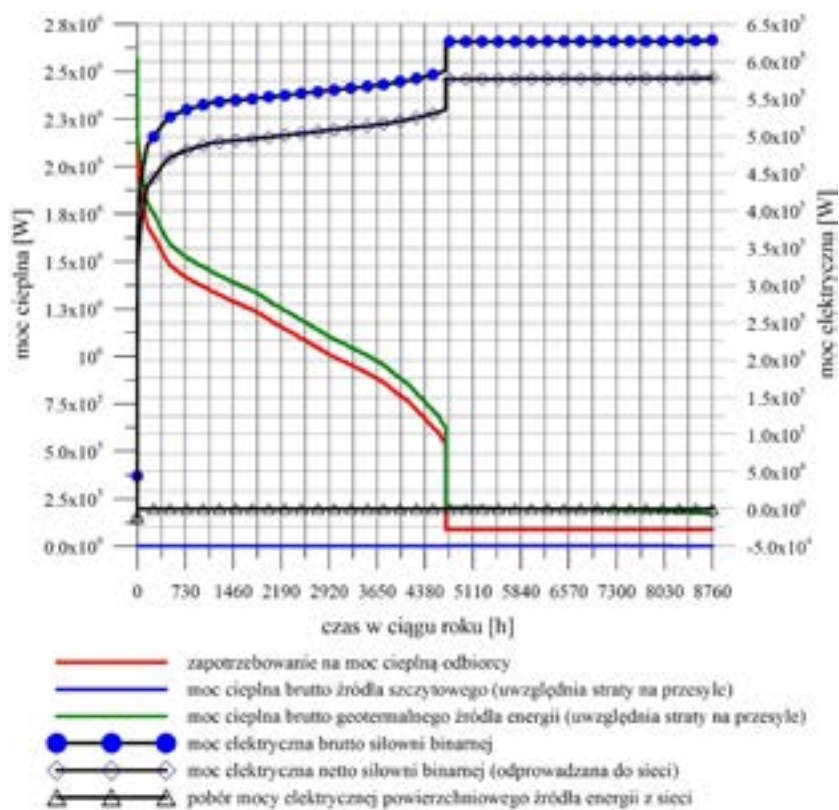


Rys. 4.5. Charakterystyka końcowego odbiorcy energii dla lokalizacji Chociwel (Bujakowski i Tomaszewska red. 2014)

Fig. 4.5. Energy end-user characteristic for Chociwel location (Bujakowski and Tomaszewska ed. 2014)

dukcji energii przy zachowaniu odnawialności naturalnych zasobów energii geotermalnej i określają wielkość energii elektrycznej netto (całkowita ilość energii pomniejszona o energię zużywaną na potrzeby własne zakładu energetycznego). Przykład wyników tej oceny dla strefy Chociwla przedstawiono na rysunku 4.6.

Kończym zadaniem analizy było dokonanie oceny przewidywanych efektów: finansowych, energetycznych, ekologicznych i społecznych, jakie zaistnieć mogą w wyniku realizacji wytypowanych przedsięwzięć we wszystkich analizowanych strefach. Wyniki tych ocen stref przedstawiono na wybranych diagramach blokowych (rys. 4.7 i 4.8).

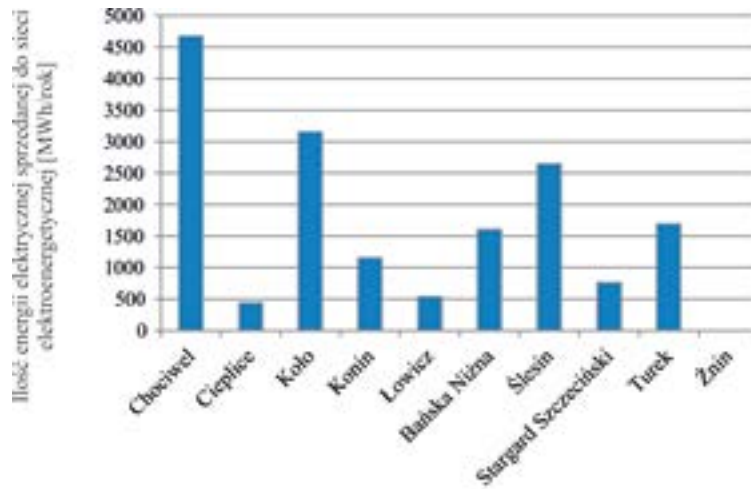


Rys. 4.6. Moc cieplna i elektryczna wytwarzana przez źródło energii dla lokalizacji Chociwel (Bujakowski i Tomaszewska red. 2014)

Fig. 4.6. Heat and electric Power generated by the energy source in Chociwel location (Bujakowski and Tomaszewska ed. 2014)

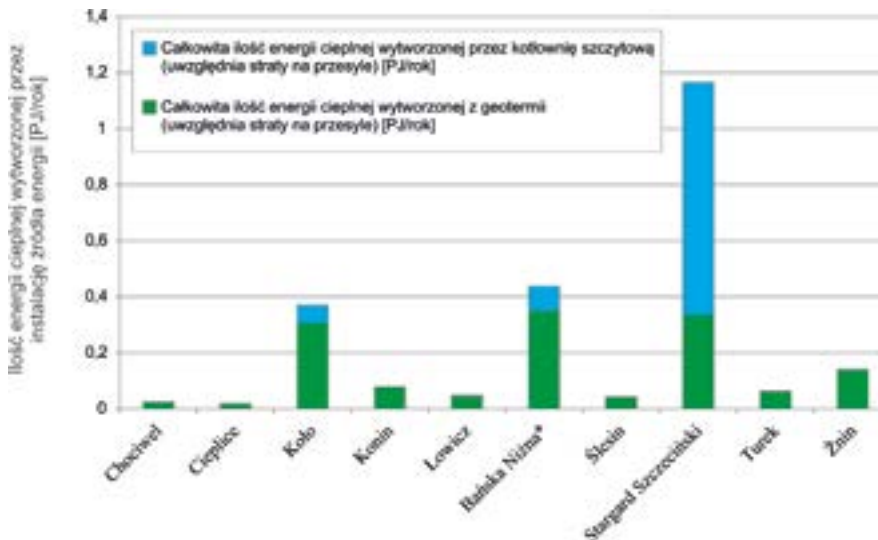
Na podstawie tych ocen opracowano pełną klasyfikację wszystkich 10 wytypowanych stref. Klasyfikacja ta ma wielokryterialny charakter. Za konieczny czynnik uznano możliwe do osiągnięcia parametry techniczne, ekonomiczne i ekologiczne, przy uwzględnieniu lokalnych uwarunkowań hydrogeotermalnych, ale również istniejącą/lub konieczną do wykonania infrastrukturę energetyczną. Zestawienie wszystkich stref poddanych tej analizie umożliwia wybór najlepszej lokalizacji (tab. 4.2).

Nadrzędnym celem uruchomienia instalacji binarnej zasilanej wodami geotermalnymi jest wytwarzanie energii elektrycznej ze źródła o charakterze odnawialnym o maksymalnej mocy. Uwzględniając potencjalne moce elektrowni binarnych najlepszych efektów energetycznych, ekonomicznych i ekologicznych spośród analizowanych lokalizacji spodziewać się można dla stref: Koło, Chociwel, Ślesin, Turek i Bańska Niżna. Jednym z kluczowych kryteriów, którymi kierowano się dokonując wskazania stref perspektywicznych dla skojarzonej produkcji energii elektrycznej i cieplnej, była również obecność potencjalnych



Rys. 4.7. Prognoza ilości energii elektrycznej netto wytworzonej w systemie binarnym i sprzedanej do sieci zawodowej (Bujakowski i Tomaszewska red. 2014)

Fig. 4.7. Forecast of the electric energy volume (netto) generated In the binary system and supplied to the power grid (Bujakowski and Tomaszewska ed. 2014)



Rys. 4.8. Prognoza ilości energii cieplnej wytworzonej z geotermalnego i szczytowego źródła energii (energia cieplna brutto = energia zużyta przez odbiorcę + straty ciepła na przesył) [GJ/rok] (Bujakowski i Tomaszewska red. 2014)

Fig. 4.8. Forecast of the hitting energy generated by the geothermal and pitch energy sources (gross heating energy=energy utilized by the end user + heat losses in transfer [GJ/year] (Bujakowski and Tomaszewska ed. 2014)

Tabela. 4.2

Klasyfikacja analizowanych stref według oceny wielokryterialnej
(Bujakowski i Tomaszewska red. 2014)

Table. 4.2

Classification of the analysed locations based on multi-criteria evaluation
(Bujakowski and Tomaszewska ed. 2014)

Kryterium/strefa	Chociwel	Cieplice Śląskie-Zdrój	Koło	Konin	Łowicz	Bańska Nizna	Ślesin	Stargard Szczeciński	Turek	Żnin	Waga
Cena energii ciepłej gwarantująca rentowność inwestycji	0	2	3	2	1	3	0	2	1	1	0,1
Poziom wymaganych nakładów inwestycyjnych	2	3	0	2	2	3	1	0	1	0	0,2
Ilość energii elektrycznej netto wytworzonej przez system binarny	3	1	2	1	1	1	2	1	1	0	0,4
Ilość wytwarzanej energii ciepłej i udział energii geotermalnej w ogólnej ilości energii ciepłej	1	1	3	2	2	3	2	3	2	2	0,2
Osiągnięty efekt ekologiczny	0	0	2	1	0	2	1	3	1	0	0,1
Ocena lokalizacji	1,8	1,4	1,9	1,5	1,3	2,1	1,5	1,5	1,2	0,5	

odbiorców energii (rejonny większych miast). Ten czynnik ma szczególne znaczenie, gdyż w systemach binarnych, poza generacją prądu, wytwarzane są duże ilości ciepła (znacznie większe niż wielkość energii elektrycznej) (Stachel 2013). Celowe zatem było również dokonanie oceny potencjalnych stref w kontekście ilości energii ciepłej możliwej do wytworzenia i zagospodarowania w każdej lokalizacji. Należy pamiętać, że w polskich uwarunkowaniach geologiczno-złożowych, z uwagi na wysokotemperaturową specyfikę istniejących sieci ciepłowniczych, każda instalacja ciepłownicza bazująca na energii geotermalnej winna być wyposażona w szczytowe źródło zasilania. Uwzględniając prognozowany udział energii geotermalnej w całkowitej ilości wymaganej energii ciepłej analizowane strefy uszeregowano w następującej kolejności: Stargard Szczeciński, Bańska Nizna, Koło, Żnin, Konin, Turek.

Osiągane efekty ekologiczne, zdefiniowane jako redukcja emisji zanieczyszczeń w stosunku do wariantu zakładającego wytworzenie energii ciepłej i elektrycznej w instalacji bazującej na węglu, w dużym stopniu odzwierciedlają osiągnięte efekty energetyczne. Wy-

konane oceny efektów ekologicznych umożliwiły stwierdzenie, że w tym kontekście najbardziej korzystne są lokalizacje: Stargard Szczeciński, Bańska Nizna, Koło oraz Konin, Ślesin, Turek.

Wyniki badań wskazały, że najbardziej perspektywiczną i atrakcyjną lokalizacją jest strefa Bańskiej Niznej (rejon Podhala). Głównym jej atutem są dobre parametry zbiornikowe, a w szczególności wysoka wydajność ujęć geotermalnych. Wody geotermalne występujące w obrębie struktur geologicznych niecki podhalańskiej cechują się bardzo niską mineralizacją, co z technicznego punktu widzenia powinno minimalizować ryzyko pojawienia się problemów technicznych związanych z wytrącaniem osadów w instalacji. Zbiornik podhalański jest od wielu lat eksploatowany w celach ciepłowniczych, można zatem uznać, że niewielkie jest ryzyko pojawienia się problemów trudnych do przewidzenia na etapie projektowania i uruchamiania instalacji binarnych. Niezaprzeczalnym atutem Bańskiej Niznej, jako miejsca dla pilotowego uruchomienia geotermalnej siłowni binarnej, jest istnienie infrastruktury geotermalnego źródła energii i sieci dystrybucji energii cieplnej, poprzez co istnieje możliwość zbycia znaczących ilości energii cieplnej.

Przedstawione, interdyscyplinarne przedsięwzięcie naukowo-techniczne, stanowi istotny i nowatorski wkład do badań nad rozwojem energetyki odnawialnej, bazującej na wodach geotermalnych naszego kraju.

Przedstawiony w atlasie (Bujakowski i Tomaszewska red. 2014) materiał badawczy mający charakter rozpoznania w skali krajowej stref optymalnych dla realizacji geotermalnych elektrowni binarnych jest wystarczający do podjęcia kolejnych kroków zmierzających do uruchomienia w Polsce instalacji binarnej wykorzystującej wody geotermalne. W aktualnej sytuacji byłaby to pierwsza komercyjna instalacja wytwarzająca energię elektryczną z energii geotermalnej.

5. Rozpoznanie w skali regionalnej

Rozpoznanie warunków hydrogeotermalnych w skali regionalnej umożliwia określenie potencjalnych wartości mocy cieplnej i możliwej do pozyskania ilości energii pochodzących ze wskazanych horyzontów wodonośnych udostępnionych pojedynczym ujęciem otworowym. Rozpoznanie takie ma duże znaczenie dla skutecznego wdrożenia przedsięwzięć, gdyż jest dedykowane do samorządowych władz danego obszaru kraju. Stanowi także podstawową informację dla jednostek samorządowych – województw i powiatów. Do grupy opracowań zawierających informacje w tej skali rozpoznania można przykładowo zaliczyć prace dotyczące obszarów: Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (Karwasiecka 1996; Sonik-Heliasz red. 2009); regionu dolnośląskiego (Dowgiałło 1976, 2002 i 2007; Dowgiałło i Fistek 2007; Ciężkowski 2007; Ciężkowski i in. 2011), Karpat (Górecki red. 2011, 2013); Długosz i Nagy 1996; Nagy i in. 1999), zapadliska przedkarpackiego (Górecki red. 2012) oraz wykonane w IGSMiE PAN pod kierunkiem autora: dla województwa małopolskiego (Bujakowski, Barbacki i Pająk 2003; Barbacki, Bujakowski i Pająk 2006), dla województwa śląskiego (Bujakowski i in. 2005), powiatu piotrkowskiego (Bujakowski red. 2014) i niepublikowane dla województw: podkarpackiego (Barbacki i in. 2014), kieleckiego (Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego 1997a) i krośnieńskiego (Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego 1996b) znajdujące się w archiwum IGSMiE PAN.

W skali naszego kraju tylko nieliczne województwa posiadają rozpoznanie warunków hydrogeotermalnych przedstawione w formie zwartych opracowań. Najpełniejsze opracowanie wyników badań posiada województwo małopolskie. Atlas zbiorników wód geotermalnych Małopolski (Barbacki, Bujakowski i Pająk 2006) jest podsumowaniem wieloletnich prac analitycznych prowadzonych w IGSMiE PAN pod kierunkiem autora i dr hab. inż. Antoniego P. Barbackiego (Barbacki 2002, 2004a i b; Bujakowski i Barbacki 2004; Barbacki i Bujakowski 2005; Bujakowski, Barbacki i Pająk 2003; Bujakowski 2015; Kępińska 1997; Kępińska i in. 1999; Kępińska i Łowczowska 2002). Potencjał geotermalny województwa małopolskiego był oczywiście przedmiotem licznych publikacji także wielu innych autorów, których zestawienie przedstawiono w bibliografii atlasu.

W atlasie dokonano rozpoznania zbiorników wód geotermalnych, które występują w obrębie jednostek geologicznych wykazujących specyficzne cechy strukturalne i litologiczne wynikające z kształtujących je procesów tektonicznych i sedymentacyjnych, tj. Karpat, zapadliska przedkarpackiego, niecki miechowskiej, monokliny śląsko-krakowskiej i zapadli-

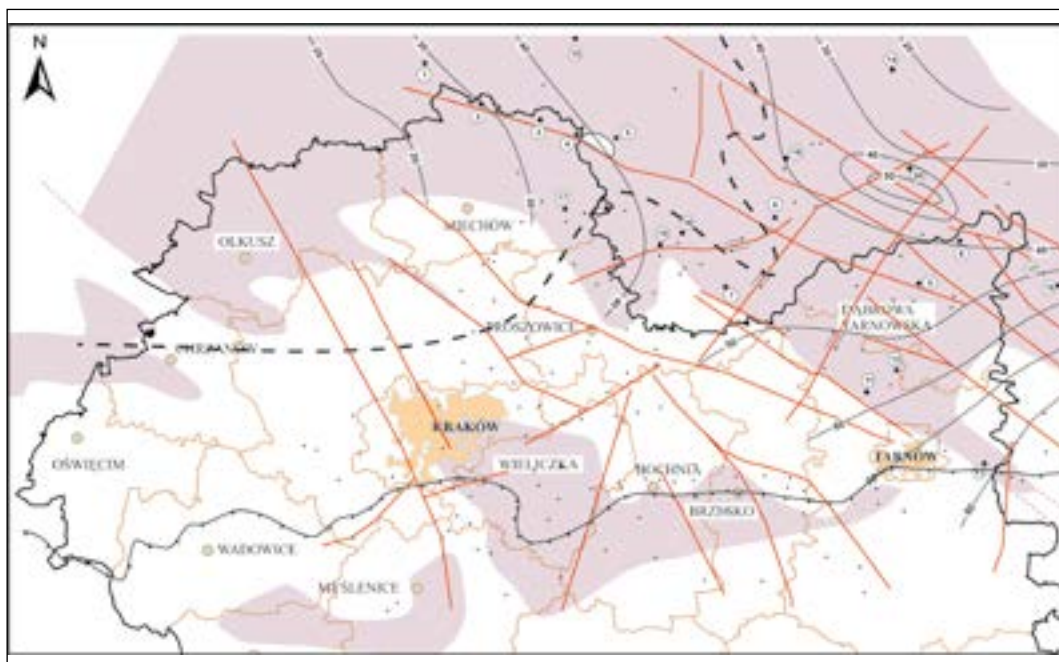
ska górnośląskiego. W wyżej wymienionych 5 jednostkach geologicznych podziemne wody geotermalne rozpoznano w zbiornikach usytuowanych w zróżnicowanych wiekowo utworach geologicznych.

Nawiązując do występujących tu pięter hydrogeologicznych analizie poddano następujące zbiorniki wód podziemnych Małopolski:

- zbiorniki paleozoiczne (z wyekspozowaniem dewońskiego),
- zbiornik triasowy (łącznie ze zbiornikiem triasowym Podhala),
- zbiornik doggerski (środkowojurajski),
- zbiornik górnójurajski,
- zbiornik górnokredowy (senoński i cenomański),
- zbiorniki paleogeńsko-mezozoiczne Karpat,
- zbiornik mioceński.

Zbiorniki poddano szczegółowym analizom hydrogeotermalnym, których wyniki przedstawiono w postaci zestawu map i tabel zestawiających najbardziej istotne dane.

Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki badań wykonane dla zbiornika triasowego (rys. 5.1). Dane otworowe zestawiono w postaci tabeli wybranych parametrów hydrogeotermalnych (tab. 5.1). Na tej podstawie scharakteryzowano potencjał energetyczny danej gminy (tab. 5.2).



Rys. 5.1. Mapa temperatur zbiornika triasowego w północnej części województwa małopolskiego (Barbacki, Bujakowski i Pająk 2006)

Fig. 5.1. Map of average temperature of groundwaters in the Triassic aquifer in N part of the malopolska voivodship (Barbacki, Bujakowski and Pająk 2006)

Tabela 5.1

Wybrane parametry hydrogeotermalne zbiornika triasowego na obszarze województwa małopolskiego (Barbacki, Bujakowski i Pająk 2006)

Table 5.1

Selected hydrogeothermal parameters of the Triassic aquifer in the małopolska voivodship (Barbacki, Bujakowski and Pająk 2006)

Nr otworu według rys. 5.1	Nazwa otworu	Poziom stratygraficzny i opróbowany interwał [m p.p.t.]	Temperatura wód [°C]	Wielkość przyplywu [m ³ /h]	Mineralizacja [g/l]	Parametry zbiornikowe	
						porowatość średnia [%]	przepuszczalność średnia [mD]
1	Węgrzynów IG-1	retyk (934–940)	30	1,74*	1,36	8,0	27,0
2	Uniejów 3	retyk (899–985)	30**	0,1*	14,5	–	–
		wapień muszl. (1001–1006)	32**	0,4*	10,3	–	–
3	Książ Wielki IG-1	retyk (965–975)	31**	3,0*	26,0	2,0	–
		wapień muszl. (1073–1092)	33**	2,4*	14,0	4,5	40,0
4	Tizonów 2	wapień muszl. (1153–1185)	38	(*)	6,4–11,7	–	–
5	Lipówka 1	ret (1203–1225)	39	0,2*	10,9	–	–
6	Ostrów 1	ret (1400)	43**	9,0	13,0	–	–
7	Dobiesławice 1	kajper (1548–1560)	44**	3,6*	~60,0	20,0 (maks.)	–
8	Zalesie 1	pstry piaskowiec (1617–1800)	45**	~10,0*	40,0	15,0 (maks.)	–
9	Smęgorzów 3a	pstry piaskowiec (1353)	40**	(*)	~100,0	–	–
10	Podborze 10	ret (1535–1545)	47**	(*)	~100,0	~2,0	–
11	Radłów 1	pstry piaskowiec (2220–2230)	60**	(*)	~130,0	22,0	~300,0
12	Pawężów 3	pstry piaskowiec (2193–2240)	60**	(*)	~100,0	3,5	–
13	Pogórska Wola 8	pstry piaskowiec (1927–1980)	55	10,0	~120,0	15,0	51,0
14	Żerniki 1	pstry piaskowiec (2885–2910)	80**	solanka	177,0	–	–
		kajper? (500)	25	?	108,0	–	–

* Samowypływy.

** Temperatury oszacowane.

Tabela 5.2
Energetyczna charakterystyka stref geotermalnych zbiornika triasowego północnej części województwa małopolskiego (Barbaćki, Bujakowski i Pająk 2006)

Table 5.2
The energy characteristics of the geothermal zones of the Triassic aquifer in the małopolska voivodship (Bujakowski, Barbaćki and Pająk 2003)

Lokalizacja stref	Szacowana wydajność [m ³ /h]	Szacowana temp. wypływu [°C]	Warunki hydrogeologiczne	Głębokość poziomu [m]	Jakość wód (solanka – woda słodka)	Moc cieplna [kW] przy schłodzeniu wód do		Zasoby dyspozycyjne energii cieplnej [GJ/rok]	
						25°C	10°C	min.	maks.
Kozłów	60	31	artezyjskie	950	solanka	419	1 467	3 449	18 501
Książ Wielki	60	32	artezyjskie	1 100	solanka	489	1 536	4 024	19 382
Niedomice	50	55	subartezyjskie	1 950	solanka	1 746	2 619	14 371	33 037
Radłów	50	60	artezyjskie	2 000	solanka	2 037	2 910	16 766	36 708
Skrzyszów	50	95	subartezyjskie	2 900	solanka	4 074	4 947	33 533	62 403
Smęgorzów	50	47	artezyjskie	1 550	solanka	1 280	2 153	10 539	27 164
Szczucin	50	40	artezyjskie	1 350	solanka	873	1 746	7 186	22 025
Trzonów – Słaboszów	50	38	artezyjskie	1 150	solanka	757	1 630	6 227	20 556

Podsumowaniem analiz, umożliwiającym szybkie zapoznanie się z warunkami hydrogeotermalnymi panującymi na obszarze gmin województwa, są zestawienia tabelaryczne (tab. 5.3) i mapa województwa (rys. 5.2) z zaznaczeniem rejonów, w których zarejestrowane były samowypływy wód geotermalnych lub też ich przyływy przekraczające wydajność 20 m³/godz.

Tabela 5.3

Zastawienie stref – gmin Małopolski ze stwierdzonymi przyływami wód geotermalnych o wartościach powyżej 20 m³/godz. lub z samowypływami wód geotermalnych (Barbacki, Bujakowski i Pająk 2006)

Table 5.3

Malopolska voivodship communes with geothermal water inflows above 20 m³/h or artesian water flows (Barbacki, Bujakowski and Pająk 2006)

Strefa – gmina	Stratygrafia zbiornika	Średnia temperatura złożowa [°C]	Średnia głębokość poziomu [m]	Średnia wartość przyływu [m ³ /h]
1	2	3	4	5
Bochnia	dewon	46	1 500	15*
	jura górna	35	1 170	1*
	cenoman	35	1 180	2*
	miocen	25	700	25
Biały Dunajec	jednostka regłowa (trias) + eocen	84	2 270	200*
Bolesław	jura górna	27	720	samowypływ
	senon	25	650	samowypływ
Borzęcin	senon	33	1 010	21
Brzesko	jura górna	60	1 900	1*
Bukowina Tatrzańska	jednostka regłowa (jura - kreda)	67	2 500	60
Dąbrowa Tarnowska	trias	47	1 540	samowypływ
	jura górna	28	900	samowypływ
	senon	25	660	samowypływ
Dębno	jura górna	54	2 000	9*
	cenoman	35	810	10*
Drwina	senon	22	500	samowypływ
	miocen	20	470	samowypływ
	miocen	24	740	samowypływ
Gdów	miocen	24	740	samowypływ
Kłaj	jura górna	34	810	0,3*
Koçmyrzów-Luborzycza	jura górna	22	380	30
Koszyce	cenoman	28	970	samowypływ
Koşcielisko	jednostka regłowa (trias)	82	3 400	190*
Kraków Wschód	dewon	40	1 400	samowypływ
	jura górna	30	850	25*
Książ Wielki	trias	35	1 080	5*
	jura środkowa	35	1 010	4*
	jura górna	31	750	0,2*

Tabela 5.3. cd.

Table 5.3. cont.

1	2	3	4	5
Lisia Góra	miocen	29	960	57
Mędrzechów	jura górna	25	630	samowypływ
Niedźwiedz	jednostka dukielska (kreda)	42	1 800	12*
Niepołomice	dewon	36	1 200	>3*
	dogger	31	790	13*
	cenoman	23	550	7*
Nowy Wiśnicz	senon	42	1 570	22
Pałacznica	jura górna	21	570	samowypływ
Poronin	jednostka regłowa (trias)	60	1 750	90*
Rabka	jednostka dukielska (kreda, paleocen)	28	1 180	5*
Raclawice	dewon	32	1 100	samowypływ
	jura środkowa	30	1 000	20*
Radłów	trias	60	2 200	samowypływ
Radogoszcz	miocen	20	620	22
Rzezawa	jura górna	40	1 340	samowypływ
	cenoman	35	1 150	70*
	miocen	23	500	24
Skrzyszów	trias	80	2 900	samowypływ
	jura górna	75	2 440	60*
	senon	68	2 130	30
	miocen	58	1 760	26
Słomniki	karbon	26	800	100 (?)
	jura środkowa	23	550	20
	jura górna	22	500	120* (?)
	cenoman	20	220	90*
Szaflary	jednostka regłowa (trias) + eocen	86	3 000	~ 500*
Szczucin	jura górna	30	850	samowypływ
	miocen	20	380	60
Szczurowa	cenoman	30	1 000	samowypływ
	senon	22	490	samowypływ
Tarnów	jura górna	55	1 700	samowypływ
Wawrzeńczyce	jura górna	25	660	120*
Zakopane	jednostka regłowa (jura, trias) + eocen	45	1 500	180*
Żabno	jura górna	53	1 820	samowypływ

* Wartość przypływu w warunkach samowypływu wód.



Rys. 5.2. Gminy z obszarami perspektywicznymi (na żółto) dla wykorzystania energii geotermalnej województwa malopolskiego (Barbacki, Bujakowski i Pająk 2006)

Fig. 5.2. Communes with perspective areas (yellow) for geothermal utilization in the malopolska voivodship (Barbacki, Bujakowski and Pająk 2006)

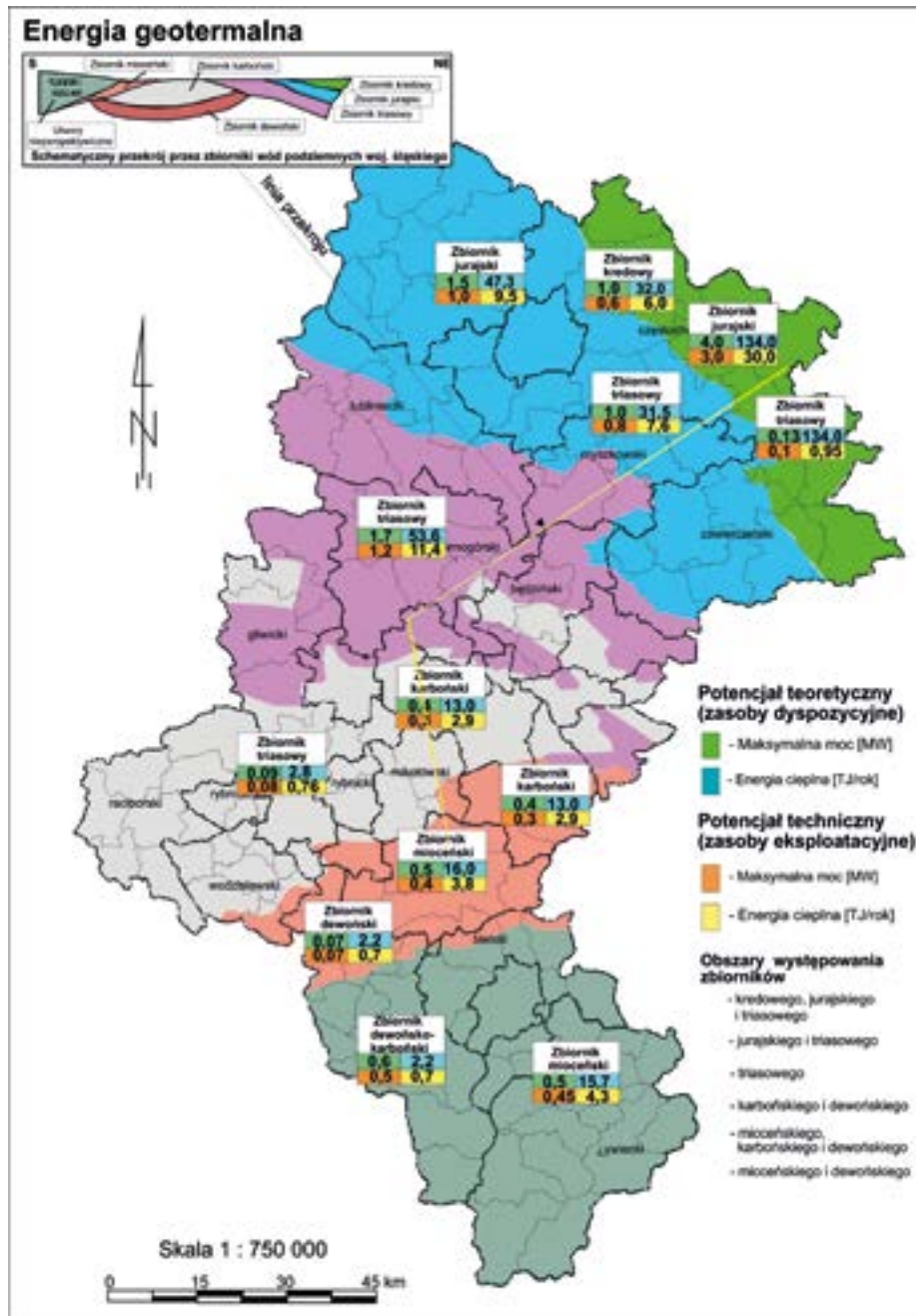
„Atlas zbiorników wód geotermalnych małopolski” (Barbacki, Bujakowski i Pająk 2006) jest opracowaniem ukierunkowanym na odbiorców komercyjnie zainteresowanych wykorzystaniem energii geotermalnej oraz skierowany jest do samorządowych władz (gminy i powiaty) umożliwiając opracowanie programu rozwoju i stworzenie oferty inwestycyjnej. Warto podkreślić, że prace badawcze dotyczące rozpoznania warunków geotermalnych Małopolski wykorzystane były w równoległe uruchamianych projektach w Bukowinie Tatrzańskiej, Białce, Słomnikach, Kościelisku oraz w rozbudowywanej instalacji w Szaflarach. Wyniki prac badawczych zaowocowały także rozpoczęciem prac wdrożeniowych dla wykorzystania potencjału geotermalnego w gminach Niedźwiedź i Kościelisko. Ponadto przyczyniły się do opracowania Projektów Robót Geologicznych dla: Krakowa Wschód i Wierzchosławic (strefa Tarnowa) oraz wykonaniem wstępnych ekspertyz dla m.in. Niepołomic, Radłowa, Gdowa i in. Dokumentacje te nie były publikowane i znajdują się w archiwum IGSMiE PAN (Dodatek – wybrane niepublikowane prace wykonane pod kierunkiem autora).

Inny przykład analiz w skali regionalnej dotyczących rozpoznania warunków geologiczno-geotermalnych zawiera praca wykonana dla władz samorządowych województwa śląskiego (Bujakowski red. 2005; Bujakowski 2005b). Obszar województwa obejmuje 5 regionalnych jednostek geologicznych: niecka miechowska (w północno-wschodniej części województwa w strefie występowania utworów kredy), monoklina śląsko-krakowska (w północnej i środkowej części województwa jako przedłużenie monokliny przedsudeckiej południowej, której zasięg wyznacza obszar występowania utworów jury i triasu), zapadlisko górnośląskie (na obszarze występowania utworów karbonu górnego), zapadlisko przedkarpackie (którego północną granicę wyznacza zasięg morskich osadów miocenu) oraz Karpaty fliszowe.

Wynikiem analiz była wstępna ocena potencjału energetycznego wód geotermalnych na obszarze poszczególnych powiatów. Analiza dotyczyła oceny wielkości potencjału teoretycznego i potencjału technicznego zasobów energii geotermalnej dla każdego z występujących tu zbiorników. Wyniki analiz przedstawiono w sposób syntetyczny na rysunku 5.3. Oceniono, że najkorzystniejsze warunki do wykorzystania energii geotermalnej występują na obszarze powiatów północnych województwa (strefa niecki miechowskiej, monokliny śląsko-krakowskiej – zbiornik jurajski i triasowy) oraz w mniejszym stopniu w północnej części powiatu cieszyńskiego i bielskiego (strefa brzeźna Karpat – zbiornik dewoński).

Kolejnym krokiem prac analitycznych była klasyfikacja obszarów województwa na podstawie oceny możliwości wykorzystania lokalnego potencjału energii geotermalnej. W zależności od wielkości istniejącego potencjału oraz możliwości jego pozyskania i wykorzystania wprowadzono trzy kategorie stref, tj. A, B i C. Strefa A odpowiada obszarom charakteryzującym się najkorzystniejszymi wskaźnikami opłacalności i wskazano ją jako strefę priorytetów krótkoterminowych. Strefy B i C o niższych wskaźnikach opłacalności określono jako strefy priorytetów długoterminowych. Wyniki tych ocen przedstawiono na zgeneralizowanej mapie województwa śląskiego z podziałem na powiaty i gminy (rys. 5.4) i w zestawieniach tabelarycznych (Bujakowski red. 2005).

Końcowym zadaniem dotyczącym wykorzystania potencjału geotermalnego było wykonanie wstępnego Studium Celowości dla jednej z wytypowanych lokalizacji. Analizą tą



Rys. 5.3. Obszary występowania zbiorników wód geotermalnych z oceną wartości potencjału teoretycznego i technicznego mocy i energii ujęcia geotermalnego (Bujakowski red. 2005)

Fig. 5.3. Areas occurrence of aquifers geothermal water and assessment of the theoretical and technical potential energy power from one borehole (Bujakowski ed. 2005)



Rys. 5.4. Klasyfikacja obszarów ze względu na potencjał techniczny energii geotermalnej wydzielonych na obszarze województwa śląskiego (kolor szary – obszary przemysłowe nie objęte analizami) (Bujakowski red. 2005)

Fig. 5.4. Classification of areas because of the technical potential of geothermal energy dedicated in Silesia (gray – industrial areas not covered by the analysis) (Bujakowski ed. 2005)

objęto miejscowość Jaworze, gdzie zaplanowano wykorzystać wody geotermalne dla zabezpieczenia potrzeb cieplnych i balneologicznych projektowanego obiektu balneo-rekreacyjnego. Założono wykorzystanie wód i energii geotermalnej z otworu Jaworze IG2 i załączanie ich po schłodzeniu do otworu Jaworze IG1 oddalonego o około 1400 m. Odwierty te odwiercone zostały w latach 1979–1980 przez Instytut Geologiczny w Krakowie udostępniając silnie zmineralizowane solanki miocénskie (J-IG1) i dewońskie (J-IG2). W otworze J-IG1 występują one na głębokości 1170–1433 m, w obrębie zlepieńców i piaskowców serii dębowieckiej miocenu i posiadają ogólną mineralizację 106 g/dm^3 . Temperatura solanki określona za pomocą łyżki wiertniczej wynosiła około 23°C , a wydajność horyzontu wodonośnego nie przekraczała $0,9 \text{ m}^3/\text{h}$, zwierciadło swobodne stabilizowało się na głębokości 126 m p.p.t., a przy eksploatacji z podaną wydajnością obniżało się do 500 m p.p.t.

Parametry te praktycznie dyskwalifikują wartość komercyjną wód z utworów mioceńskich. Nieco lepsze parametry zostały stwierdzone w otworze J-IG2 w interwale 1 570–1 650 m, gdzie w spękanych wapieniach dewońskich nawiercono solankę o mineralizacji ogólnej 146 g/dm^3 . Zakłada się, że jej temperatura złożowa wynosi około 45°C . Zwierciadło swobodne stabilizowało się na głębokości około 180 m p.p.t., a podczas pompowań uzyskano wydajność około $12 \text{ m}^3/\text{h}$. Ważna była również informacja, że występujące tu solanki zostały uznane za lecznicze decyzją Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 22.10.1985 r.

Opracowano 8 wariantów technologicznych różniących się technicznymi parametrami eksploatacyjnymi potencjalnych zakładów geotermalnych, których ogólną charakterystykę zestawiono w tabeli 5.4.

Na podstawie tych parametrów dla każdego z wariantów oraz odpowiadającego im wariantu odniesienia bazującego na paliwie konwencjonalnym (w tym przypadku gazie ziemnym) dokonano oceny nakładów inwestycyjnych oraz kosztów funkcjonowania. Wyniki zestawiono w tabelach i na diagramach (rys. 5.5 i 5.6).



Rys. 5.5. Porównanie nakładów inwestycyjnych źródeł ciepła dla poszczególnych wariantów (tab. 5.4) (Bujakowski red. 2005)

Fig. 5.5. Comparison of investment costs of heat sources for the different variants (tab. 5.4) (Bujakowski ed. 2005)

Biorąc pod uwagę specyfikę terenów wokół Jaworza i ich unikalne naturalne walory środowiskowe niezbędne było odniesienie się, w ocenie analizowanych wariantów, do ich wpływu na środowisko. Wyniki zestawiono w tabelach i na wykresie (rys. 5.7).

Wykonana analiza wykazała, że istnieje techniczna możliwość realizacji projektu zagospodarowania energii geotermalnej z utworów dewońskich w lokalizacji i warunkach złożowych Jaworza. Dała wskazówki, jakie parametry winien mieć odbiorca energii (w postaci wytycznych projektowych dotyczących m.in. powierzchni lustra basenów termalnych) aby inwestycja była efektywna ekonomicznie. Dodatkowo podkreślono, że balneologiczne własności wód geotermalnych, w przypadku oceny całego przedsięwzięcia (uwzględniając

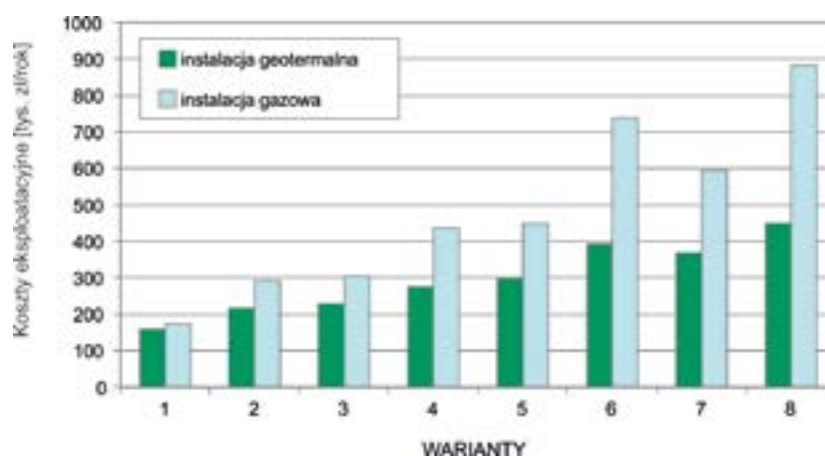
Tabela 5.4

Zestawienie podstawowych technicznych parametrów eksploatacyjnych dla poszczególnych wariantów (Bujakowski red. 2005)

Table 5.4

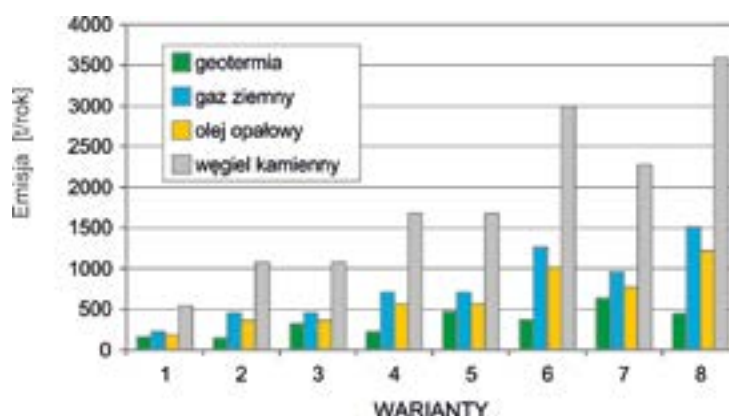
Technical summary of key operational parameters for the different variants (Bujakowski ed. 2005)

Parametr	Wariant							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Strumień eksploatowanej wody geotermalnej [m ³ /godz.]	12	12	20	20	30	30	40	40
Temperatura wody geotermalnej na głowicy [°C]	36	36	39	39	40,5	40,5	41	41
Temperatura wody geotermalnej zatłaczanej do złoża [°C]	12,2	8,2	10,4	9,6	10,9	8,2	10,8	9,8
Przewidywany poziom zwierciadła wody geotermalnej w warunkach eksploatacji [m p.p.t.]	375	375	400	400	400	400	400	400
Powierzchnia lustra wody w basenach termalnych [m ²]	141	281	281	436	438	781	594	938
Moc cieplna [kW]	385	770	770	1 198	1 198	2 140	1 626	2 568
Moc elektryczna [kW]	65	105	129	160	192	267	259	323
Temperatura dostawy medium grzewczego niecki basenowe/CWU [°C/°C]	36/50	58/50	39/50	55/50	40,5/50	63/50	41/50	59/50
Zużycie energii cieplnej [GJ/rok]	3 851	7 703	7 703	11 982	11 982	21 396	16 261	25 675
Zużycie energii elektrycznej kupowanej z sieci [MWh/rok]	179	0	358	0	533	0	718	0
Zużycie gazu ziemnego [m ³ /rok]	0	74 348	0	113 193	0	189 061	0	228 118
Współczynnik konwersji energii pierwotnej paliw kopalnych w ciepło [%]	185	296	185	302	194	323	195	322



Rys. 5.6. Porównanie rocznych kosztów eksploatacyjnych dla źródeł ciepła w poszczególnych wariantach (tab. 5.4) (Bujakowski red. 2005)

Fig. 5.6. Comparison of annual operating costs for heat sources in different variants (tab. 5.4) (Bujakowski ed. 2005)



Rys. 5.7. Porównanie emisji globalnej CO₂ dla wszystkich rozpatrywanych wariantów wraz z emisją równoważną (tab. 5.4) (Bujakowski red. 2005)

Fig. 5.7. Comparison of global emissions of CO₂ for all the options under consideration, along with the emission equivalent (tab. 5.4) (Bujakowski ed. 2005)

większą atrakcyjność obiektu wykorzystującego takie wody) mogą wpłynąć korzystnie na opłacalność inwestycji. Należy zaznaczyć, że ta ocena ma charakter wstępny, a dalszy rozwój przedsięwzięcia winien być oparty na wynikach testów i badań wód złożowych, które będą podstawą wykonania oceny efektywności ekonomicznej całej inwestycji.

Wyniki prac wykonanych dla województwa śląskiego zestawiono w opracowaniu „Odnawialne źródła energii i możliwości ich wykorzystania na obszarach nieprzemysłowych województwa śląskiego” (Bujakowski red. 2005), oraz przedstawiono m.in. w publikacji

(Bujakowski, Pająk i Tomaszewska 2008) i na konferencjach tematycznych m.in. Polskiego Klubu Ekologicznego (Bujakowski 2005).

Inne przykłady rozpoznania warunków geologiczno-geotermalnych stopnia regionalnego dotyczą województw krośnieńskiego, kieleckiego i podkarpackiego. Wyniki tych prac znajdują się w archiwum IGSMiE PAN (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 1996b, 1997b, 1999, 2008d, 2009b), Opracowanie dotyczące województwa podkarpackiego zamieszczone zostało ponadto w formie cyfrowej na stronie internetowej zamawiającego pracę tj. Centrum Doradztwa Gospodarczego – Baza Danych Odnawialnych Źródeł Energii Województwa Podkarpackiego (www.baza-oze.pl). Praca była częścią dużego Programu finansowanego ze środków Unii Europejskiej z Europejskiego Funduszu Społecznego oraz budżetu państwa w ramach Zintegrowanego Programu Operacyjnego Rozwoju Regionalnego.

Zakres prac w tym przypadku obejmował następujące zadania:

1. Rozpoznanie warunków hydrogeotermalnych obszaru województwa w zakresie analizy geologicznej, geofizycznej i wiertniczej. Obejmowało ono m.in. następujące obszary badawcze: tektonikę, stratygrafię, perspektywiczne strefy występowania wód geotermalnych, warunki występowania wód geotermalnych w Karpatach fliszowych oraz parametry zbiornikowe jednostek Karpat fliszowych.
2. Ocena teoretycznych i technicznych możliwości energetycznych stref złożowych oszacowanych dla standardowego otworu wiertniczego, opracowanych w skali województwa w rozbiciu na poszczególne gminy.
3. Zestawienie wyników badań i analiz. Zadanie to umożliwiło zestawienie najważniejszych danych obejmując: głębokość występowania struktur, zasoby potencjalne, wskazanie obszarów perspektywicznych dla rozwoju geotermii, obszary perspektywiczne dla lokalizacji odwiertów oraz wskazanie gmin pod lokalizację otworów badawczych.

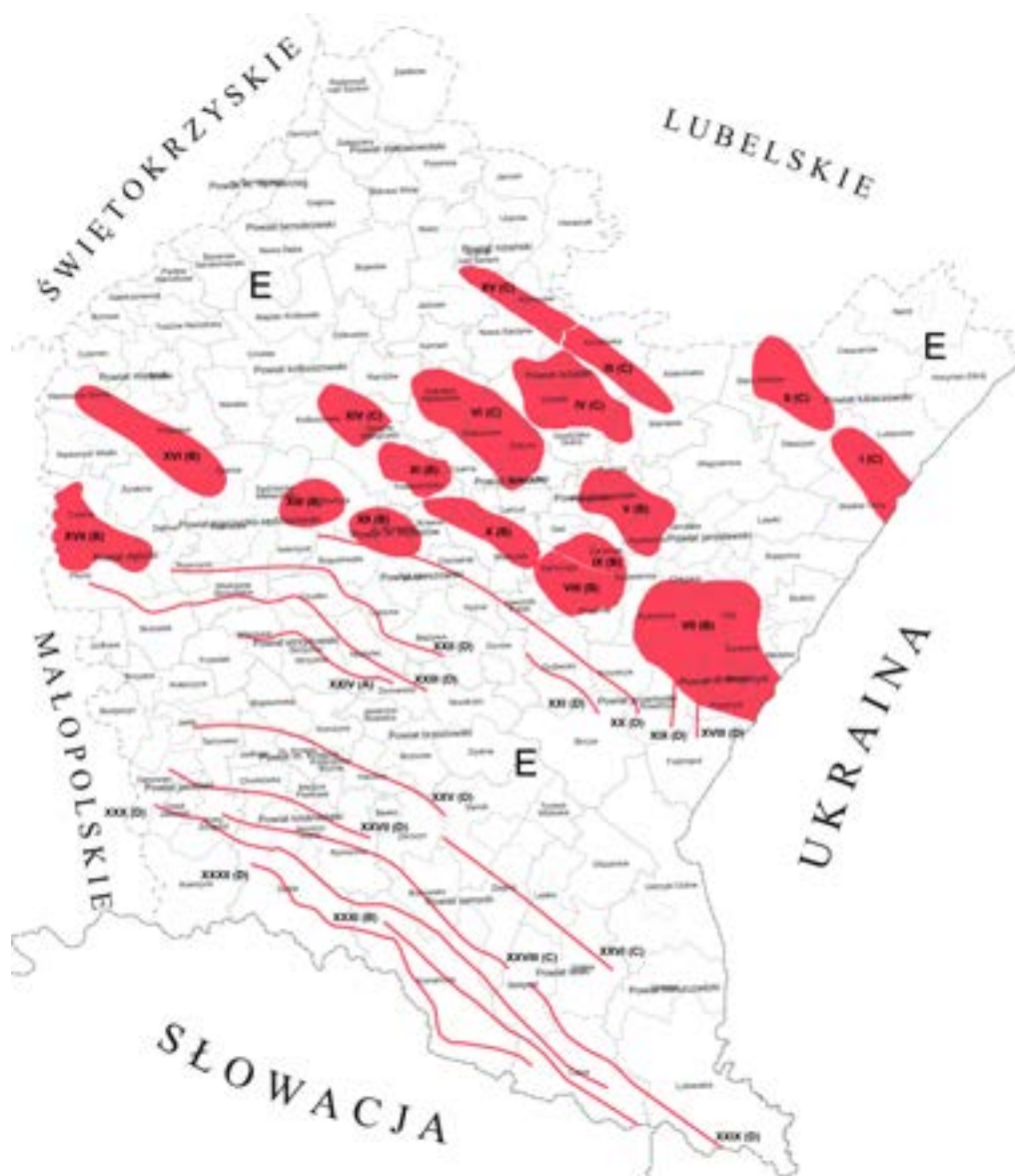
Opracowanie końcowe składa się z następujących tomów (Bujakowski i in. 2007):

- Analiza zrealizowanych inwestycji z zakresu energetyki geotermalnej i pomp ciepła, będących przykładem dobrych praktyk,
- Analiza dostępnych technologii z zakresu energetyki geotermalnej i pomp ciepła,
- Analiza rynku energetycznego w kontekście energetyki geotermalnej i pomp ciepła,
- Stan istniejący wykorzystania energii geotermalnej na obszarze województwa podkarpackiego,
- Analiza uwarunkowań wykorzystania energii geotermalnej na obszarze województwa podkarpackiego,
- Dane z analizy zasobów energii geotermalnej na obszarze województwa podkarpackiego,
- Analiza obowiązujących w Polsce regulacji prawnych dotyczących energetyki geotermalnej i pomp ciepła.

Na obszarze województwa podkarpackiego wytypowano ogółem 32 perspektywiczne strefy występowania wód geotermalnych. Strefy te zostały sklasyfikowane w odniesieniu do oszacowanej minimalnej mocy technicznej.

Do kategorii A zaliczono strefy o minimalnej mocy technicznej powyżej 5 MW. Do kategorii B zaliczono strefy o mocy technicznej w przedziale od 1 do 5 MW, a do kategorii C

strefy o oszacowanej minimalnej mocy technicznej poniżej 1 MW. Dodatkowo utworzono klasę D dla stref o zasobach nieustalonych, z uwagi na brak danych hydrogeotermalnych. Wynikiem prac było opracowanie map (rys. 5.8) i zestawień tabelarycznych kategoryzujących strefy i gminy obszaru województwa (Bujakowski i in. 2007).



Rys. 5.8. Schematyczna mapa lokalizacji 32 stref geotermalnych na obszarze województwa podkarpackiego – objaśnienia w tekście (Bujakowski i in. 2007)

Fig. 5.8. Schematic map of the location of 32 geothermal areas in the province podkarpacki – explanations in text (Bujakowski et al. 2007)

Należy zaznaczyć, iż przedstawiona na mapie (rys. 5.8), lokalizacja perspektywicznych stref występowania wód geotermalnych ma charakter orientacyjny. Zasięg stref określony został na podstawie danych otworowych, a w przypadku ich braku, na podstawie ekstrapolacji geologicznej. Dokładność tych danych powinna być weryfikowana każdorazowo na etapie rozpoznania w większej skali niż zastosowana skala regionalna. Weryfikacja tych danych może być realizowana w formie np. ekspertyz dla poszczególnych gmin, z uwagi m.in. na skalę przeprowadzonych prac.

Zasoby przedstawione zostały w formie tabelarycznej. Wartości liczbowe wyrażają oszacowane wartości minimalnych mocy i energii (teoretycznej i technicznej). Są to zasoby określone z fragmentarycznych pomiarów (częsty brak danych dotyczących przepuszczalności, depresji, ciśnienia złożowego itd.) i nie dają pełnego obrazu rzeczywistych mocy termicznych możliwych do pozyskania w poszczególnych strefach. Uszczegółowienie danych dla konkretnej gminy wymagałoby wykonania indywidualnych prac badawczych.

Przykładowe zestawienia tabelaryczne danych z wybranych stref geotermalnych obszaru karpackiego (Strefa XXIV z lokalizacją odwiertu Wiśniowa 1) i obszaru przedkarpackiego (strefa VII Przemyśl–Tuligłowy) zaprezentowano w tabelach 5.5 i 5.6.

Tabela 5.5

Zestawienie danych strefy geotermalnej nr XXIV (Bujakowski i in. 2007)

Table 5.5

The geothermal reservoir data for zone no. XXIV (Bujakowski et. al. 2007)

Strefa	XXIV
Rejon	Fałdy spaskie (Fs)7
Stratygrafia	Kreda dolna (piaskowce spaskie)
Głębokość zalegania stropu [m]	3 000–3 500
Miąższość [m]	100–500
Porowatość [%]	10–13
Przepuszczalność [mD]	b.d.
Wydajność przyływu wód złożowych min[m ³ /h]	180 (Wiśniowa 1)
Ciśnienie [MPa]	możliwość samowypływu
Temperatura złożowa [°C]	90–95
Mineralizacja [g/l]	10–200
Moc teoretyczna min [kW]	20 000
Moc techniczna min [kW]	17 000
Energia teoretyczna min [GJ/rok]	48 660
Energia techniczna min [GJ/rok]	10 340

Tabela 5.6

Zestawienie danych strefy geotermalnej nr VII (Bujakowski i. in. 2007)

Table 5.6

The geothermal reservoir data for zone no. VII (Bujakowski et. al. 2007)

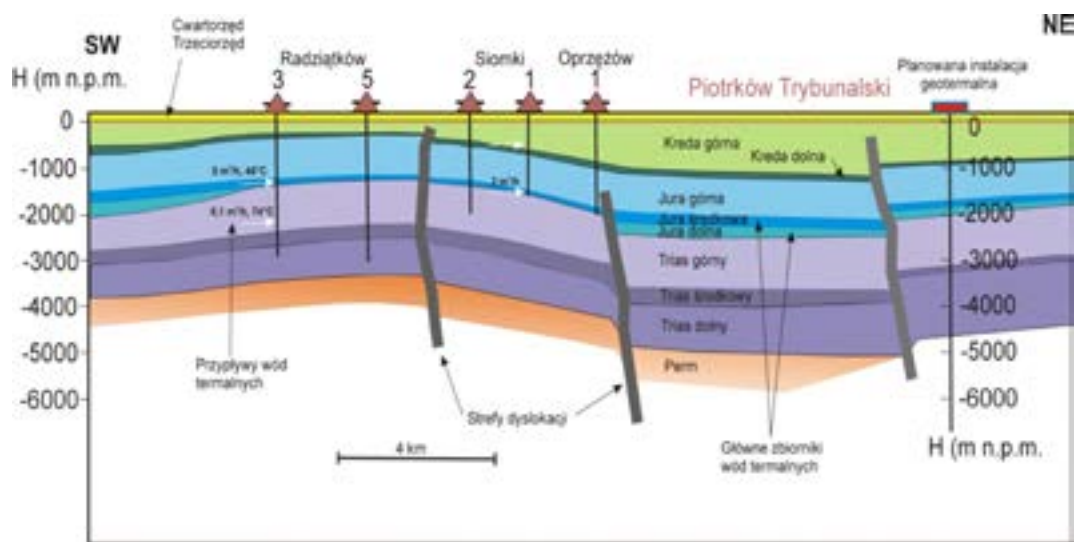
Strefa	VII		
Rejon	Przemysł–Tuligłowy		
Stratygrafia	Nasunięcie karpacko-stebnickie. Miocen autochtoniczny		
Głębokość zalegania stropu [m]	270–985	1 002–1 988	2 010–3 444
Miąższość [m]	7–175		
Porowatość [%]	2–25		
Przepuszczalność [mD]	4–1 049		
Wydajność przyływu wód złożowych min [m ³ /h]	0–5	0–7	0–32
Ciśnienie [MPa]	3,5–21		
Temperatura złożowa [°C]	21–98		
Mineralizacja [g/l]	10–62	4–136	6–163
Moc teoretyczna min [kW]	3 760		
Moc techniczna min [kW]	3 570		
Energia teoretyczna min [GJ/rok]	9 149		
Energia techniczna min [GJ/rok]	2 171		

Kolejny przykład badań rozpoznania w skali regionalnej dotyczy pracy pt. „Badania naukowe i ocena występowania oraz możliwości zagospodarowania energii geotermalnej przy wsparciu innych OZE w kontekście zrównoważonego rozwoju gmin powiatu piotrkowskiego” (Barbacki i in. 2014) oraz pracy pt. „Studium rozpoznania i zagospodarowania lokalnych zasobów Lokalnej Grupy Działania „BUD-UJ RAZEM” (Bujakowski red. i in. 2014). Prace te miały na celu wykonanie badań naukowych, które mają dać wytyczne do zaprojektowania instalacji i obiektów OZE w kontekście zrównoważonego rozwoju powiatu przy uwzględnieniu specyfiki i walorów poszczególnych gmin.

Pierwszym zadaniem było zestawienie danych umożliwiających ocenę charakterystyki badanego obszaru oraz opracowanie geologicznych map i przekrojów obrazujących lokalną budowę geostukturalną.

Obszar powiatu znajduje się w południowej części synklinorium łódzkiego (niecka łódzka) i antyklinorium gielniowskiego. Obszar ten tworzy niesymetryczną synklinę, w obrębie której wyróżnić można szereg struktur drugiego rzędu, takich jak: antykliny horsty (np. elewacja radomszczańska), rowy tektoniczne (rów Bełchatowa) oraz struktury samoistne

np. wysady solne. W przeważającej części struktury te nie są wynikiem ruchów górotwórczych lecz tektoniki salinarnej. Niecka Łódzka, a w tym strefa powiatu, zbudowana jest z osadów permsko-mezozoicznych. Podłoże permskie występuje zwykle na głębokości 3000–4000 m, z wyjątkiem stref wysadów solnych, co oznacza, że kompleks mezozoiczny osiąga tu znaczną miąższość dochodzącą lokalnie do 3 km. Schematyczny przekrój geologiczny fragmentu analizowanego obszaru przedstawiono na rysunku 5.9.



Rys. 5.9. Schematyczny przekrój geologiczny przez rejon powiatu piotrkowskiego (Barbacki i in. 2014)

Fig. 5.9. Schematic geological cross-section through the region of the District Piotrków (Barbacki et al. 2014)

Analizy parametrów hydrogeotermalnych uzyskane z odwierconych na tym obszarze otworów geologicznych wskazują jednoznacznie, że dla geotermalnego wykorzystania szczególnie korzystne ze względu na potencjalne wydajności przedstawiają się zbiorniki: dolnej kredy (K1), jury środkowej (J2) i jury dolnej (J1) oraz jako drugorzędny, zbiornik górnego triasu (T3). Według Góreckiego i in. (2006a) wydajności wód podziemnych dla tych kompleksów stanowią wartości potencjalnie możliwe do uzyskania w przypadku tzw. idealnego ujęcia. Uwzględniając występujące często niekorzystne uwarunkowania techniczne, brak precyzyjnych danych o ciśnieniu statycznym i dynamicznym oraz opierając się na zmierzonych w szeregu otworach z tego obszaru wartościach wydajności wód podziemnych przyjęto wartości niższe a jednocześnie „bezpieczniejsze” z punktu widzenia ekonomii całej inwestycji. Dane te przedstawiono w formie tabelarycznej tabeli 5.8 uwzględniając dwukrotne obniżenie wartości wydajności podanych w atlasie (Górecki red. 2006a, b). W tym zestawieniu przedstawiono także wartości temperatur wód każdego zbiornika, średnią mineralizację wód i średnią miąższość warstwy wodonośnej. Wartości tych parametrów oceniono niezależnie dla każdej analizowanej gminy (Barbacki i in. 2014).

W następnym zestawieniu (tab. 5.7) przedstawiono wartości średnie gradientu temperatury (według danych otworowych oraz Góreckiego i in. 2006a), które określono dla analizowanego kompleksu mezozoicznego w interwale głębokościowym kreda dolna–trias dolny (K1-T1). Największe zróżnicowanie gradientu obserwowane jest w strefie granicznej nieckii łódzkiej i antyklinorium gielniewskiego, gdzie w rejonie gmin Rozprza i Łęki Szlacheckie gradient osiąga wartości minimalne ($\sim 2,4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$), a w rejonie sąsiedniej gminy Ręczno – wartości maksymalne $3,29^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$) (Barbacki i in. 2014).

Tabela 5.7

Średni gradient temperatury w utworach mezozoicznych w gminach powiatu piotrkowskiego
(Barbacki i in. 2014, na podstawie Górecki i in. 2006a)

Table 5.7

The average temperature gradient in the Mesozoic formations in the rural district of Piotrkowskie
(Barbacki et al. 2014, on the basis of Górecki et al. 2006a)

Gmina	Średnia temperatura szacowana w stropie utworów K1 [°C]	Średnia temperatura szacowana w spągu utworów T2 (wstropie utworów T1) [°C]	Średnia miąższość szacowana od stropu K1 do spągu T2 [m]	Średni gradient temperatury [°C/100 m]
Aleksandrów	brak K1 (w stropie J3: 22)	55	1 175	2,809
Czarnocin	26	132	3 380	3,136
Gorzkowice	22	86	2 305	2,777
Grabica	42	132	2 710	3,321
Łęki Szlacheckie	24	70	1 865	2,466
Moszczenica	31	122	3 055	2,979
Ręczno	24	64	1 217	3,288
Rozprza	27	83	2 304	2,431
Sulejów	25	82	2 161	2,638
Wola Krzysztoporska	32	100	2 432	2,796
Wolbórz	20	105	3 250	2,615

Spośród czterech rozpoznanych zbiorników geotermalnych uznanych za najbardziej prognostyczne do wykorzystania wód geotermalnych uznano zbiornik kredy dolnej i jury dolnej.

Tabela 5.7

Parametry hydrogeotermalne w gminach powiatu piotrkowskiego (Barbacki i in. 2014 wartości szacowane na podstawie Górecki i in. 2006a)

Table. 5.7

Hydrogeothermal parameters in the rural District of Piotrkowskie (Barbacki et al. 2014 values estimated on the basis Górecki et al. 2006a)

Gmina	Średnia temperatura otworów [°C]				Średnia wydajność otworów [m ³ /h]				Średnia miąższość utworów [m]				Średnia mineralizacja wody w warstwie [g/dm ³]			
	K1	J2	J1	T3	K1	J2	J1	T3	K1	J2	J1	T3	K1	J2	J1	T3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Aleksandrów	brak	29	30	38	brak	25/12*	80/40*	40/20*	brak	200	100	500	brak	11,5	30,0	60,0
Czarnocin	27	65	74	99	115/50*	140/70*	310/155*	105/52*	100	450	250	1 150	5,5	22,0	57,0	123,5
Gorzkowice	23	38	47	63	35/17*	100/50*	80/40*	20/10*	40	210	200	700	1,3	10,0	42,5	76,0
Grabica	43	71	74	97	130/65*	75/37*	200/100*	115/57*	75	200	130	1 150	2,5	22,5	42,5	101,0
Lęki Szlacheckie	25	43	45	47	20/10*	95/47*	75/37*	20/10*	25	170	100	500	1,7	12,0	40,0	80,0
Moszczenica	31	81	81	95	120/60*	135/67*	300/150*	110/55*	100	300	190	1 100	3	31,0	53,5	112,5
Ręczno	24	38	40	46	15/7*	60/30*	75/37*	15/7*	22	150	100	200	2,3	10,0	35,0	75,5
Rozprza	29	52	54	65	35/17*	65/32*	40/20*	30/15*	24	130	30	1 000	2,5	20,0	41,0	81,0
Sulejów	27	47	49	60	65/32*	80/40*	100/50*	60/30*	26	150	100	1 050	3,5	22,5	42,5	98,5
Wola Krzysztoporska	33	56	62	71	75/37*	30/15*	75/37*	75/37*	27	80	30	1 100	3,0	24,0	29,0	71,5
Wolbórz	22	57	62	80	90/45*	120/60*	250/125*	90/45*	50	300	250	1 200	4,3	23,5	52,5	122,5

Tabela 5.7. cd.

Table. 5.7. cont.

Gmina	Strop	Spąg	Strop	Spąg	Strop	Spąg	Strop	Spąg				
	[m n.p.m.]	[m n.p.m.]	[m n.p.m.]	[m n.p.m.]	[m n.p.m.]	[m n.p.m.]	[m n.p.m.]	[m n.p.m.]				
1	18	K1	20	J2	21	J1	22	J1	23	24	T3	25
Aleksandrów	brak	brak	-230 do -750	-240 do -1 000	-240 do -1 000	-240 do -1 000	-250 do -1 240	-250 do -1 240	-250 do -1 240	-250 do -1 240	-700 do -2 240	
Czarnocin	-150 do -625	-250 do -750	-1 450 do -1 900	-1 750 do -2 450	-1 750 do -2 450	-1 750 do -2 450	-2 250 do -2 650	-2 250 do -2 650	-2 250 do -2 650	-2 250 do -2 650	-3 250 do -3 850	
Gorzkowice	-130 do -250	-150 do -300	-900 do 1 260	-1 150 do -1 300	-1 150 do -1 300	-1 150 do -1 300	-1 250 do -1 600	-1 250 do -1 600	-1 250 do -1 600	-1 250 do -1 600	-1 750 do -2 430	
Grabica	-765 do -1 200	-820 do -1 330	-1 500 do -2 200	-1 800 do -2 350	-1 800 do -2 350	-1 800 do -2 350	-1 850 do -2 400	-1 850 do -2 400	-1 850 do -2 400	-1 850 do -2 400	-3 250 do -3 650	
Łęki Szlacheckie	-130 do -270	-150 do -300	-890 do -1 000	-1 050 do -1 250	-1 050 do -1 250	-1 050 do -1 250	-1 100 do -1 400	-1 100 do -1 400	-1 100 do -1 400	-1 100 do -1 400	-1 200 do -1 950	
Moszczenica	-220 do -875	-250 do -1 000	-1 750 do -1 800	-1 930 do -2 150	-1 930 do -2 150	-1 930 do -2 150	-2 100 do -2 600	-2 100 do -2 600	-2 100 do -2 600	-2 100 do -2 600	-3 200 do -3 800	
Ręczno	-240 do -300	-250 do -350	-860 do -1 000	-1 000 do -1 200	-1 000 do -1 200	-1 000 do -1 200	-1 100 do -1 300	-1 100 do -1 300	-1 100 do -1 300	-1 100 do -1 300	-1 150 do -1 740	
Rozprza	-140 do -750	-150 do -800	-1 030 do -1 300	-1 180 do -1 310	-1 180 do -1 310	-1 180 do -1 310	-1 200 do -1 350	-1 200 do -1 350	-1 200 do -1 350	-1 200 do -1 350	-1 450 do -2 700	
Sulejów	-200 do -750	-220 do -780	-880 do -1 510	-1 000 do -1 750	-1 000 do -1 750	-1 000 do -1 750	-1 080 do -1 940	-1 080 do -1 940	-1 080 do -1 940	-1 080 do -1 940	-1 600 do -3 050	
Wola Krzysztoporska	-300 do -900	-325 do -1 100	-1 170 do -1 850	-1 180 do -2 100	-1 180 do -2 100	-1 180 do -2 100	-1 200 do -2 240	-1 200 do -2 240	-1 200 do -2 240	-1 200 do -2 240	-2 150 do -3 500	
Wolbórz	+10 do -625	-3 do -750	-1 230 do -1 760	-1 500 do -2 140	-1 500 do -2 140	-1 500 do -2 140	-1 750 do -2 400	-1 750 do -2 400	-1 750 do -2 400	-1 750 do -2 400	-2 650 do -3 650	

* Wydajności skorygowane, uwzględniające uwarunkowania techniczne.

Poniżej przedstawiono wybrane elementy charakteryzujące zbiornik jury dolnej (Barbaci i in. 2014). Utwory te rozpoczynają brunatno-wiśniowe iłowce z wkładkami zlepieńców i otoczków skał wapiennych, nad którymi leżą różne odmiany piaskowców. W ich stropie występuje szarozielona ilasta seria estariowa. Na badanym obszarze jurę dolną reprezentują piaskowce drobnoziarniste, kruche, mułowce, iłowce ciemnoszare i czarne z wkładkami piaskowców dolomitycznych i gniazdami syderytów ilastych. Kompleks jury dolnej traktowany jest jako najważniejszy zbiornik wód geotermalnych Nizżu Polskiego. W analizowanym obszarze jego strop zalega na głębokości od 1000 m do około 2650 m, stąd przy średniej miąższości 180 m temperatury występujących tu wód mogą osiągać wartości rzędu 40–80°C. Szczegółowe dane dotyczące przestrzennego rozkładu głębokości stropu, miąższości, temperatur i mineralizacji wód zbiornika jury dolnej przedstawiono w formie graficznej na mapach. Przykładowa mapa rozkładu zmian temperatury na badanym obszarze zamieszczona została na rysunku 5.10. Ważne podkreślenia jest to, że podkład stanowi mapa administracyjna powiatu z podziałem na gminy. Pozostałe parametry zostały przedstawione w ten sam sposób. Sprawia to, że dane są informatywne dla mieszkańców i władz poszczególnych gmin.

Analiza szczegółowa kilkudziesięciu odwiertów umożliwiła dokonanie oceny ich przydatności do ewentualnego wykorzystania po przeprowadzeniu zabiegu rekonstrukcji. Na podstawie analizy wytypowano pięć odwiertów, których lokalizację na tle podziału administracyjnego przedstawiono na mapie (rys. 5.11). Odwierty scharakteryzowano także od strony stanu technicznego oraz przewierconych zbiorników wód geotermalnych (tab. 5.9).

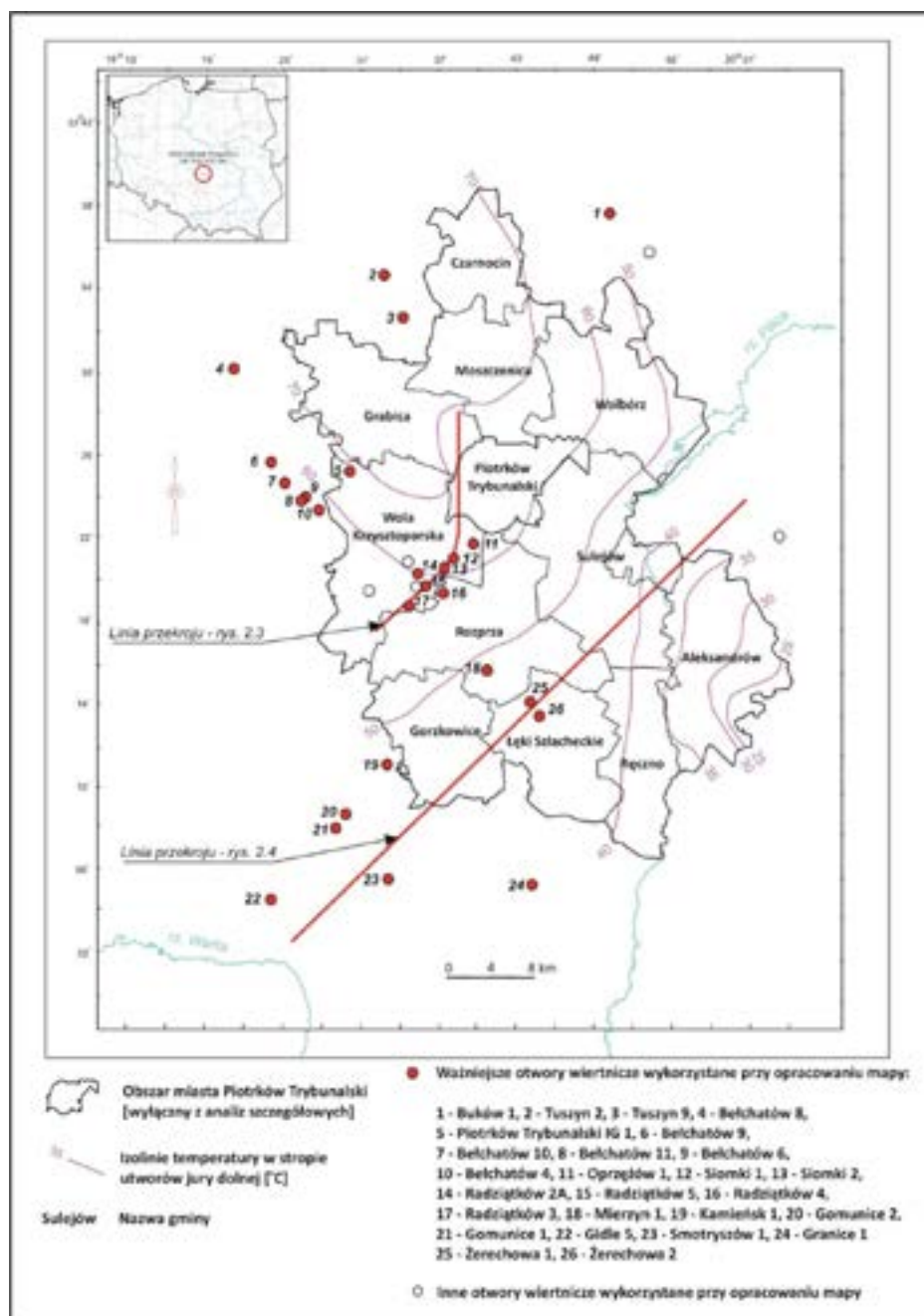
Kolejnym krokiem było określenie potencjału energetycznego źródeł geotermalnych na terenie gmin powiatu piotrkowskiego. Podobnie jak w pracach dotyczących innych wcześniej opisanych przykładów, oceny zasobów geotermalnych na analizowanym obszarze powiatu dotyczyły oszacowania potencjału teoretycznego i technicznego.

Potencjał teoretyczny to potencjał istniejący, ale obecnie niemożliwy do pełnego pozyskania w danym etapie rozwoju technologii. Zakłada się tu, że całe istniejące zasoby energii zostaną wykorzystane, bez względu na występujące uwarunkowania techniczne i ekonomiczne (instalacja będzie pracowała przez cały rok z maksymalną dostępną mocą cieplną). Informuje więc on jedynie o potencjalnych zasobach energii.

Potencjał techniczny to potencjał do praktycznego wykorzystania w obecnym etapie rozwoju technicznego, przy istniejących obecnie technologiach energetycznych.

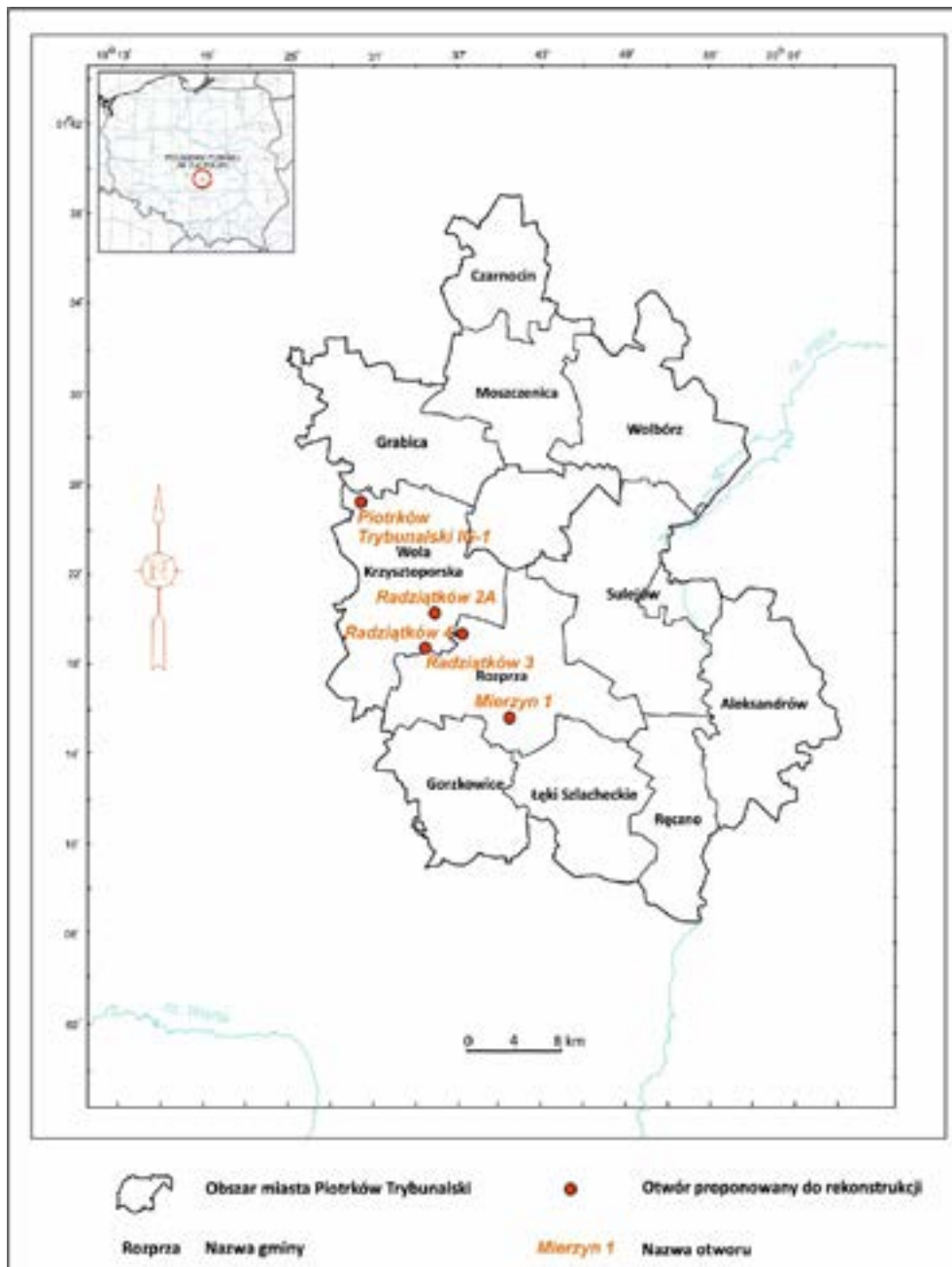
Dla każdej gminy i każdego występującego tam zbiornika wód geotermalnych (K1, J2, J1 i T3) został oszacowany potencjał teoretyczny i potencjał techniczny każdy w zakresie średniej mocy termicznej pojedynczego ujęcia w MW oraz średnia energia cieplna możliwa do pozyskania z pojedynczego ujęcia w TJ/rok. Zbiorcze wyniki zestawiono w tabeli, natomiast potencjał techniczny przedstawiono na wielu mapach indywidualnie dla każdego zbiornika. Przykładowy rozkład potencjału technicznego oszacowany dla pojedynczego ujęcia ze zbiornika jury dolnej przedstawiono na rysunku 5.12.

Taka charakterystyka energetyczna umożliwiła wyznaczenie stref szczególnie korzystnych a także opracowanie wstępnego studium funkcjonalno-przestrzennego zagospodarowania źródeł geotermalnych na terenie badanym (rys. 5.13). Wskazane formacje wodonośne



Rys. 5.10. Mapa temperatury w stropie utworów jury dolnej na obszarze powiatu piotrkowskiego (Barbacki i in. 2014, wg archiwalnych danych otworowych oraz Górecki i in. 2006a)

Fig. 5.10. The map of temperatures in the top of the lower Jurassic formation on the District Piotrkowski area (Barbacki et al. 2014, according to the archive log data and Górecki et al. 2006a)



Rys. 5.11. Lokalizacja otworów wstępnie proponowanych do rekonstrukcji na obszarze powiatu piotrkowskiego (Barbacki i in. 2014)

Fig. 5.11. Location of the holes initially proposed for the reconstruction in the District Piotrkowski area (Barbacki et al. 2014)

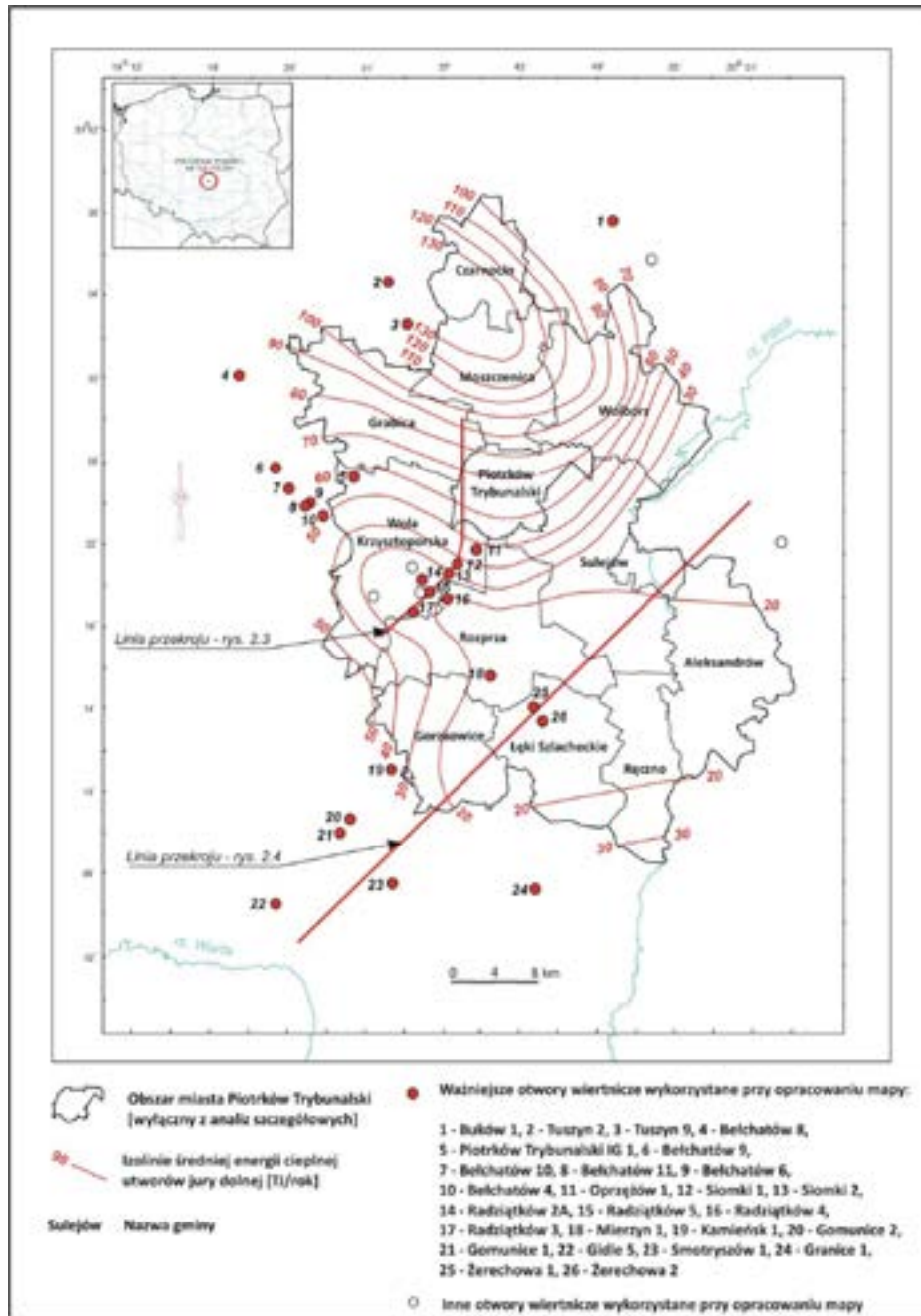
Tabela 5.9

Parametry otworów w obrębie granic powiatu piotrkowskiego, wstępnie proponowanych do rekonstrukcji (Barbacki i in. 2014)

Table 5.9

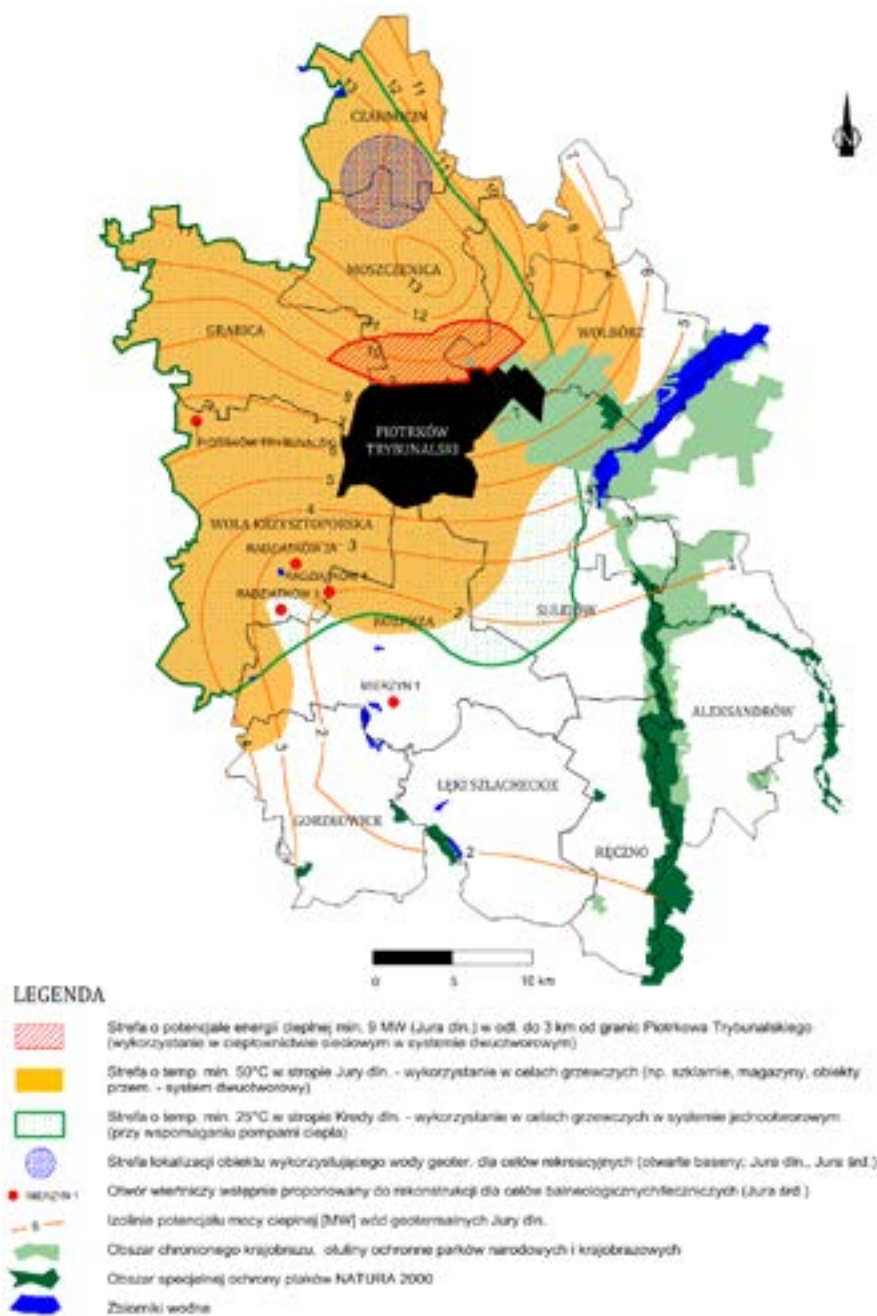
Parameters of the holes in the District Piotrkowski area, initially proposed for reconstruction (Barbacki et al. 2014)

Nazwa otworu	Rok ukończenia wiercenia	K1			J2			J1			T3			Uwagi
		ryły	interwał głęb. rur (długość przebiegu); szacowana temp. złożowa i mineralizacja wód	ryły	interwał głęb. rur (długość przebiegu); szacowana temp. złożowa i mineralizacja wód	ryły	interwał głęb. rur (długość przebiegu); szacowana temp. złożowa i mineralizacja wód	ryły	interwał głęb. rur (długość przebiegu); szacowana temp. złożowa i mineralizacja wód	ryły	interwał głęb. rur (długość przebiegu); szacowana temp. złożowa i mineralizacja wód	ryły	interwał głęb. rur (długość przebiegu); szacowana temp. złożowa i mineralizacja wód	
Piotrków Trybunalski IG-1	1982	9 5/8"	1 125-1 170 m (45 m) 38-39°C 2,5 g/dm ³	9 5/8"	2 000-2 065 m (65 m) 67-68,5°C 23-23,5 g/dm ³	9 5/8"	2 065-2 085 m (20 m) 68,5-69°C 40 g/dm ³	7"	2 085-3 250 m (1 165 m) 69-101,5°C 92-98 g/dm ³					
Radziątków 2A	1972	9 5/8"	459-507 m (48 m) 28-29°C 3 g/dm ³	6 5/8"	1 285-1 358 m (73 m) 56-60°C 23,5-24 g/dm ³	6 5/8"	1 358-1375 m (17 m) 60-60,5°C 29 g/dm ³	6 5/8"	1 375-2 353 m (978 m) 60,5-88°C 72-74 g/dm ³					na głęb. 1 180 m rury 6 5/8" wycięto
Radziątków 3	1970	9 5/8"	418-555 m (137 m) 26-30°C 2,5 g/dm ³	6 5/8"	1 363-1 425 m (62 m) 48-56°C 23-23,5 g/dm ³	6 5/8"	1 425-1 448 m (23 m) 56-57°C 32 g/dm ³	6 5/8"	1 448-2 543,5 m (1 095,5 m) 57-87,5°C 74-77 g/dm ³					na głęb. 1 297,48 m rury 6 5/8" odkrecono, resztę (1 246,02 m pozostawiono w otworze)
Radziątków 4	1970	9 5/8"	473-520 m (47 m) 27-28°C 2,5 g/dm ³	6 5/8"	1 305-1 381 m (76 m) 54-58°C 23-24 g/dm ³	6 5/8"	1 381-1 400 m (19 m) 58-58,5°C 32 g/dm ³	6 5/8"	1 400-2 362,5 m (962,5 m) 58,5-85,5°C 73-76 g/dm ³					
Mierzyn 1	1971	6 5/8"	320-340 m (20 m) 22-22,5°C 2 g/dm ³	6 5/8"	1 217,5-1287 m (69,5 m) 47-48 °C 41 g/dm ³	6 5/8"	1 287-1 323 m (36 m) 48-49°C 41 g/dm ³	6 5/8"	1 323-2 137 m (814 m) 49-69°C 78-80 g/dm ³					



Rys. 5.12. Mapa potencjału technicznego energii cieplnej utworów jury dolnej na obszarze powiatu piotrkowskiego (Barbacki i in. 2014, wg archiwalnych danych otworowych oraz Górecki i in. 2006a)

Fig. 5.12. Map of the technical potential of the thermal energy of the lower Jurassic formations in the District Piotrkowski area (Barbacki et al. 2014, according to the archive log data and Górecki et al. 2006a)



Rys. 5.13. Studium funkcjonalno-przestrzenne zagospodarowania wód geotermalnych na obszarze powiatu piotrkowskiego (Barbacki i in. 2014)

Fig. 5.13. Study of functional and spatial development of geothermal waters in the District Piotrkowski area (Barbacki et al. 2014)

w utworach jury dolnej, jury środkowej oraz kredy dolnej, ze względu na zróżnicowaną: głębokość zalegania, temperaturę, wydajność, skład chemiczny oraz lokalizację istniejących otworów wiertniczych, stwarzają szeroki wachlarz możliwości ich wykorzystania – poczynając od zastosowań typowo energetycznych, po wykorzystanie ich walorów balneoterapeutycznych.

Na podstawie prognozowanych parametrów energetyczno-złożowych oraz nawiązując do istniejących walorów lokalnych i planów poszczególnych gmin wyrażonych w szczegółowych ankietach, opracowano wielowariantową analizę techniczno-ekonomiczną zagospodarowania potencjału wód geotermalnych. Zaproponowano konkretne rozwiązania technologiczne, mające na celu jak najlepsze wykorzystanie specyfiki regionu, istniejącej infrastruktury oraz potencjału energetycznego i chemicznego wód zbiorników mezozoicznych. Wzmiankowane studium funkcjonalno-przestrzenne (rys. 5.13) objęło następujące rozwiązania technologiczne (Barbacki i in. 2014; Bujakowski red. i in. 2014):

1. Wykonanie dubletu nowych otworów do poziomu jury dolnej, eksploatujących wodę geotermalną o temperaturze około 75°C z szacowaną wydajnością około $125\text{ m}^3/\text{h}$, współpracujących z miejską siecią ciepłowniczą miasta Piotrków Trybunalski. Nominalna moc cieplna takiego ujęcia, przy założeniu temperatury powrotu do złoża 5°C , wynosi około 10 MW. Opisywany wariant technologiczny zakłada wykorzystanie bezpośredniego wymiennika ciepła oraz pomp ciepła w dalszym etapie kaskadowego odzysku energii. Na rysunku 5.13 zaznaczono strefę najkorzystniejszej lokalizacji dubletu. Rozciąga się ona w odległości do 3 km od północnej granicy miasta oraz ograniczona jest szacowanym potencjałem technicznym źródła geotermalnego wynoszącym 9 MW. Im bardziej na północ od miasta, tym wyższe są spodziewane moce źródła geotermalnego, jednakże znacząco rosną nakłady inwestycyjne związane z doprowadzeniem rurociągu ciepłowniczego do istniejącej sieci. Przy założeniu wykonania dwóch nowych, pionowych otworów do głębokości 2 250 m p.p.t. oraz odległości dubletu od miejsca włączenia w sieć wynoszącej 1 km, szacowane nakłady inwestycyjne wynoszą około 83,5 mln zł netto, natomiast jednostkowe koszty wytworzenia energii cieplnej (wliczając straty na przesyle) wynoszą 57 zł/GJ. Oceniono, że możliwe jest również podłączenie do wydzielonej, lokalnej sieci ciepłowniczej miasta Piotrków Trybunalski lub współpraca z niskotemperaturową siecią wydzieloną (prawdopodobnie lepsze, pod względem ekonomicznym, rozwiązanie), gdzie końcowa jednostkowa cena sprzedaży energii cieplnej oszacowana została na 48 zł/GJ, przy nakładach na źródło rzędu 64 mln zł.
2. Wykorzystanie wód geotermalnych jury dolnej lub jury środkowej w celu dostarczenia ciepła dla dużych kompleksów szklarniowych, obiektów magazynowych, hal przemysłowych. Na rysunku 5.13 zaznaczono obszar w północno-zachodniej części powiatu, który charakteryzuje się występowaniem wód o temperaturze 50°C lub wyższej w utworach jury dolnej. Ze względu na znaczną mineralizację wód zakłada się system dwuotworowy. Przy założeniu zapotrzebowania odbiorcy na moc cieplną równą 9 MW oraz eksploatacji wód jury dolnej z głębokości 2500 m p.p.t. o temperaturze 80°C i wydajności $150\text{ m}^3/\text{h}$

szacowane nakłady inwestycyjne wytworzenia źródła energii cieplnej wynoszą 58 mln zł netto, natomiast jednostkowy koszt wytworzenia energii cieplnej szacuje się na (wliczając straty na przesył) 61 zł/GJ. Wariant ten zakłada odzyskanie części energii cieplnej za pomocą sprężarkowych pomp ciepła.

3. Na rysunku 5.13 zaznaczono obszar występowania wód geotermalnych w kredzie dolnej o temperaturze minimalnej 25°C. Wykorzystując dodatkowo pompy ciepła (absorpcyjne, sprężarkowe) można dogrzać wodę do niezbędnej temperatury dla celów ciepłowniczych. Ze względu na niską mineralizację wodę można eksploatować w systemie jedno-otworowym, bez konieczności zatłaczania. Dodatkowym atutem utworów kredy dolnej jest płytkie zaleganie (strop kredy dolnej maksymalnie na głębokości 1,3 km w północno-zachodniej części powiatu). Czynniki te znacząco ograniczają nakłady inwestycyjne. Przykładem tak funkcjonującego systemu energetycznego jest Geotermia Mszczonów, eksploatująca wody geotermalne kredy dolnej o temperaturze 41°C.
4. Gminy Moszczenica oraz Czarnocin, znajdujące się w północnej części badanego obszaru posiadają największe zasoby energii cieplnej zakumulowane w wodach jury dolnej. Potencjał techniczny formacji wodonośnych przekracza 10 MW mocy cieplnej. W gminach tych nie ma natomiast sieci ciepłowniczych. Wykorzystanie potencjału tego miejsca należy wiązać z faktem, że 4 największe miasta województwa łódzkiego: Łódź, Piotrków Trybunalski, Pabianice oraz Tomaszów Mazowiecki leżą w odległości nie dalszej niż 30–40 km od centrum którejkolwiek z tych gmin. W studium funkcjonalno-przestrzennym dla wykorzystania zasobów energii geotermalnej w powiecie piotrkowskim proponuje się budowę całorocznego kompleksu balneorekreacyjnego o powierzchni lustra wody wynoszącej około 2500 m² (rys. 5.13). Ośrodek taki wymagałby wykonania dwóch nowych odwiertów (produkcyjny oraz chłonny) do głębokości około 2500 m p.p.t. Temperaturę wód szacuje się na 80°C, natomiast wydajność na 150 m³/h. Całkowite zapotrzebowanie na moc cieplną szacuje się na 8 MW. Nakłady inwestycyjne wytworzenia źródła energii cieplnej oceniono na około 47,2 mln zł netto, natomiast jednostkowy koszt wytworzenia energii cieplnej szacowany jest na 26 zł/GJ. Orientacyjna lokalizacja obiektu została pokazana na rysunku 5.13.
5. Rekonstrukcja jednego z istniejących otworów wiertniczych w celu pozyskania z poziomu jury środkowej wody o mineralizacji rzędu 20 g/dm³, do wykorzystania w kompleksie balneolecznym. Wytypowane otwory (rys. 5.11 i tab. 5.9) znajdują się na obszarze gmin Wola Krzysztoperska i Rozprza (rys. 5.13). Proponowany kompleks balneolecznym posiadałby powierzchnię użytkową około 2 tys. m². Całkowite zapotrzebowanie na moc cieplną takiego obiektu (C.O. + C.W.U.) – szacowane na poziomie 0,6 MW zostałyby niemal w całości pokryte z innego źródła np. z biomasy. Eksploatacja wód prowadzona byłaby z niewielką wydajnością (założono 4,5 m³/h) wyłącznie w celach wykorzystania ich walorów leczniczych. Przy tak niskim poborze wody nie jest konieczne wykonanie odwiertu chłonnego. Nakłady inwestycyjne na wytworzenie źródła energii cieplnej wraz z rekonstrukcją otworu oszacowano na około 6,3 mln zł netto.

Zakres opracowania daje wystarczający poziom wiedzy o zasobach wód i energii geotermalnej i zawiera bogaty zestaw propozycji metod i kierunków ich wykorzystania włącznie z ocenami ekonomicznymi. Kompleksowość opracowania łączy skalę rozpoznania regionalnego ze skalą lokalną. Materiał może być bardzo przydatny do tworzenia przez władze samorządowe lokalnych ofert inwestycyjnych, a także do podejmowania racjonalnych decyzji przez inwestorów.

6. Rozpoznanie w skali lokalnej

Rozpoznanie warunków geotermalnych i zasobów energetycznych w skali lokalnej obejmuje niewielki obszar badawczy zwykle zbieżny i nieprzekraczający zasięgu jednej gminy, maksymalnie kilku gmin, a często dotyczy konkretnego wskazanego miejsca. W odróżnieniu od rozpoznania w skali regionalnej wymaga to znacznego uszczegółowienia informacji dotyczących możliwości pozyskania wód geotermalnych włącznie z odniesieniem do konkretnych lokalizacji na terenie gminy.

Wskazanie najlepszej lokalizacji dla otworu badawczo-poszukiwawczego wymaga przeprowadzenia szczegółowych prac studialnych w odniesieniu do obszaru rozpatrywanej gminy. Analiza ta powinna uwzględniać zagadnienia związane z budową geologiczną i warunkami hydrogeologicznymi obszaru badań (stratygrafia, tektonika – analiza przebiegu stref uskokowych), jak również uwarunkowaniami górnictwymi wynikającymi z ustanowionych przez organy administracji geologicznej granicami obszarów górnictwowych dla kopalin podstawowych (w szczególności złóż ropy naftowej i gazu ziemnego) i pospolitych (surowce skalne), z uwagi na fakt, że obszary te nie są w całości dostępne dla pozyskania wód geotermalnych. Konieczne jest również przeanalizowanie uwarunkowań środowiskowych (Obszary Natura 2000) oraz miejscowych, wynikających z uchwalonego przez radę gminy planu zagospodarowania przestrzennego.

Badania w skali lokalnej poprzedzały m.in. prace projektowe i budowę pierwszego w Polsce zakładu geotermalnego w Bańskiej – Białym Dunajcu. W licznych publikacjach dotyczących tego regionu (wybrane pozycje wymienione zostały we wcześniejszych rozdziałach), przedstawiono stan rozpoznania i program prac wdrożeniowych w kierunku wykorzystania energii geotermalnej na Podhalu. Realizacja programu badawczo-wdrożeniowego pn. „Doświadczalny Zakład Geotermalny Bańska–Biały Dunajec” bazowała na tym zasobie wiedzy. Zespół kierowany przez prof. Juliana Sokołowskiego, którego zastępcą był autor niniejszej pracy, opracował kompleksową dokumentację i w efekcie w 1994 roku uruchomiono prototypową instalację i sieć grzewczą obejmującą odwierty geotermalne, wymiennikownię ciepła, rurociąg dystrybucyjny i węzły pośrednie u odbiorców (domy mieszkalne i obiekty doświadczalnego zagospodarowania energii: np. szklarnia, suszarnia drewna) (Sokołowski, Długosz i Bujakowski 1994).

Oprócz terenu Podhala na obszarze województwa małopolskiego występują także inne perspektywiczne rejony – gminy, o których informacje zawarto w licznych publikacjach

oraz materiałach niepublikowanych. Jedną ze stref stanowi rejon Słomnik z wodonośnym horyzontem cenomańskim.

Możliwości wykorzystania zasobów geotermalnych w gminie i mieście Słomniki zostały przedstawione w formie artykułów (Bujakowski 2000; Bujakowski i Barbacki 2000). Badania realizowano w ramach Projektu Celowego MNiSW pn. „Kaskadowy system wykorzystania niskotemperaturowej wody geotermalnej dla celów ciepłowniczych i konsumpcyjnych w rejonie Słomnik”. W efekcie doprowadzono do opracowania, zrealizowania i uruchomienia w tej miejscowości instalacji geotermalnej włącznie z odwiertem geotermalnym i zatwierdzeniem zasobów w „Dokumentacji hydrogeologicznej zasobów wód” (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2001a).

Innym wybranym przykładem opracowania wykonanego w skali lokalnej są oceny warunków geotermalnych rejonu Bochni i Brzeska (woj. małopolskie) przedstawione w publikacji (Bujakowski i Barbacki 2007). Teren ten charakteryzuje się występowaniem około 200 otworów naftowych wykonanych podczas rozpoznawania na tym obszarze złóż węglowodorów. Dane otworowe wskazują, że wody geotermalne w tej strefie związane są z utworami mioceenu, cenomanu, doggeru, malmu i dewonu. Stwierdzono, że obszar badań znajduje się w strefie o korzystnych warunkach hydrogeotermalnych – zwłaszcza dotyczących zbiornika cenomańskiego, w którym temperatury wód wynoszą od 35 do 40°C, a wydajności dochodzą do 60 m³/godz. w warunkach samowypływów. Wykazano, że dla tego zbiornika istnieje możliwość uzyskania do 1,5 MWt mocy grzewczej z jednego dubletu otworów geotermalnych.

Badania w skali rozpoznania lokalnego zastosowano także dla szeregu innych lokalizacji, przykładowo:

- **W centralnej Polsce** dla: Sulejówka (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2003a), Warszawy (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2009h, i), Gostynina (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2004c i 2007d), Skierniewic (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2005c), Sobieni (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2005f), Sochaczewa (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2007a), Tymawa (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2009j), Konstancina Jeziorna (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2009k), Zamościa (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2003b), Olsztyna (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2005e), Kleszczowa (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2008a).
- **W regionie dolnośląskim** dla: Ciepłowód (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 1996a), Nisy (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2004a, 2010b), i dla Głuchołaz (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2007c, e).
- **W rejonie Karpat** dla: Szczyrku (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2001b i 2009l), Gdowa (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2005b), Gminy Niedźwiedz (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2005g, 2010a), Jeleśni (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2008c), Międzybrodzia Żywieckiego (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2009a), Krakowa (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2007f), Niepołomic (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2008b) i dla Podhala (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2011a).

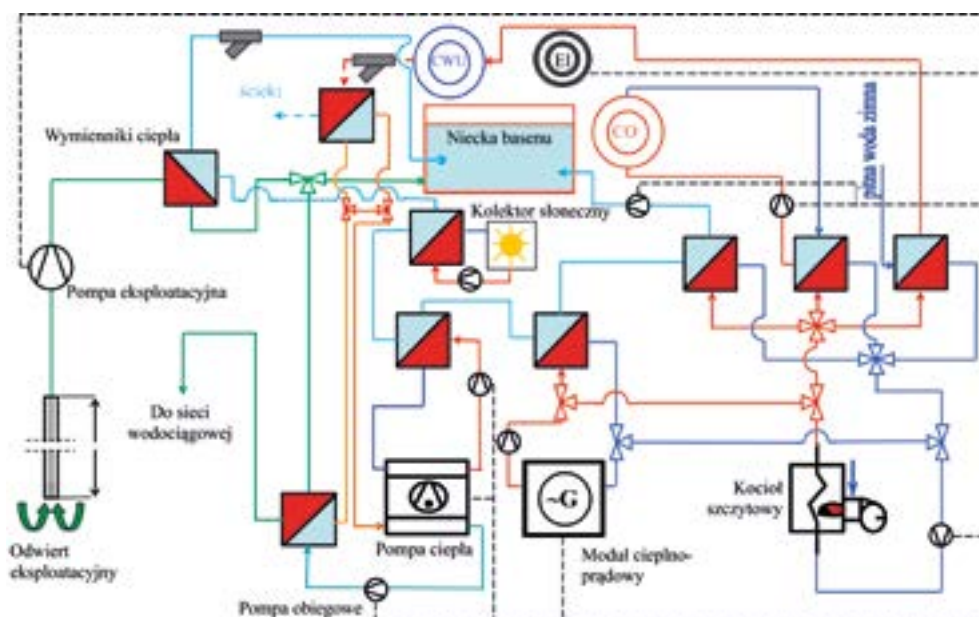
Lokalizacje te zostały opisane w pracach o charakterze ekspertyzy naukowo-wdrożeniowej, nastawionej głównie na aspekt użytkowy i były wykonywane na zlecenie gmin i inwestorów prywatnych. Z racji swej szczegółowości w trakcie tego typu prac badawczych wskazana jest współpraca z konkretnym inwestorem. Zakres prac, zbliżony jest wówczas do zakresu Wstępnego Studium Wykonalności i obejmuje kilka zadań badawczych, takich jak:

- analiza warunków geologicznych i geotermalnych,
- ocena warunków i parametrów hydrogeotermalnych i energetycznych,
- koncepcja układu energetycznego dla zagospodarowania energii geotermalnej,
- koncepcje wariantów technologicznych węzłów energetycznych (hybrydowych) dla eksploatacji i wykorzystania energii geotermalnej,
- wstępna analiza ekonomiczna wytworzenia i funkcjonowania węzłów energetycznych,
- wstępna ocena korzyści ekologicznych analizowanych węzłów energetycznych.

Wynikiem wymienionych zadań jest rozpoznanie charakteru i parametrów zbiorników wód geotermalnych i określenie możliwych do pozyskania zasobów dyspozycyjnych wód i energii, jak również informacje ekonomiczne, które są niezbędne i czytelne dla inwestora. Wykonana analiza ekonomiczna obejmuje etap inwestycji i etap funkcjonowania. Oszacowane koszty stałe i zmienne powinny uwzględniać możliwe do pozyskania w danej chwili fundusze – dotacje, kredyty preferencyjne i pożyczki oraz ich oprocentowanie. Propozycje technologicznych układów węzłów cieplnych muszą pokrywać przewidywane zapotrzebowanie na ciepło, a czasami (według decyzji inwestora) także na energię elektryczną. Tego typu źródła energii zwykle mają charakter hybrydowy, tj. zawierający więcej niż jeden nośnik energii. Najczęściej analizowane są układy hybrydowe obejmujące źródło geotermalne (zagospodarowane w wymiennikach i/lub sprężarkowych i absorpcyjnych pompach ciepła), gazowe (kotły, agregaty kogeneracyjne), energię słoneczną (głównie kolektory, możliwe ogniwa PV) oraz energię elektryczną (napędzanie urządzeń układu). Przykładowy układ technologiczny hybrydowego źródła energii bazującego na energii geotermalnej, gazie ziemnym i kolektorach słonecznych przedstawiono na rysunku 6.1 (Pająk i Bujakowski 2005).

W przypadku eksploatacji wód geotermalnych wymagających zatłaczania, do dalszej analizy ekonomicznej wliczane są koszty wykonania drugiego odwiertu (chłonnego) i koszty zatłaczania. Jak wspomniano, hybrydowe źródło energii winno pokrywać potrzeby planowanego odbiorcy. Ten warunek jest również spełniany w analizie wariantu odniesienia, którym jest zwykle klasyczne źródło energii, tj. kocioł gazowy lub olejowy, a niekiedy węglowy (Pająk i Bujakowski 2005). Wariant odniesienia jest analizowany przy założeniu identycznych warunków finansowych jak źródło hybrydowe, za wyjątkiem elementów preferujących finansowanie odnawialnych źródeł energii. Proste porównanie wyliczonych kosztów wytworzenia jednostki energii ze źródła hybrydowego i źródła klasycznego umożliwia podjęcie racjonalnej decyzji inwestorowi odnośnie kontynuacji realizacji przedsięwzięcia.

Aspekt naukowo-poznawczy dotyczący rozpoznania lokalnych warunków hydrogeotermalnych był dominujący w pracach wykonanych w ramach realizacji pod kierunkiem autora projektów badawczych finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Ministerstwo Środowiska i ze środków Unii Europejskiej w ramach Programów Ramowych.



Rys. 6.1. Schemat technologiczny hybrydowego źródła energii (Pająk i Bujakowski 2005)

Fig. 6.1. Flowsheet of a hybrid energy sources (Pająk and Bujakowski 2005)

Wyniki tych prac były przedstawiane w publikacjach oraz w formie monografii. Poniżej przedstawiono wybrane cztery przykłady takich prac:

1. „Opracowanie i testy zintegrowanej metodyki prac sejsmo-magnetotellurycznych w aspekcie rozpoznania przestrzennego wglębniej budowy geologicznej dla wskazania optymalnej lokalizacji otworów geotermalnych” (Bujakowski red. i in. 2009).
2. „Integrated Geophysical Exploration Technologies for deep fractured geothermal systems – I-GET” (Bujakowski i in. 2010; Pussak i in. 2014).
3. „Termiczna charakterystyka górotworu w rejonie wysadów solnych” (Bujakowski red. i in. 2003).
4. „Rozpoznanie geotermicznej anomalii w strefie nasunięcia karpackiego w rejonie Tarnów Łękwica” (Bujakowski red. i in. 2007).

Badania objęte rozpoznaniem w skali lokalnej prezentuje przykład prac wykonanych w rejonie Łowicza z wykorzystaniem danych ze zlikwidowanego otworu Kompina IG-1.

Głównym celem realizacji badań w rejonie miasta Łowicz było opracowanie i przetestowanie nowej metodyki rozpoznawania, w lokalnej skali, budowy geologicznej górotworu dla wskazania stref optymalnych dla posadzenia otworu wiertniczego. Sytuowanie kolejnych otworów wiertniczych bez rozpoznania przestrzennej budowy geologicznej kolektora wód geotermalnych, obarczone jest ryzykiem ekonomicznym wykonania „nietrafionych” otworów, tak w odniesieniu do temperatury jak i wydajności wód geotermalnych.

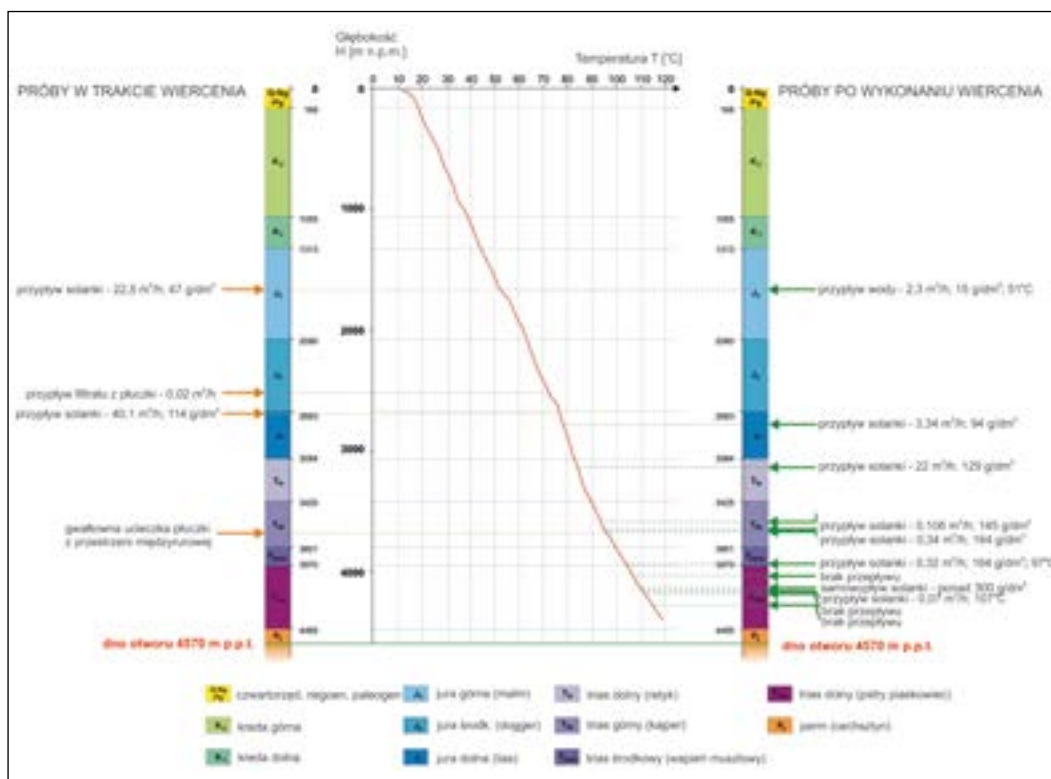
Sformułowane cele były przedmiotem badań wykonanych w ramach projektu współfinansowanego przez UE pn. „Integrated Geophysical Exploration Technologies for deep

fractured geothermal systems – (I-GET)” oraz projektu zamawianego Ministerstwa Środowiska pn. „Opracowanie i testy zintegrowanej metodyki prac sejsmo-magnetotellurycznych w aspekcie rozpoznania przestrzennego wglębnej budowy geologicznej dla wskazania optymalnej lokalizacji otworów geotermalnych”. Projekt I-GET miał wymiar wielonarodowy i realizowany był przez międzynarodowe konsorcjum firm, których liderem była geofizyczna niemiecka firma GeoForschungsZentrum z Poczdamu. Ze strony polskiej uczestnikiem był IGSMiE PAN z zespołem kierowanym przez autora. Główne prace terenowe polskiej części badań wykonały specjalistyczne firmy geofizyczne: Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych z Warszawy w zakresie badań magnetotellurycznych (MT) kierowanych przez dr hab. inż. Michała Stefaniuka prof. AGH oraz Geofizyka Kraków SA w zakresie prac sejsmicznych kierowanych przez mgr inż. Barbarę Czerwińską. Wykorzystując dane z istniejącego, opróbowanego, głębokiego otworu wiertniczego Kompina IG-1, zastosowano ograniczone do obszaru potencjalnego złoża, wysokorozdzielcze badania sejsmiczne 3D wspomagane informacjami z innych metod geofizycznych (magnetotelluryka, geofizyka wiertnicza). Takie rozpoznanie dawało możliwość weryfikacji strukturalnego modelu geologicznego określonego na podstawie sejsmicznych badań 2D oraz niskorozdzielczych badań 3D i miało znaczenie kluczowe dla właściwej lokalizacji nowych otworów geotermalnych, zarówno produkcyjnych, jak i chłonnych.

Jak wspomniano, głównym celem geologicznym projektowanych i zrealizowanych tzw. zintegrowanych badań geofizycznych (sejsmicznych i MT) było rozpoznanie budowy geologiczno-strukturalnej rejonu otworu Kompina 2, w którym stwierdzono wcześniej obecność złoża wód geotermalnych (rys. 6.2) (Bujakowski red. i in. 2009).

Obszar badań znajduje się w synklinorium warszawskim pomiędzy Skierniewicami a Mszczonowem, gdzie na głębokościach poniżej 4000 m występują szczelinowe, wodonośne utwory dolnego triasu (pstry piaskowiec), z których uzyskiwano samowypływy solanek o temperaturze powyżej 100°C, a jednocześnie płycej występują porowe wodonośne utwory jurajskie i kredowe (rys. 6.2). Badaniami sprawdzono skuteczność szczegółowego zdjęcia wysokorozdzielczej sejsmiki 3D i magnetotelluryki przy wsparciu innych metod geofizycznych (geofizyka otworowa). Badane główne horyzonty złożowe wód geotermalnych, występują na dużych głębokościach, około 4000 m p.p.t. Opracowanie i testowanie metodyki skojarzonych prac sejsmo-magnetotellurycznych dotyczyło nie tylko rozpoznania stref zbiornikowych kompleksów głębokich o szczelinowym typie porowatości (trias), ale również przetestowanie metodyki dla rozpoznania zbiorników hydrogeotermalnych występujących płycej (jura, kreda) o porowatości typu międzyziarnowego. Projekt przewidywał wykonanie badań o następującym zakresie:

- analiza danych geologicznych, hydrogeologicznych i wiertniczych rejonu badań,
- *reprocessing* i reinterpretacja archiwalnych profilowań sejsmicznych,
- polowe prace sejsmiczne 3D wraz z *processingiem* i interpretacją danych
- polowe prace magnetotelluryczne wraz z przetwarzaniem i interpretacją danych,
- analiza danych profilowań geofizyki otworowej,
- zintegrowana interpretacja uzyskanych danych z przeprowadzonych badań i analiz.



Rys. 6.2. Dane hydrogeotermalne zarejestrowane w otworze Kompina 2 (Bujakowski red. i in. 2009)

Fig. 6.2. The data recorded in the hydrogeothermal Kompina 2 well (Bujakowski ed. et al. 2009)

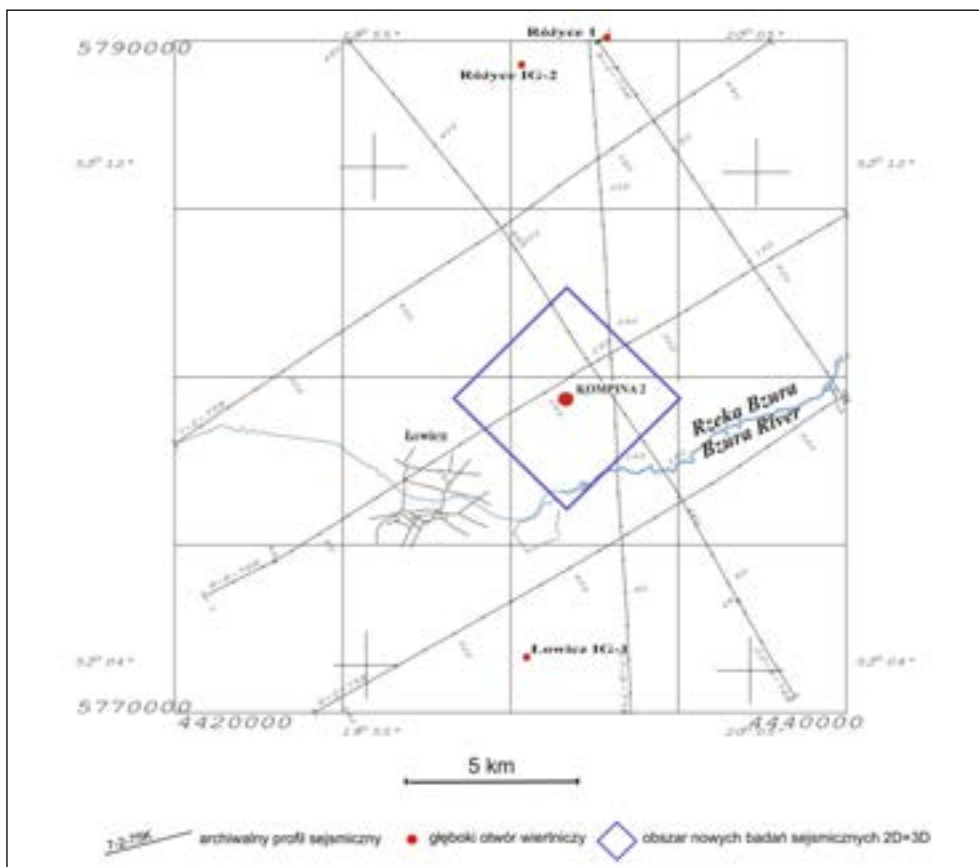
Prace nowej, testowanej metodyki zlokalizowane były po stronie północno-wschodniej miasta Łowicz na obszarze około 40 km² (rys. 6.3) (Bujakowski red. i in. 2009).

Celem *reprocessingu* i ponownej interpretacji profili sejsmicznych było przedstawienie możliwie najbardziej wiarygodnej budowy geologicznej tego obszaru, przede wszystkim budowy strukturalno-tektonicznej kompleksu permsko-mezozoicznego, w którym otworem Kompina 2 udokumentowano złoża geotermalne związane głównie z horyzontami: kredy dolnej, jury dolnej i triasu dolnego (rys. 6.2). W kredzie dolnej i jurze dolnej stwierdzono wody geotermalne o temperaturze poniżej 100°C, natomiast z piaskowców pstrego piaskowca środkowego (dolny trias), samowypływ solanki o temperaturze 107°C z głębokości 4110–4115 m (rys. 6.2). Złoże dolno-triasowe ma charakter zbiornika szczelinowego o anizotropowym rozkładzie szczelin. Stąd jednym z podstawowych celów wykonanych prac było rozpoznanie tektoniki badanego obszaru, ponieważ wzdłuż stref uskokowych szczelinowatość skał zbiornikowych jest często podwyższona. Przeprowadzone nowe badania sejsmiczne o charakterze prac badawczych miały na celu opracowanie i zastosowanie nowoczesnej metodyki prac sejsmicznych, łączącej zasady metody 2D i 3D, dla uszczegółowienia modelu budowy geologicznej w rejonie

odwiertu Kompina-2, w wyniku *reprocessingu* archiwalnego zdjęcia sejsmicznego 2D (rys. 6.3 i 6.4).

Nowe badania geofizyczne zostały poprzedzone szczegółową analizą istniejących danych geofizycznych, co pomogło optymalnie zaprojektować kosztowne prace zdjęcia sejsmicznego 3D i prace magnetotelluryczne (rys. 6.4). Wstępne analizy w rejonie Łowicza – Kompina dotyczyły obszaru o wymiarach 50×50 km. Wyniki analiz pozwoliły wydzielić horyzonty perspektywiczne oraz dokonać wyboru danych archiwalnych do powtórnego przetworzenia z punktu widzenia poszukiwań geotermalnych. Trzy otwory (Łowicz IG-1, Kompina 2 i Różyce IG-1) zostały wytypowane do przetwarzania archiwalnych pomiarów geofizyki wiertniczej i ich reinterpretacji. Mimo że dokładność obliczenia składu mineralogicznego była ograniczona ze względu na ubogi zestaw pomiarów wykonanych w odwiertach i ich słabą jakość, wyniki można uznać za dość wiarygodne.

Ostatecznie przetwarzanie i reinterpretację archiwalnych danych geofizyki wiertniczej uznano za wartościowe i wiarygodne dla celów geotermalnych zwłaszcza, że można je prze-



Rys. 6.3. Lokalizacja starych profili oraz obszaru nowych badań (Bujakowski red. i in. 2009)

Fig. 6.3. Location of old profiles and new research area (Bujakowski ed. et al. 2009)

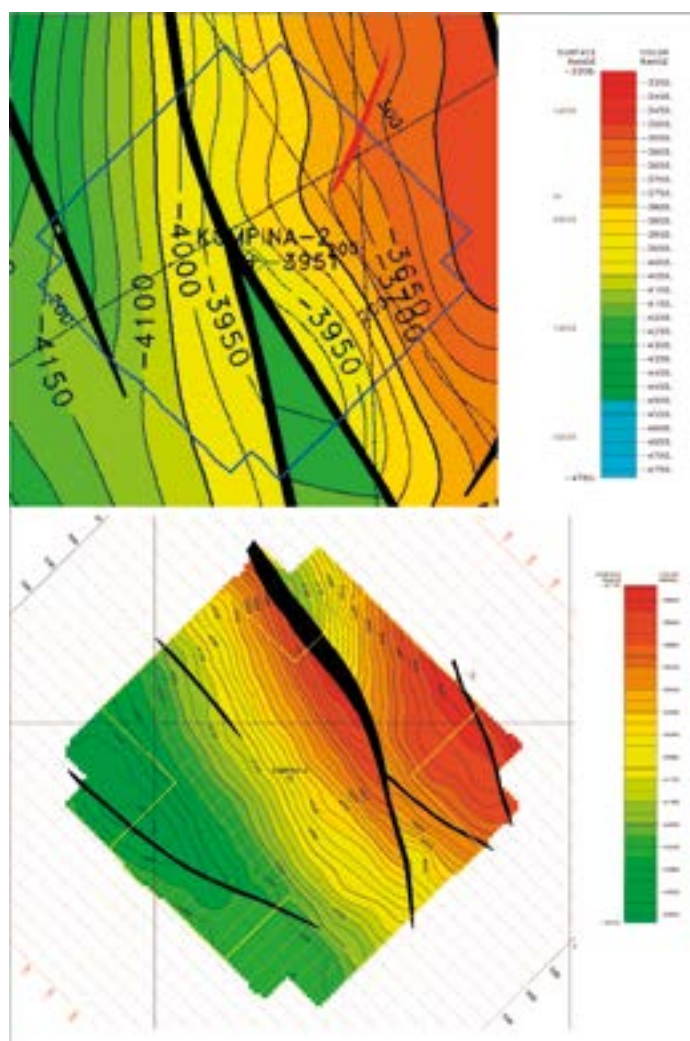


Rys. 6.4. Przebieg profili sejsmicznych i magnetotellurycznych w obszarze badań (Bujakowski red. i in. 2009)

Fig. 6.4. Lines of seismic and magnetotelluric profiles (Bujakowski ed. et al. 2009)

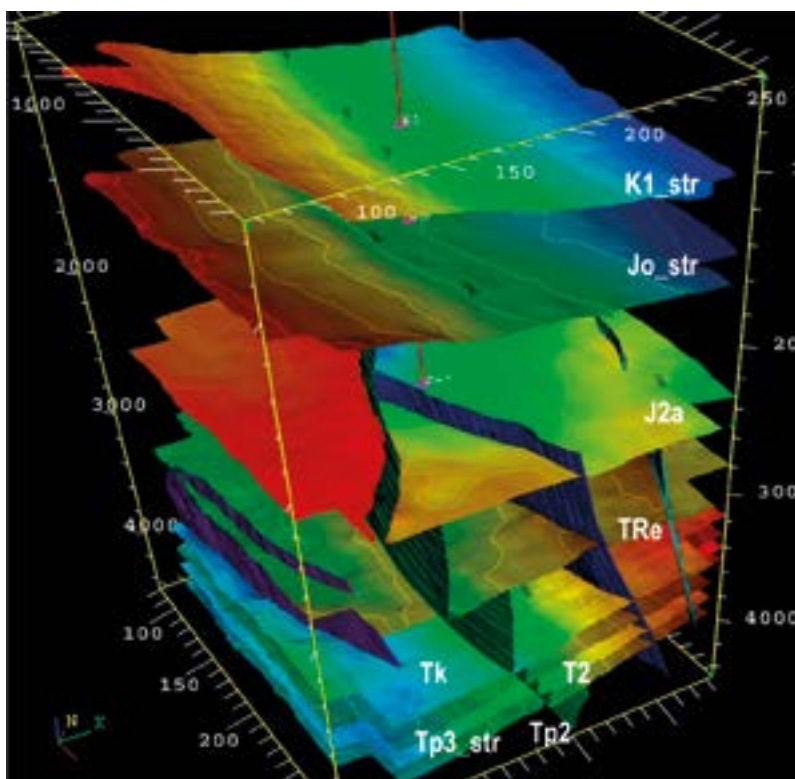
prowadzać po względnie niskich kosztach. Efektem prac przetwarzania i reinterpretacji sześciu archiwalnych profili sejsmicznych było uzyskanie nowego obrazu sejsmicznego granic strukturalnych poszczególnych stref złożowych wód geotermalnych. Na rysunku 6.5 przedstawiono mapy strukturalne granicy sejsmicznej Tp2 (strop pstrego piaskowca) opracowane na podstawie przetworzenia danych sejsmicznych 2D pochodzących z zasobów archiwalnych i obraz tej samej granicy uzyskany z nowych pomiarów sejsmicznych.

Mapy te ukazują zasadnicze różnice dotyczące głębokości zalegania badanej granicy, jak i lokalizacji stref tektonicznych. Nowe pomiary sejsmiczne były wykonane w dwóch wariantach, jako 8 krzyżujących się profili sejsmicznych 2D oraz zdjęcie 3D zapewniające wiarygodne rozpoznanie w centralnym obszarze zdjęcia najgłębszych horyzontów (rys. 6.4). W efekcie prac uzyskano bogaty zestaw nowych map strukturalnych badanych granic i przestrzennego obrazu budowy geologiczno-tektonicznej badanego obszaru, którego zbiorczy obraz zalegania utworów kredowych (K), jurajskich (J) i triasowych (T) zaprezentowano na rysunku 6.6.



Rys. 6.5. Porównanie map strukturalnych granicy sejsmicznej TP2 (strop pstrego piaskowca środkowego) wykonanych na podstawie danych archiwalnych (górną) i nowych (dolną) (Bujakowski red. i in. 2009)

Fig. 6.5. Comparison of the structural maps of seismic boundary TP2 (top of Buntsandstein) made on the basis of historical data (top) and the new (lower) (Bujakowski ed. et al. 2009)



Rys. 6.6. Przykład obrazu przestrzennego granic sejsmicznych i lokalizacji dyslokacji w rejonie otworu Kompina 2 uzyskany na podstawie nowych badań sejsmicznych (Bujakowski red. i in. 2009)

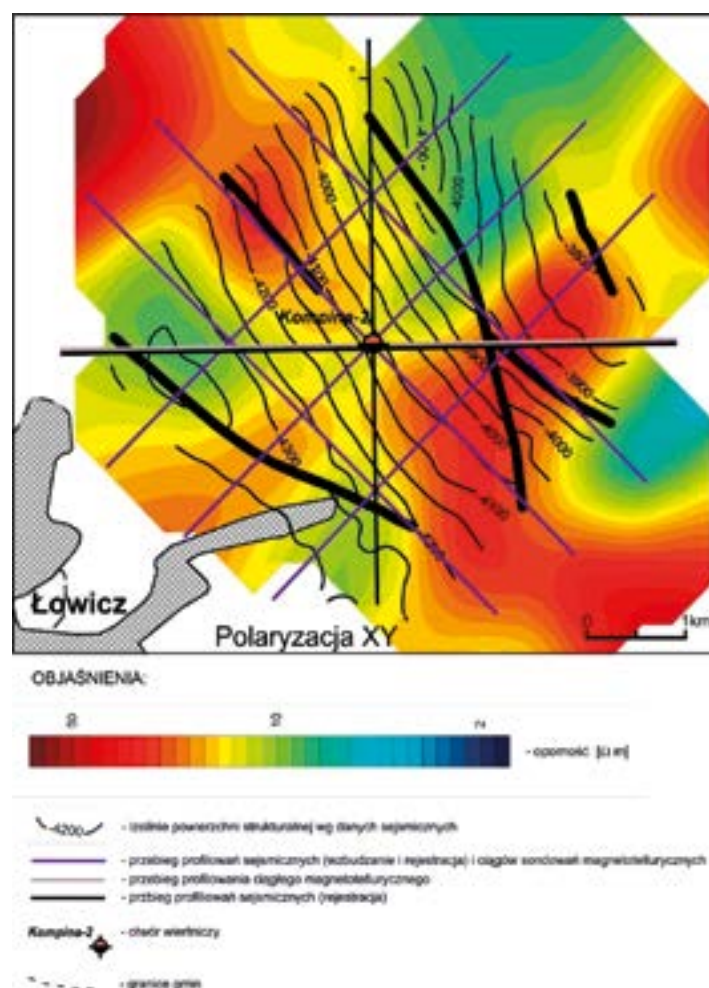
Fig. 6.6. Example image spatial boundaries and location of seismic dislocations in the area of the Kompina 2 well obtained on the basis of new seismic surveys (Bujakowski ed. et al. 2009)

Badania magnetotelluryczne wykonane zostały w dwóch etapach. W pierwszym wykonano zostało profilowanie ciągle wzdłuż profilu sejsmicznego o kierunku południowo-zachodnim przechodzącego przez otwór Kompina 2. Etap drugi obejmował sondowania magnetotelluryczne (MT/AMT/CSAMT) wykonane wzdłuż sześciu profili sejsmicznych oraz profilowanie ciągle z wykorzystaniem metody kontrolowanego źródła (CSAMT) wzdłuż ciągłego profilu magnetotellurycznego.

Zgodnie z założeniami projektu (I-GET) na podstawie wyników badań sejsmicznych i magnetotellurycznych przeprowadzone zostały wstępne interpretacje geologiczne oddzielnie dla każdej metody. Ostatecznej interpretacji geologicznej, hydrogeologicznej i geotermalnej dokonano na podstawie zintegrowanej interpretacji nowych danych sejsmicznych i magnetotellurycznych oraz badań archiwalnych profili sejsmicznych przy wsparciu wyników analiz danych otworowych i pomiarów geofizyki wiertniczej.

Rozdzielczość metody magnetotellurycznej jest znacząco niższa niż w przypadku danych sejsmicznych, dlatego też model strukturalny został opracowany na podstawie badań sejsmicznych. Natomiast rozkład oporności ośrodka geologicznego uzyskany w wyniku

interpretacji danych magnetotellurycznych lepiej odzwierciedla zróżnicowanie litologiczne i jest bardziej czuły na wysoką porowatość i szczelinowatość stref nasyconych gorącą, wysokozmineralizowaną wodą. Ze względu na główny cel badań, jakim było rozpoznanie warunków występowania wód geotermalnych w głównych poziomach wodonośnych, tj. utworach kredy dolnej, jury dolnej oraz pstrego piaskowca, w odniesieniu do tych formacji prowadzono porównanie obu metod. Na głębokościowe sejsmiczne mapy strukturalne tych formacji nałożono informacje z metody magnetotellurycznej. Wykonano to w dwóch wariantach, tj. dla oporności powierzchni strukturalnej (rys. 6.7) oraz dla płaskiej powierzchni zalegającej na głębokości odpowiadającej średniej głębokości zalegania formacji.



Rys. 6.7. Mapa oporności na tle powierzchni strukturalnej TP2 w rejonie otworu Kompina 2 (Bujakowski red. i in. 2009)

Fig. 6.7. Map of resistance on the background the structured surface TP2 in the area of the Kompina 2 well (Bujakowski ed. et al. 2009)

Na obrazie sejsmo-magnetotellurycznym stropu pstrego piaskowca (rys. 6.7), bardzo wyraźnie rysują się strefy o obniżonej oporności i jednocześnie silnie dyslokowane. Jednocześnie głębokości zalegania stropu struktury uzasadnia przypuszczenie o możliwym pozyskaniu cieczy złożowych o temperaturze znacznie przekraczającej 100°C. Jedna z takich stref znajduje się na głębokości około 4100 m p.p.t. w pobliżu otworu Kompina 2, druga, na głębokości około 4250 m p.p.t. zlokalizowana jest w południowo-wschodniej części obszaru i związana jest z systemem uskoków. W północno-zachodniej części obszaru badań występuje trzecia strefa, także związana z systemem uskokowym, występująca w utworach, których strop zalega na głębokości około 4000 m p.p.t. (Bujakowski red. i in. 2009).

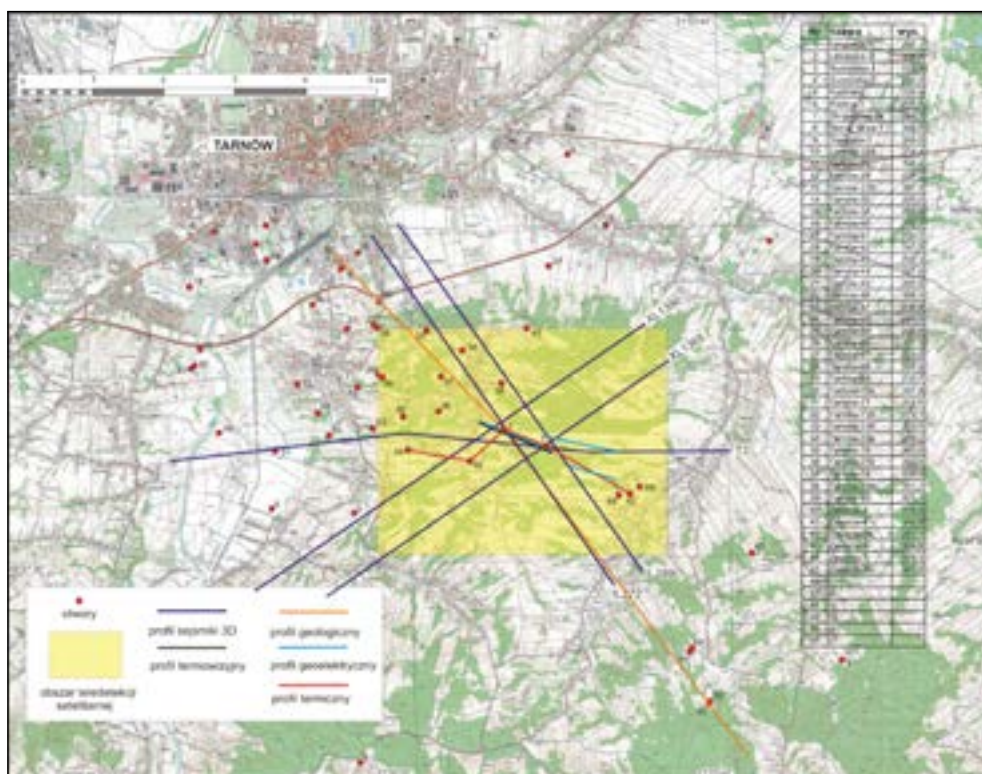
Wykonany zakres badań: od analiz danych geologicznych i hydrogeologicznych poprzez reprocessing archiwalnych profilowań sejsmicznych i geofizyki otworowej, aż po wysokorozdzielcze zdjęcie sejsmo-magnetotelluryczne, przyniósł szereg istotnych informacji naukowych. Wyniki prac zawarto w dokumentacji końcowej z przeprowadzonych badań, a w skondensowanej formie przedstawiono m.in. w monografii (Bujakowski red. i in. 2009), oraz w artykułach zamieszczonych w wydawnictwie „Geothermics” (Bujakowski i in. 2010) a także w Journal of Applied Geophysics (Pussak i in. 2014) i na konferencjach międzynarodowych (Bauer i in. 2014).

Innym przykładem badań rozpoznania w skali lokalnej jest program badawczy zrealizowany w rejonie Tarnów–Łękawica. Tarnowski obszar występowania złóż węglowodorów był przedmiotem zestawu interdyscyplinarnych badań, zrealizowanych w ramach Projektu Badawczego MNiSW pn. „Rozpoznanie geotermicznej anomalii w strefie nasunięcia karpackiego w rejonie Tarnów–Łękawica” wykonanego w 2007 roku (Bujakowski red. i in. 2007).

Badania prowadzone w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku przez Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA w rejonie na południowy wschód od Tarnowa pozwoliły zlokalizować interesującą anomalię geotermiczną. Strefę tę zidentyfikowano dwoma otworami naftowymi odwierconymi, w odległości od jednego do dwóch kilometrów na południowy-wschód od granic Tarnowa: Łękawica-1 i Łękawica-2. Anomalię stwierdzono w obrębie utworów fliszu Karpat. Oba wyżej wymienione odwierty nawierciły złożę gazu w utworach miocenu, pod utworami fliszu, na głębokości poniżej 1000 m. W pracy przedstawiono charakterystykę hydrogeologiczną, geologiczną i tektoniczną obszaru oraz stan rozpoznania wiertniczego ze szczególnym podkreśleniem danych dotyczących temperatur pomierzonych w etapie wykonywania odwiertów (Bujakowski red. i in. 2007). Osiągnięcie celów naukowych wymagało interdyscyplinarnej współpracy specjalistów z wielu dziedzin nauki (geologii, geofizyki, teledetekcji, ciepłownictwa, inżynierii złożowej), posiadania lub dostępu do specjalistycznego sprzętu i aparatury pomiarowej (m.in. kamera termowizyjna, spektrometr termalny, czujniki do pomiarów geotermicznych) oraz sprawnej logistyki dotyczącej prac pomiarowych. Zakres prac oraz ich lokalizację schematycznie przedstawiono na rysunku 6.8 (Bujakowski red. i in. 2007).

Badania anomalii geotermicznej umożliwiły osiągnięcie wielu celów naukowych m.in.:

- rozpoznanie geologiczno-hydrogeologiczne obszaru występowania anomalii geotermalnej w strefie północnego brzegu nasunięcia Karpat w rejonie miasta Tarnów,



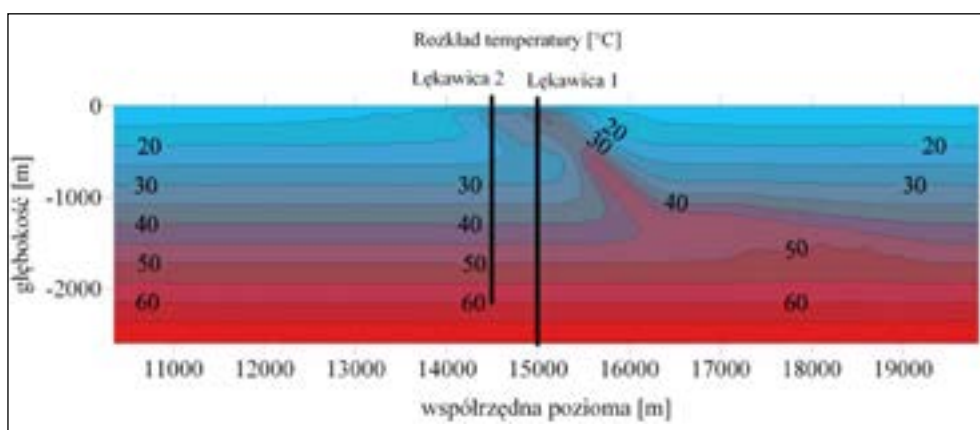
Rys. 6.8. Lokalizacja profilowań geofizycznych oraz obszaru badań anomalii termicznej rejonu Tarnowa PGNiG (Bujakowski red. i in. 2007)

Fig. 6.8. Location of the geophysical surveys and the area of thermal anomalies in Tarnow region (Bujakowski ed. et al. 2007)

- rozpoznanie geofizyczne obszaru anomalii z wykorzystaniem istniejących profilowań sejsmicznych i nowych badań geoelektrycznych wykonanych w ramach projektu,
- opracowanie przekrojów głębokościowych oraz przestrzennego modelu budowy geologicznej w rejonie odwiertów Łękawica-1 i Łękawica-2 umożliwiające szczegółowe rozpoznanie tektoniki i budowy geologicznej strefy anomalii geotermicznej,
- zlokalizowanie anomalii metodami teledetekcji satelitarnej, detekcji kamerą termowizyjną oraz przypowierzchniowym zdjęciem geotermicznym,
- opracowanie modelu koncepcyjnego i numerycznego wymiany ciepła i ruchu płynów w obrębie anomalii geotermicznej dla wyjaśnienia jej genezy,
- opracowanie modelowej metodyki badawczej możliwej do powielenia na innych podobnych obszarach,
- oszacowanie efektywności pozyskania ciepła w zależności od nośnika energii cieplnej.

W ramach realizacji etapu analiz i prospekcji przeprowadzono dyskusję i ocenę istniejących danych archiwalnych. Określono zasięg obszaru objętego badaniami satelitarnymi i lot-

niczymi, określono niezbędny zakres danych otworowych (przyływy, temperatury, litologia i stratygrafia, parametry złożowe) pozyskanych z PGNiG. Analizy objęły charakterystykę hydrogeologiczną i geologiczną rejonu na podstawie udostępnionych kilkudziesięciu otworów naftowych oraz interpretację materiałów satelitarnych głównie z satelity Aster. Objawy anomalii geotermicznej rejestrowane były głównie w etapie wiercenia otworu Łękawica-1 i potwierdzone w otworze Łękawica-2. Krzywe geofizyki otworowej wykazywały znacznie podwyższone temperatury w strefie 50–250 m p.p.t. Potwierdzenie tego zjawiska jedynie marginalnie rysowało się w obrazie satelitarnym zwłaszcza w skali lokalnej. W ramach tego etapu przeprowadzono analizę danych geofizycznych tj. sejsmiki 3D oraz danych wiertniczych. W efekcie analizy opracowano trójwymiarowy model górotworu w strefie otworów Łękawica-1 i Łękawica-2. Interdyscyplinarny zespół badawczy wykonał również testowe pomiary temperatury powierzchni terenu z użyciem kamery termowizyjnej oraz spektrometru termalnego oraz pomiary geotermiczne temperatury w odwiertach wzdłuż wyznaczonego profilu (od zachodu na wschód) przez odwierty: Tarnów 49 – Zawada 3 – Łękawica-2 – Łękawica-1 – Zawada 5k. Wykonano także geofizyczne badania geoelektryczne wzdłuż profilu geotermicznego na odcinku pomiędzy odwiertami Łękawica-1 i 2 wraz z otworami pośrednimi. Badania geoelektryczne obejmowały sondowania elektrooporowe, dipolowe sondowania indukcyjne oraz pomiary indukcyjne przewodności pozornej. Ostatnim etapem prac badawczych była analiza uzyskanych wyników. Prace te obejmowały opracowanie i interpretację danych uzyskanych z pomiarów parametrów geologicznych, hydrogeologicznych, wiertniczych i geofizycznych. Efektem prac były przekroje geologiczne, hydrogeologiczne oraz sejsmiczny model przestrzenny 3D badanego górotworu. Zinterpretowano wyniki badań teledetekcji satelitarnej, zdjęcia termowizyjnego, pomiarów spektrometrem termowizyjnym, geotermicznych profilowań termicznych w przypowierzchniowej strefie oraz geofizycznych badań metodami geoelektrycznymi. Wyniki te jednoznacznie wskazują na obecność anomalii termicznej w strefie przypowierzchniowej. Uzyskane dane i opracowane



Rys. 6.9. Rozkład temperatury w modelowanej strefie nasunięcia karpackiego (Bujakowski red. i in. 2007)

Fig. 6.9. Distribution of the temperature in the modelled area Carpathian overthrust (Bujakowski ed. et al. 2007)

wyniki wykorzystane zostały do opracowania modelu termicznego górotworu (Bujakowski red. 2007), w aspekcie próby wyjaśnienia genezy zaobserwowanych zjawisk.

W efekcie modelowania uzyskano obraz dużych zmian w rozkładzie pola temperatury wzdłuż powierzchni nasunięcia. Rzeczywiste anomalne efekty cieplne mogą być jednak mniejszej skali, ponieważ model pomija roczne i dobowe zmiany w temperaturze powietrza. Na głębokości 5 i 220 m p.p.t. wyraźnie zaznacza się wzrost temperatury spowodowany wpływem ciepłych wód do stwierdzonej podpowierzchniowej przepuszczalnej warstwy poziomej.

Kolejnym przykładem rozpoznania w skali lokalnej są badania wykonane w rejonie wysadu solnego (Bujakowski red. i in. 2003). W Karpatach gradient temperatury kształtuje się od $2,0^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ w otworze Zakopane IG-1 do $3,21^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ w otworze Siekierczyzna IG-1, przy średniej wartości dla całego obszaru wynoszącej $2,35^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Wartości te są zasadniczo niższe od podobnych z platformy prekambryjskiej czy obszaru środkowej Polski, gdzie nad wysadami solnymi osiągają ekstremalne wartości np. $4,13^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ w otworze Dębina 3. Struktury wysadowe są zatem interesującym, potencjalnym źródłem energii cieplnej, które wyraźnie zaznacza swoją obecność w strefie przypowierzchniowej. Strumień cieplny pomierzony nad wysadami solnymi w rejonie Kujaw wynosi od $85\text{ mW}/\text{m}^2$ do $90,8\text{ mW}/\text{m}^2$, co jest wartością dwu–trzykrotnie wyższą od średniej, regionalnej wartości strumienia ciepłego dla obszaru Polski.

Na terenie centralnej Polski rozpoznano kilkadziesiąt wysadowych struktur solnych. Występują one w pasie o szerokości kilkudziesięciu kilometrów, o kierunku północno-zachodnim–południowo-wschodnim. Jedną z tych struktur – wysad solny Góra zlokalizowany koło Inowrocławia, wytypowano do przeprowadzenia badań termicznych dotyczących zjawiska rozchodzenia się ciepła w wysadzie i w jego otoczeniu. Wybór podyktowany był dobrym rozpoznaniem geologicznym wysadu, niewielkimi jego rozmiarami, płytko zalegającą czapą gipsową, istniejącymi drożnymi odwiertami oraz faktem, że sól eksploatowana jest tutaj metodą otworową. Eksploatowana solanka jest źródłem produkcji soli lecz jednocześnie może być wykorzystana jako nośnik energii cieplnej. Badania przeprowadzone zostały w ramach realizacji, kierowanego przez autora, Projektu Badawczego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego pt. „Termiczna charakterystyka górotworu w rejonie wysadów solnych” (Bujakowski i Tarkowski 2003; Bujakowski red. i in. 2003).

W planie poziomym wysad tworzy nieregularną elipsę o wymiarach około $1000 \times 900\text{ m}$. Zwierciadło solne występuje na głębokości od 101–172 m. Złoże soli budują tutaj głównie utwory cyklotemów: PZ2, PZ3 i PZ4, wykształcone jako białe i szare sole kamienne, sole ilaste oraz sole różowe i czerwone z anhydrytem i przerostami soli potasowo-magnezowych. Poziomy wodonośne występują w wapieniach i dolomitach jury otoczenia wysadu, jak też w jego czapie ilasto-gipsowej.

W ramach projektu badawczego zrealizowano zakres badań obejmujący; analizę zdjęć lotniczych i satelitarnych, badania termowizyjne i powierzchniowe pomiary spektrometryczne, geofizyczne badania: geotermiczne, sejsmiki refrakcyjnej i refleksyjnej (płytkie) oraz magnetotelluryczne, modelowanie rozkładu temperatury w obrębie wysadu i eksploatacji

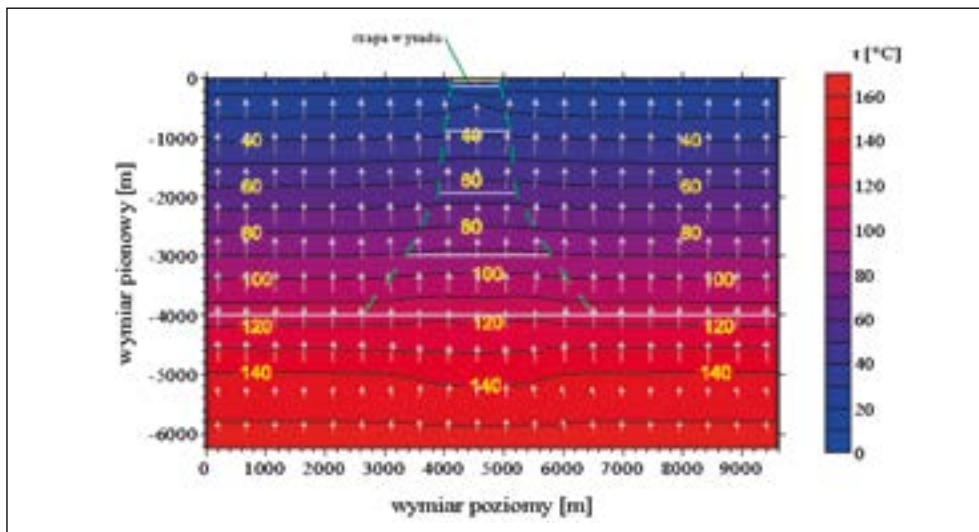
ciepła. Wykorzystanie wielospektralnych zobrażeń satelitarnych systemu LANDSAT 7 (ETM+) oraz cyfrowych zdjęć lotniczych umożliwia wykrywanie anomalii termicznych towarzyszących wysadom solnym. Przeprowadzone badania wskazują, że największym zasobem i różnorodnością informacji tematycznej charakteryzuje się kombinacja kanałów termalnych z pasmami bliskiej i środkowej podczerwieni. Obserwowane różnice temperatury rzeczywistej są rzędu 2–3°C. Zbliżone wyniki uzyskano z badań termowizyjnych, które ukazują wyraźną tendencję spadku temperatury począwszy od strefy wysadu w kierunku jego przedpoła. Również zobrazenie termiczne wykonane z balonu ujawniło występowanie zróżnicowania temperatury na badanym obszarze i jej obniżanie się wraz z oddalaniem się od centrum wysadu (Bujakowski red. i in. 2003).

Wyniki interpretacji spektrometrycznego profilowania gamma i profilowania temperatury wykonanego w otworach w sąsiedztwie wysadu solnego Góra, pozwoliły na oszacowanie wartości ciepła radiogenicznego i powierzchniowego strumienia ciepła w rejonie badań. Średni gradient obliczony dla otworu G24 wyniósł $G = 2,9672^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Płytkie badania geotermiczne potwierdziły, że wysad solny Góra jest miejscem, gdzie temperatura nad wysadem jest wyższa w stosunku do otoczenia. Amplitudy różnic temperatur w badanych profilach są znaczące i wynoszą do 1,4°C, a obszar o podwyższonej temperaturze nie pokrywa się dokładnie z wyznaczoną przez kopalnię granicą wysadu na głębokości 150 m p.p.t. (Bujakowski red. i in. 2003). Płytkie badania sejsmiki refrakcyjnej i refleksyjnej oraz badania magnetoteluryczne, umożliwiły uszczegółowienie danych o kształcie wysadu solnego, jego granicy, przebiegu stropu i spągu czapy. Pokazują one bardziej skomplikowany od znanego obraz wysadu, szczególnie w jego brzeżnej części (Bujakowski red. i in. 2003).

Model numeryczny wymiany ciepła oraz rozkładu temperatury w obrębie wysadu i w skałach wokół niego pokazał, że przypowierzchniowa część wysadu wykazuje anomalnie wysoką wartość temperatury. Część dolna wysadu wykazuje natomiast niższe temperatury w porównaniu do skał otaczających, zalegających na tym samym poziomie. Na głębokości 4400 m p.p.t. znajduje się obszar, dla którego izotermy mają niemal poziomy przebieg (rys. 6.10) (Bujakowski red. i in. 2003).

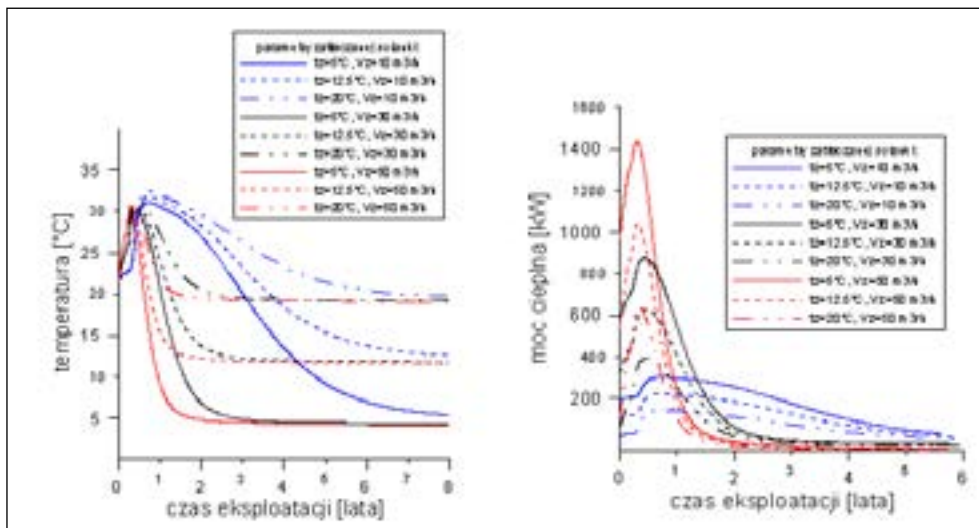
Badaniami modelowymi wykazano także, że analizowany wysad solny może być atrakcyjnym źródłem energii. Szczególnie interesujący jest interwał głębokościowy od powierzchni spągu czapy gipsowej do głębokości, na której temperatura wysadu jest równa temperaturze otaczających go skał (100–4400 m p.p.t.) Charakteryzuje się on dodatnią anomalią termiczną w porównaniu z sąsiedztwem wysadu. Eksploatację energii cieplnej analizowano w układzie poboru solanki ze stropowej części komory eksploatacyjnej, zatłaczanie solanki przewidziano przy jej spągu. Przeanalizowano warianty zmian parametrów eksploatacyjnych (temperatury solanki wtłaczanej do komory i jej strumienia) (rys. 6.11) (Bujakowski red. i in. 2003).

Wielkością określaną na drodze modelowania numerycznego była temperatura eksploatowanej solanki oraz rozkład temperatury w obrębie komory i w jej sąsiedztwie. Stwierdzono, że solanka wypełniająca istniejące komory eksploatacyjne może być dobrym nośnikiem energii geotermicznej, a pozyskanie mocy rzędu 1 MW przy temperaturze nośnika około 30°C jest z technicznego punktu widzenia w pełni realne (Bujakowski red. i in. 2003).



Rys. 6.10. Rozkład pola temperatury i schemat przepływu ciepła w obrębie i w otoczeniu wysadu solnego Góra (linia cięcia NW-SE) (Bujakowski red. i in. 2003)

Fig. 6.10. Field distribution diagram of the temperature and heat flow within and surrounded by the salt dome Góra (the cutting line NW-SE) (Bujakowski ed. et al. 2003)



Rys. 6.11. Prognoza temperatury i mocy ciepłej możliwych do pozyskania z wysadu solnego Góra w funkcji czasu i strumienia zatłaczanej solanki (Bujakowski red. i in. 2003)

Fig. 6.11. Forecasts of the temperature and thermal power possible to obtain the salt dome Góra as a function of time and the injection of brine stream (Bujakowski ed. et al. 2003)

7. Etap projektowania i wykonania ujęcia wód

Etap projektowania i wykonania ujęcia wód rozpoczyna się opracowywaniem założeń do wykonania badawczych prac geologicznych i przeprowadzenia testów hydrogeotermalnych jednoznacznie ustalających parametry wód podziemnych. Prace geologiczne polegają na wykonaniu odwiertu udostępniającego zbiornik wodonośny oraz przeprowadzeniu wielu badań (m.in. hydrogeologicznych, geologicznych, geofizycznych, złożowych), realizowanych na podstawie Projektu Robót Geologicznych (PRG) kiedyś nazywanego Projektem Prac Geologicznych.

Projekt zawiera syntezę wcześniej wykonanych badań i na tej podstawie umożliwia wskazanie optymalnej metody postępowania przy głębszym ujęciu geotermalnego. Wymagania formalne jakie powinien spełniać projekt oraz jego zakres merytoryczny określone są w Prawie Geologiczno-Górnictwem. Projekt Robót Geologicznych uzupełniony o Decyzję Środowiskową (wydawaną w na podstawie Raportu Oddziaływania na Środowisko) stanowi załącznik do wniosku o zatwierdzenia planowanych prac rozpoznania i poszukiwania wód geotermalnych. Formalnie wniosek taki składany jest w odpowiednim lokalizacyjnie urzędzie marszałkowskim. Po otrzymaniu pozytywnej decyzji zatwierdzającej PRG przedsiębiorca może przystąpić do fazy wykonania odwiertu i badań ujęcia wód.

Wyniki z przeprowadzonych prac geologicznych i badań złożowych zestawiane są w odpowiednich dokumentacjach (hydrogeologicznej lub innej).

Zadania badawcze objęte tym etapem projektowania i wykonania ujęcia wód są zawarte w Dokumentacji Projektowej (PRG) i Dokumentacji Hydrogeologicznej (zasobowej).

Wiedza o systemie geotermalnym, niezbędna w tych etapach rozwoju projektu, obejmuje dane dotyczące:

- budowy geologicznej złoża geotermalnego i jego otoczenia,
- gabarytów i kształtu zbiornika z określeniem jego wartości granicznych,
- zasobów cieczy oraz energii,
- parametrów złożowych oraz stabilności ich wartości w długim okresie czasu (tzw. żywotność zasobów),
- właściwości skał zbiornikowych (chemiczne, fizyczne itd.),
- właściwości cieczy złożowych (chemiczne, fizyczne),
- technicznej budowy odwiertu oraz stanu jego elementów (rury, filtr, głowica).

Przedstawiony zakres obejmuje wszystkie, wymagane przepisami formalnymi elementy dokumentacji projektowej. O ile pierwszych 6 zadań jest przedmiotem analiz przeprowadzonych w opisanych wcześniej etapach badawczo-analitycznych rozpoznania i może być bezpośrednio wykorzystane do opracowania PRG, o tyle ostatnie zadanie dotyczące technicznego wyposażenia odwiertu wymaga dodatkowych analiz.

W IGSMiE PAN opracowano pod kierunkiem autora wiele projektów ujęć geotermalnych nowych odwiertów geotermalnych: dla Podhala otworu Bańska PGP-1 (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 1995), dla Słomnik – otworu Słomniki GT-1 (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2000), dla Polany Szymoszkowej – otwór Szymoszkowa GT-1 (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2005d), dla Wierzchosławic (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2009e,g), dla Nysy (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2011c, d).

Także stare istniejące odwierty były przedmiotem PRG lub programów dotyczących prac rekonstrukcyjnych. Wykonano je m.in. dla Mszczonowa, dla Skierniewic (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2005c), dla Łowicza (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2009f), dla Poręby Wielkiej (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2010c), Krynicy (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2013b).

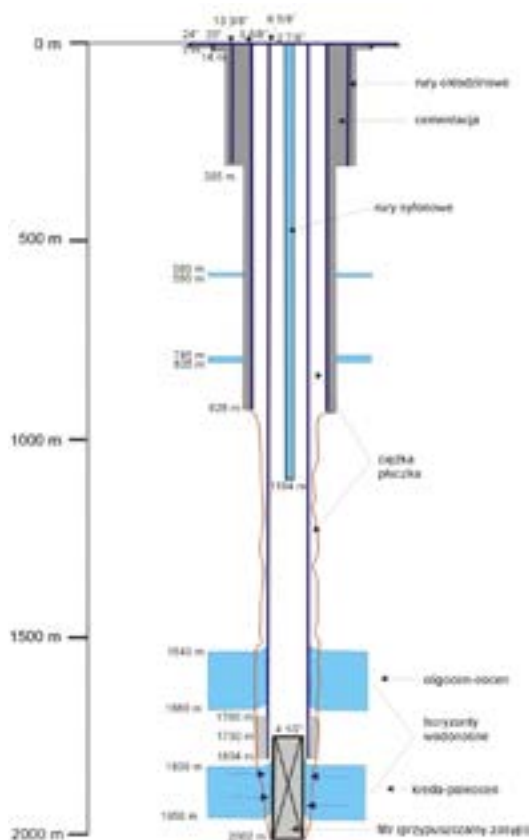
Wymienione Projekty Robót Geologicznych dotyczące nowych, jak i starych odwiertów uzyskały odpowiednie (różne w różnych okresach czasu) zatwierdzenia i większość z nich zakończyła się wykonaniem prac ujęcia wód. Materiały te znajdują się w archiwum zamawiającego i IGSMiE PAN i nie były publikowane.

Wykonanie odwiertów ma na celu udostępnienie złoża i przeprowadzenie testów, na podstawie których opracowywana jest dokumentacja hydrogeologiczna określająca zasoby wód złożowych z danego odwiertu (Kapuściński i in. 1997). Dokumentacja taka jest podstawą do wystąpienia o koncesję na eksploatację wód geotermalnych z ujęcia. W IGSMiE PAN opracowano pod kierunkiem autora wiele takich dokumentacji, m.in. dla: otworów Biały Dunajec PAN-1 i Bańska IG-1 (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 1998), otworu Mszczonów IG-1 (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2002), otworu Słomniki GT-1 (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2001a), otworu Szymoszkowa GT-1 (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2007b), otworu Poręba Wielka IG-1 (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2013a), otworów Skierniewice GT-1 i Skierniewice GT-2. Ponadto współpracowano przy opracowaniu dla otworu Czarny Potok GT-1 dokumentacji wynikowej, nie hydrogeologicznej ze względu na to iż nie uzyskano w nim dopływu wód złożowych.

Głównym problemem badawczym etapu projektowania jest zatem konstrukcja odwiertu, jego uzbrojenie wraz z oceną stanu technicznego oraz możliwości produkcyjne ujęcia otworowego. PRG jest wymagany przy zamiarze wykonania nowego otworu jak i przy wykorzystaniu już istniejącego starego odwiertu (Biernat i in. 2009).

Projekty nowego otworu bazują na technologiach stosowanych w górnictwie naftowym (Kapuściński i in. 1997), aczkolwiek ciągle wzbogacane są o elementy poprawiające właściwości chłonne złoża czy też odporność na korozję. Jedną z możliwych klasycznych konstrukcji odwiertu ujmującego wody złożowe wraz ze szczegółami jego faktycznego stanu technicznego (np. głębokości zarurowania, obecność rur tzw. rur syfonowych, filtr

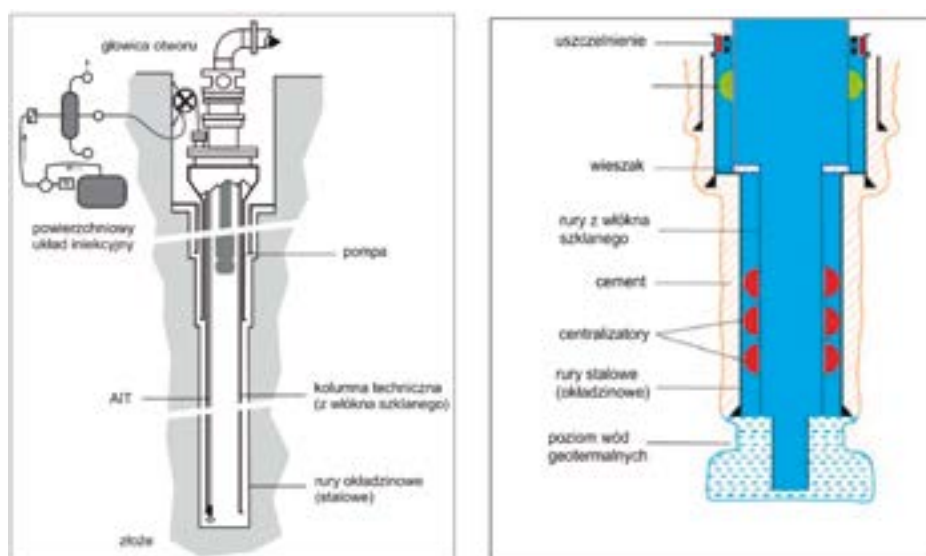
z przypuszczalnym zasypem, sposób wypełnienia przestrzeni pozarurowej) przedstawiono na przykładzie odwiertu Poręba Wielka IG-1 (rys. 7.1) (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2013c).



Rys. 7.1. Schemat konstrukcji otworu Poręba Wielka IG-1 przed rekonstrukcją (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2013c)

Fig. 7.1. Scheme of construction Poręba Wielka IG-1 well before reconstruction (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2013c)

Na rysunku 7.2 przedstawiono przykładowe konstrukcje otworów geotermalnych wzbogacone o nowe rozwiązania, szczególnie dedykowane przemysłowi geotermalnemu (Kępińska i Bujakowski red. 2011). W Polsce rury z włókna szklanego wykorzystano w konstrukcji odwiertów w Toruniu oraz w Kleszczowie. Technologia ta wymaga specjalistycznych urządzeń, różniących się od standardowych, stosowanych dla rur stalowych i znacznie większej precyzji wykonywania prac, co związane jest z niższą odpornością mechaniczną fibreglassu. Problemem zasadniczym upowszechnienia technologii może być większy koszt, na który składa się koszt materiału i robocizny, szacowany na około 20–30% wyższy niż dla standardowej technologii. Zastosowanie w otworze dodatkowego przewodu umożliwiającego wprowadzenie do strefy złożowej inhibitorów korozji i wytrącania osadów (rys. 7.2) ma miejsce w wielu



Rys. 7.2. Schematy otworów geotermalnych (Kępińska, Bujakowski red. 2011)
 z lewej – wyposażony w przewód iniekcyjny (AIT) do zatłaczania inhibitorów (wg Ungemach 2001),
 z prawej – z kolumną eksploatacyjną rur z włókna szklanego zapuszczonych do otworu wyposażonego w stalowe
 rury okładzinowe (wg Andritsos i in. 2010)

Fig. 7.2. Schemes geothermal wells (Kępińska, Bujakowski ed. 2011)
 on the left – with the injection pipeline (AIT) for pumping of inhibitors (by Ungemach 2001);
 on the right – fiberglass pipes fitted inside steel tubing (according Andritsos et al. 2010)

instalacjach np. w Basenie Paryskim w ponad 30 obiektach (Ungemach 2001), w Polsce do-
 tychczas nie zastosowano tego rozwiązania (Kępińska i Bujakowski red. 2011).

Stare, istniejące niekiedy od dziesiątek lat, odwierty wykonywane były do celów nafto-
 wych albo geologiczno-strukturalnych. Nie były one nastawione na rozpoznanie i ujęcie za-
 sobów wód geotermalnych do celów eksploatacji. Z tego względu mają zwykle konstrukcję,
 a szczególnie zarurowanie uniemożliwiające ich prostą adaptację do celów geotermalnych.
 Szacuje się, że spośród kilku tysięcy głębokich odwiertów istniejących na obszarze Polski,
 tylko niewielki procent nadaje się do odzyskania i zagospodarowania. Przykład takiej oceny
 zawarto w rozdziale 5 przy opisie rozpoznania w skali regionalnej powiatu piotrkowskiego,
 gdzie spośród ponad 50 odwiertów wstępnie wytypowano jedynie 10 (Bujakowski red. i in.
 2014). Z pewnością można stwierdzić, że liczba ta jeszcze uległaby zmniejszeniu na etapie
 szczegółowej analizy dostępnych dokumentacji. Niemniej jednak zagospodarowanie starych
 odwiertów może być bardzo atrakcyjne głównie z ekonomicznego punktu widzenia po prze-
 prowadzeniu ich rekonstrukcji. W aspekcie geotermalnym rekonstrukcja dotyczy 3 obsza-
 rów działań na odwiercie, tj:

- odtworzenia obiektu zniszczonego lub zlikwidowanego,
- odnowienie istniejącego obiektu,
- naprawa całego lub części istniejącego obiektu.

Zgodnie z tym możemy wydzielić kompletną lub częściową rekonstrukcję takich obiektów jak odwierty geologiczne. Rekonstrukcja odwiertu obejmuje wiele czynności prowadzących do poprawy lub naprawy jego stanu technicznego konstrukcji wgłębnej i powierzchniowej przygotowując w ten sposób odwiert do pracy.

Odwierty prowadzone przez Państwowy Instytut Geologiczny-Państwowy Instytut Badawczy to wiercenia o charakterze badawczo-rozpoznawczo-strukturalnym i dlatego zwykle były wykonywane do większych głębokości, większymi średnicami i pełniej opróbowywane w porównaniu do wierceń wykonywanych dla przemysłu naftowego. Z tych powodów odwierty PIG-u są bardziej przydatne dla projektowanej rekonstrukcji, aczkolwiek zdarza się, że i odwierty naftowe mogą spełniać kryteria rekonstrukcji, czego przykładem jest projekt rekonstrukcji odwiertu naftowego Kompina 2.

W Polsce wykonano liczne rekonstrukcje odwiertu w celu wykorzystania go do pracy w systemie geotermalnym. Odwierty, w których je zrealizowano lub zaprojektowano, można podzielić na cztery grupy w zależności od skali i zakresu tych prac:

- **Grupa I.** Odwierty objęte kompletną rekonstrukcją – po wykonaniu poddane zostały całkowitej likwidacji z rekultywacją terenu i likwidacją miejsca wiercenia, np:
 - odwiert Mszczonów IG-1 (wykonany w 1977 r. – zrekonstruowany w 1999 r.),
 - odwiert Kompina 2 (z 1981 r. – z zaprojektowaną, niezrealizowaną rekonstrukcją w 2009 r.).
- **Grupa II.** Odwierty tzw. zastawione, czasami z udokumentowanymi zasobami wód geotermalnych i posiadające wyposażenie powierzchniowe, do tej grupy zaliczono, np:
 - odwiert Bańska IG-1 (wykonany w 1981 r. – zrekonstruowany i uruchomiony w 1993 r.),
 - odwiert Poręba Wielka IG-1 (z 1975 r. – zrekonstruowany w 2010 r.),
 - dublet odwiertów Skierniewice GT-1 i Skierniewice GT-2 (odpowiednio z 1991 i 1997 r. – z projektem wykorzystania z 2011 r.),
 - 3 odwierty w Uniejowie (wykonane po 1978 r. – uruchomione w 2001 roku.).
- **Grupa III.** Odwierty, które uległy uszkodzeniu w trakcie kilkuletniej pracy w systemie dubletu eksploatacyjno-chłonnego lub w których znacząco obniżyły się parametry złożowe, np:
 - odwiert Biały Dunajec PAN-1 (wykonany w 1990 r. – uruchomiony w 1993 r. naprawiany w 2011 r. i w 2014 r.),
 - 4 odwierty w Pyrzycach (wykonane po 1992 r. – uruchomione w 1997, później kilkakrotnie modyfikowane i uzdatniane),
 - odwiert Stargard Szczeciński GT-2 (wykonany w 2005 r. – naprawiany w 2012 r.).
- **Grupa IV.** Odwierty, które nie osiągnęły celu geologicznego i zostały poddane rekonstrukcji w kierunku wykorzystania innego niż jako ujęcie wód np. jako wgłębnego otworowego wymiennika ciepła, np:
 - odwiert Czarny Potok GT-1 w Krynicy (wykonany w 2011 r. z zaprojektowaną rekonstrukcją z 2012 r.).

Dla każdego z wymienionych obiektów zakres prac rekonstrukcyjnych był inny. Największy zakres miała rekonstrukcja otworu Mszczonów IG-1, który po zakończeniu prac wiertniczych w 1977 roku został całkowicie zlikwidowany z pełną rekultywacją terenu wiertni do stanu umożliwiającego prowadzenie placu handlowego w miejscu otworu. Pełnej likwidacji poddano także otwór Kompina 2, jednakże zaprojektowana rekonstrukcja nie została tu przeprowadzona. Z powyższej listy obiektów należy wyodrębnić specyficzny przypadek odwiertu Czarny Potok GT-1. Odwiert ten nie jest obiektem starym, ale ponieważ nie udostępnił wód złożowych a był bardzo głęboki, inwestor zainteresował się możliwością wykorzystania go jako otworowego wymiennika ciepła. Projekt niestety nie został do chwili obecnej zrealizowany. Technologia została zgłoszona do opatentowania (Bujakowski i in. 2014).

Przypadki projektów i wykonanych rekonstrukcji w otworach: Bańska IG-1, Poręba Wielka IG-1 i Skierniewice GT-1 i GT-2 obejmują podobny zakres. Odwierty te po wierceniu zaopatrzone zostały w głowice, a teren bodni zabezpieczony (rys. 7.3). Rekonstrukcja objęła w tych przypadkach udrożnienie rur okładzinowych ich czyszczenie i kontrolę szczelności oraz uruchomienie pracy złoża.

Przykładem rekonstrukcji poprzez naprawę kolumny eksploatacyjnej rur są prace zrealizowane w otworze Biały Dunajec PAN-1. Wykonany był on przez IGSMiE PAN w 1990 roku i funkcjonował jako odwiert chłonny do 2003 roku, kiedy to stwierdzono nieszczelność rur okładzinowych kolumny eksploatacyjnej 9 5/8". Odwiert został wyłączony z eksploatacji i w 2011 roku przeprowadzono jego rekonstrukcję, polegającą na naprawie uszkodzonej kolumny rur poprzez wprowadzenie rur 7" i ich zacementowanie (Dubiel i in. 2012). W na-



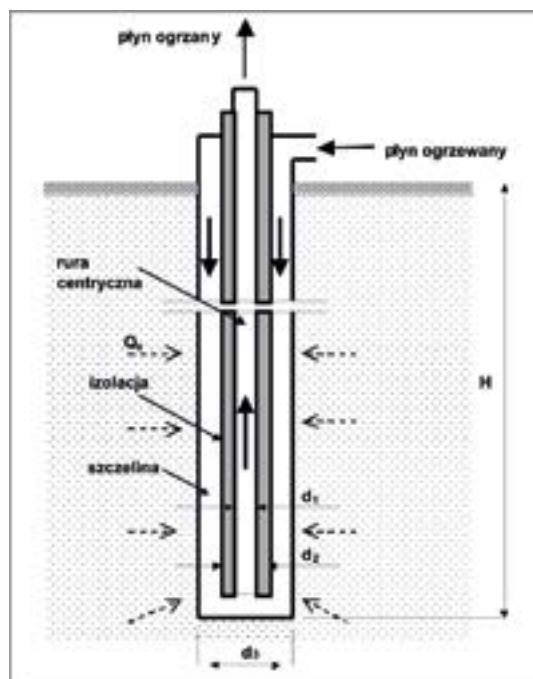
Rys. 7.3. Odwiert Skierniewice GT-1 stan po wykonaniu prac w 1991 r. (zdjęcie z 2005 r. S. Graczyka)
(Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2005c)

Fig. 7.3. The Skierniewice GT-1 well status after execution of work in 1991 (picture from 2005. S. Graczyk)
(Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2005c)

stępnym latach odwiert nie pracował prawidłowo i zdecydowano się na przeprowadzenie prac rekonstrukcyjnych polegających na likwidacji dolnej partii otworu i wykonanie odbicia kierunkowego udostępniającego nową partię złoża. W trakcie realizacji robót geologicznych stwierdzono potrzebę pogłębienia otworu o około 125 m (TVD) dla uzyskania w ten sposób znacznie większego interwału udostępniającego złoża (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2014).

Inne przykłady badań związanych z etapem projektowania i wykonania ujęcia wód dotyczą możliwości wykorzystania starych odwiertów jako głębokich wymienników ciepła.

W 2000 roku zakończona została realizacja Projektu Badawczego finansowanego przez Komitet Badań Naukowych pn. „Efektywność wykorzystania istniejących odwiertów wiertniczych jako wymienników ciepła geotermalnego” (Pająk i Bujakowski 2000). Kierownikiem projektu był autor, natomiast głównym wykonawcą dr inż. Leszek Pająk, który zrealizował część numeryczną i obliczeniową modelowanej pracy wymiennika geotermalnego. Badania dotyczyły oceny możliwości wykorzystania „starych” odwiertów jako potencjalnego źródła ciepła. Tematyka ta była także przedmiotem badań zespołu naukowców z AGH (Gonet i in. 2010, 2011; Śliwa i in. 2012). Hipotetyczny odwiert został poddany modelowaniu jako wymiennik ciepła umieszczony w utworach zalegających pod powierzchnią Ziemi. Wymienniki takie pozwalają pozyskać zakumulowaną w skałach otaczających energię geotermiczną i słoneczną. Analizując wykorzystanie istniejących odwiertów, których głębokość



Rys. 7.4. Schemat pionowego wymiennika ciepła (Pająk i Bujakowski 2000)

Fig. 7.4. Scheme of vertical heat exchanger (Pająk and Bujakowski 2000)

zwykle przekracza kilkaset metrów, bierze się pod uwagę głównie energię geotermiczną. Schemat analizowanego układu przedstawiono na rysunku 7.4 (Pająk i Bujakowski 2000).

Układ zbudowany jest z dwóch współosiowo umieszczonych rur o różnych średnicach. Płyn ogrzewany przepływa szczeliną między rurami odbierając ciepło od skał. Ogrzany płyn wpływa do rury wewnętrznej i przetłaczany jest na powierzchnię. Prędkość płynu w rurze wewnętrznej, z uwagi na małą powierzchnię czynną dla przepływu, jest wysoka. Wysoki jest również współczynnik przejmowania przez ten płyn ciepła. Płyn w rurze wewnętrznej, na danej głębokości, posiada wyższą temperaturę od płynu w szczelinie i oddaje mu ciepło ochładzając się. Przez wzgląd na to, że temperatura płynu na wylocie z wymiennika powinna być możliwie wysoka należy przeciwdziałać temu procesowi. Jedną z metod temu służących jest izolowanie rury wewnętrznej. Zastosowanie izolacji powoduje równocześnie spadek przekroju czynnego dla przepływu i wzrost prędkości przepływu płynu w szczelinie, ma to wpływ na wzrost intensywności odbierania ciepła od złoża. Pamiętać należy o tym, że wraz z kwadratem prędkości rosną opory przepływu. Wysoka ich wartość wymusza stosowanie pomp obiegowych o dużych mocach i podnosi koszty eksploatacji układu wymiennika (Pająk i Bujakowski 2000).

W trakcie eksploatacji wymiennika na skutek odbierania ciepła następuje wychłodzenie złoża w jego sąsiedztwie (Pająk i Bujakowski 2000). Doprowadza to do spadku różnicy temperatury pomiędzy złożem a płynem przepływającym w szczelinie. Konsekwencją omówionego zjawiska jest sukcesywny spadek mocy termicznej wymiennika w czasie jego eksploatacji. Na podstawie danych eksploatacyjnych stwierdzono, że zasięg wpływów termicznych wymiennika zwykle nie przekracza 10 m (Pająk i Bujakowski 2000).

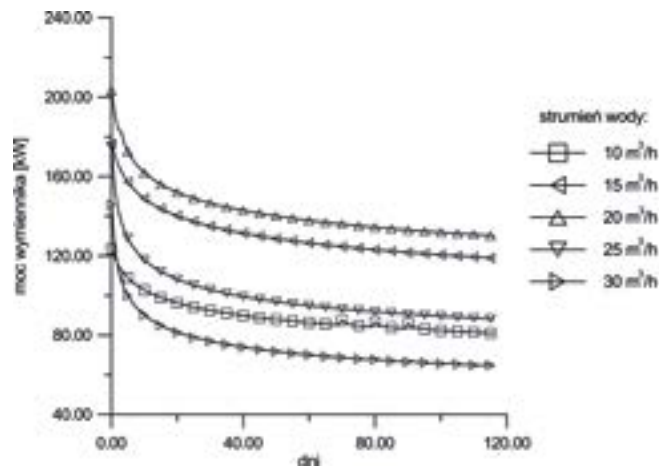
W czasie zatrzymania pracy wymiennika latem eksploatowane złożo podlega naturalnej regeneracji cieplnej. Można je także potraktować jako obiekt, w którym latem można akumulować ciepło pochodzące z instalacji klimatyzacyjnych. Zaletą tego rozwiązania jest efektywna wymiana ciepła pomiędzy płynem ogrzany w instalacji klimatyzacyjnej a złożem, posiadającym w lecie niską temperaturę na skutek odbioru ciepła w sezonie grzewczym. Energia cieplna zakumulowana w złożu jest z niego odzyskiwana w sezonie grzewczym. Opisany sposób regeneracji cieplnej złoża można nazwać regeneracją sztuczną. Wobec tego, w celu poznania zjawisk jakie mają miejsce w trakcie eksploatacji pionowych wymienników ciepła o przepływie koncentrycznym, kluczowym problemem jest opisanie wymiany ciepła w wymienniku i złożu z nim sąsiadującym (Pająk i Bujakowski 2000). Pomimo wielu problemów technologicznych związanych z izolacją wewnętrznej rury eksploatacyjnej i ewentualne izolowanie części przypowierzchniowej wymiennika ciepła, podatnej na wpływ warunków atmosferycznych, należy jednak wskazać na zalety systemu. Do wybranych zalet, w stosunku do konwencjonalnych zakładów geotermalnych, należą:

- brak ryzyka związanego z wierceniem, udostępnieniem, eksploatacją i zatłaczaniem wody złożowej,
- możliwa powszechność zastosowania,
- brak ingerencji w równowagę hydrologiczną poziomu wodonośnego,
- długa żywotność systemu praktycznie bez zużycia elementów w otworze,

- całoroczne źródło ciepła,
- brak zagrożeń ekologicznych,
- zagospodarowanie istniejących otworów (odzyskanie poniesionych nakładów).

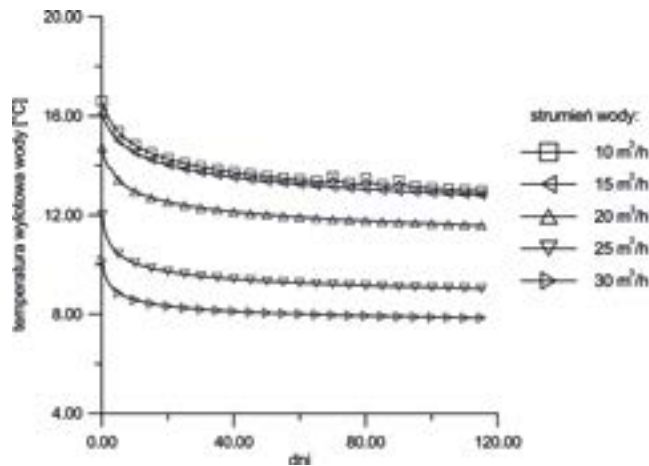
Jednym z analizowanych przypadków był odwiert o głębokości 645 m usytuowany w centralnej Polsce w rejonie miasta Skierniewice, który przewiercił utwory czwartorzędu, trzeciorzędu oraz częściowo utwory kredy górnej (Pająk i Bujakowski 2000).

Głównym wynikiem modelowania był rozkład mocy układu w czasie oraz temperatura płynu na wypływie (rys. 7.5 i 7.6). Obliczeń dokonano dla pięciu różnych strumieni przepływu wody przez wymiennik przy ciągłej jego eksploatacji, zarówno w okresie zimy, jak i lata.



Rys. 7.5. Rozkład w czasie mocy wymiennika o głębokości 645 m (Pająk i Bujakowski 2000)

Fig. 7.5. Changes of heat power in time in the heat exchanger with a depth of 645 m (Pająk and Bujakowski 2000)



Rys. 7.6. Temperatura płynu na wyjściu z wymiennika o głębokości 645 m (Pająk i Bujakowski 2000)

Fig. 7.6. Fluid temperature at the outlet of the depth of 645 m (Pająk and Bujakowski 2000)

Założona temperatura zatłaczania wody do wymiennika była stała w czasie dla wszystkich przypadków i wynosiła 6°C.

Wykonana analiza wykazała, że pomimo bardzo wielu zalet modelowanego układu, możliwe do pozyskania w długiej perspektywie czasu moce nie przekraczają 100 kW przy temperaturze na wypływie rzędu 10°C (Pająk i Bujakowski 2000). Parametry te mogą być brane pod uwagę w analizach oceniających efektywność energetyczną i ekonomiczną planowanego przedsięwzięcia. W wyniku projektu opracowano model numeryczny umożliwiający określenie parametrów energetycznych, możliwych do pozyskania ze „starych” odwiertów np. ponaftowych, jak również z pionowych wymienników otworowych powszechnie stosowanych jako dolne źródło energii sprężarkowych pomp ciepła.

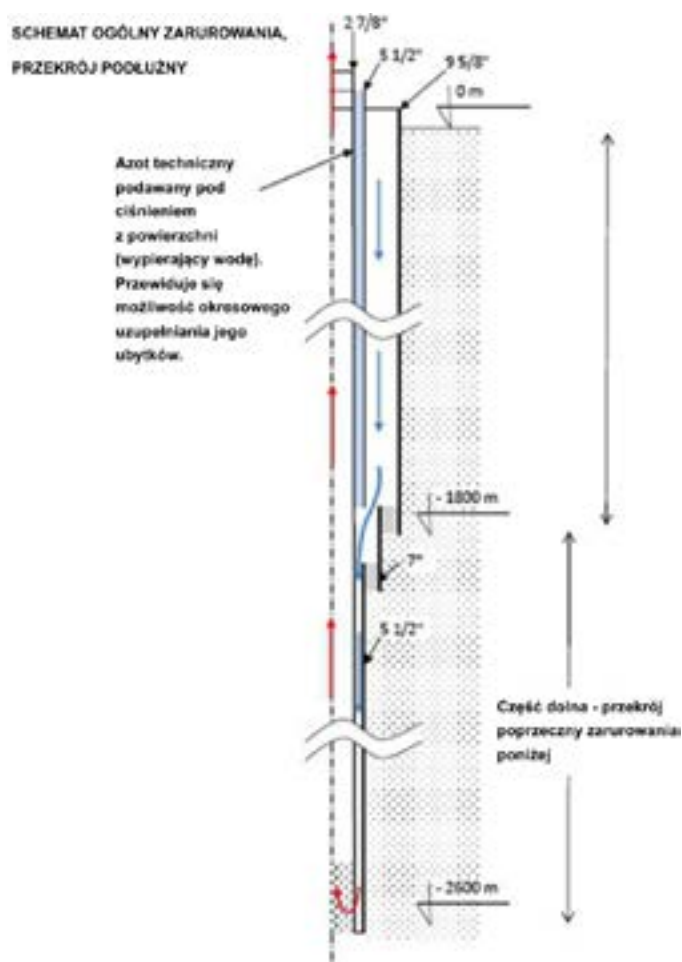
Wyniki projektu były wykorzystane m.in. do modelowania wychłodzenia przez górotwór wód w trakcie ich eksploatacji, a także przy opracowaniu konstrukcji wglębnego wymiennika ciepła zaprojektowanego w ramach rekonstrukcji otworu Czarny Potok GT-1 (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2013c). Zadanie badawcze postawione tu przez inwestora dotyczyło wskazania sposobu zagospodarowania głębokiego odwiertu Czarny Potok GT-1. Zrealizowane prace geologiczne pozwoliły na rozpoznanie budowy geologicznej głęboko zalegających partii utworów fliszowych jednostki magurskiej na terenie Krynicy (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2011b). Jest to jednocześnie pierwszy głęboki otwór, o głębokości 2853,3 m wykonany w rejonie Krynicy. W wyniku przeprowadzonych prac geologicznych nie stwierdzono występowania w otworze wody geotermalnej. W związku z negatywnym efektem geologicznym, czyli brakiem uzyskania przyływu wody geotermalnej w otworze Czarny Potok GT-1 opracowana została inna dokumentacja geologiczna i otwór zlikwidowano. W 2012 roku został przygotowany w IGSMiE PAN „Projekt robót geologicznych na wykorzystanie ciepła Ziemi otworem Czarny Potok GT-1” (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2013b), którego celem jest pozyskanie ciepła Ziemi z otworu Czarny Potok GT-1, poprzez zaadaptowanie obecnej jego konstrukcji na potrzeby otworowego, współosiowego wymiennika ciepła.

Było to pierwsze tego typu zadanie realizowane w Polsce, podobne rozwiązania funkcjonują już w Europie, m.in. w Prenzlau (Niemcy), Weggis i Bad Weisbach (Szwajcaria) w Altheim w Austrii. W 2006 r. zakończono podobny projekt w Aachen, a w 2007 r. w Arnsberg w Niemczech (Doelling i Schulte, 2009). Według przeprowadzonych badań modelowych wykorzystujących wyniki wcześniej opisanego projektu badawczego (Pająk i Bujakowski 2000) oszacowano, że możliwe jest pozyskanie około 250–300 kWt mocy cieplnej.

Analizując istniejące wyposażenie otworu założono, że otwór zagospodarowany zostanie do głębokości 2600 m, konstrukcja otworowego, wglębnego wymiennika ciepła będzie szczelna, medium (woda obiegowa) nie będzie kontaktować się bezpośrednio ze środowiskiem skalnym, a jej ogrzanie nastąpi poprzez kontakt ze stalowymi rurami osłonowymi. System grzewczy wymagał będzie wykorzystania sprężarkowych pomp ciepła. W projekcie robót geologicznych przewidziano wykonanie wyłącznie robót geologicznych (wiertniczych) w obrębie istniejącej konstrukcji otworu, bez ingerencji w górotwór. Otwór Czarny Potok GT-1 został zlikwidowany w sposób umożliwiający jego zagospodarowanie we wska-

zonym celu. Wykorzystana zostanie pozostawiona w otworze konstrukcja rur okładziniowych, która będzie stanowić jeden z elementów wglębnego otworowego wymiennika ciepła. Bezpośrednie pozyskiwanie ciepła Ziemi za pomocą współosiowego wymiennika ciepła, z zamkniętym obiegiem wody jest bezpieczne dla środowiska. Zaprojektowany wymiennik ciepła składać się będzie z konstrukcji rur stalowych, stanowiących obudowę zewnętrzną oraz rur produkcyjnych – cienkich koncentrycznych rur posadowionych w tejże obudowie (rys. 7.7, Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2013b).

Kolumnę zewnętrzną w analizowanym przypadku pełnić będzie obecna konstrukcja otworu Czarny Potok GT-1. Pomiędzy rurami zewnętrzną i wewnętrzną znajdować się będzie dodatkowo płyn izolujący (azot techniczny bądź olej mineralny), co pozwoli na ogra-



Rys. 7.7. Schematyczna konstrukcja otworowego, współosiowego wymiennika ciepła Czarny Potok GT-1 (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2013b)

Fig. 7.7. Schematic construction of coaxial heat exchanger Czarny Potok GT-1 (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2013b)

niczenie strat ciepła na drodze przepływu wody w otworze. Jako medium pozyskujące ciepło z górotworu wykorzystana zostanie woda, o niskim stopniu twardości węglanowej. Najlepszym rozwiązaniem jest wykorzystanie niskozmineralizowanej wody o parametrach zbliżonych do wody kotłowej. Zimna woda pompowana będzie do przestrzeni (rys. 7.7), gdzie na drodze przepływu do dna otworu odbierze ciepło z górotworu. Ogrzana woda zostanie wytłoczona na powierzchnię przez kolumnę rur produkcyjnych. Wymiennik ciepła będzie posiadał całkowicie zamknięty obieg wody. Brak bezpośredniego kontaktu medium z górotworem zapewni szczelna zabudowa kolumny rur osłonowych (zewnątrznych) (Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2013b).

W niniejszym projekcie robót geologicznych efektem badawczym jest przedstawienie innowacyjnego sposobu osiągnięcia celu komercyjnego, jakim było zagospodarowanie istniejącego „suchego” głębokiego odwiertu poprzez zastosowanie specjalnego wyposażenia otworowego. Przewidziane prace obejmowały następujące zadania:

- udostępnienie otworu Czarny Potok GT-1 poprzez zwiercenie korków cementowych i oczyszczenie otworu,
- zapuszczenie i posadowienie dodatkowych dwóch kolumn rur 5 1/2” oraz 2 7/8”,
- montaż specjalnej powierzchniowej głowicy geotermalnej,
- włożenie do otworu wody (medium) oraz płynu izolującego (najlepiej azot techniczny).

Realizacja pełnego zakresu rekonstrukcji winna umożliwić przynajmniej częściowe odzyskanie poniesionych nakładów na prace wiertnicze poprzez pozyskanie energii geotermicznej, która mogłaby być wykorzystana do celów rekreacyjnych, prognozowane parametry zestawiono w tabeli 7.1. Opracowana technologia jest przedmiotem zgłoszenia patentowego (Bujakowski i in. 2014).

Tabela 7.1

Prognozowane parametry eksploatacyjne otworowego wymiennika ciepła Czarny Potok GT-1
(Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2013b)

Table 7.1

Projected operating parameters borehole heat exchanger Czarny Potok GT-1
(Praca zbiorowa pod kier. Bujakowskiego 2013b)

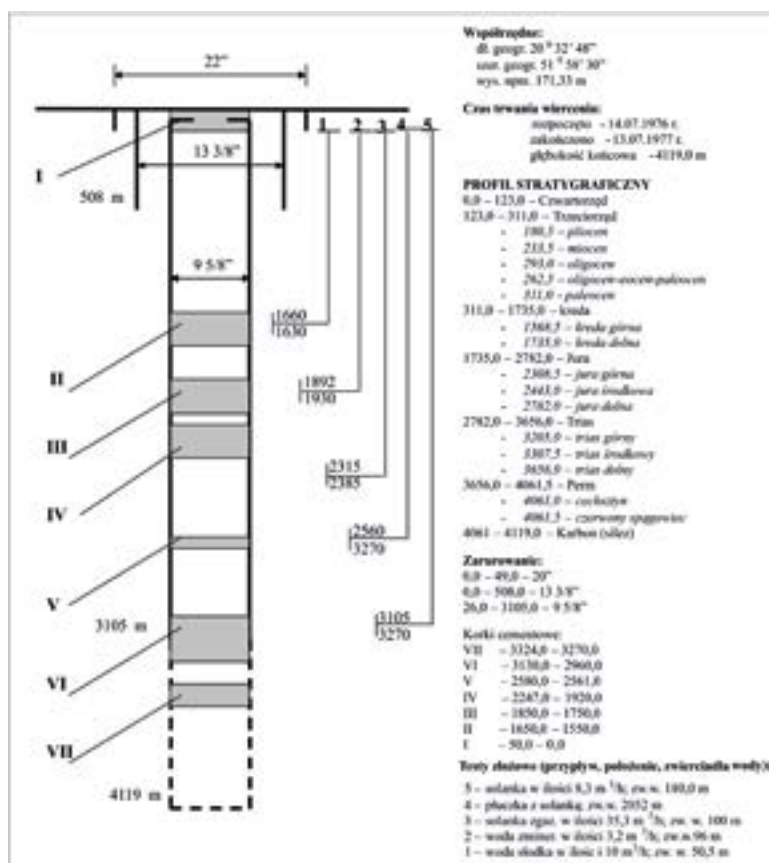
V [m ³ /hr]	tz [°C]	t(10d) [°C]	t(20d) [°C]	t(30d) [°C]	P(10d) [kW]	P(20d) [kW]	P(30d) [kW]
5	5	39,5	37,8	36,8	201	191	185
30	5	19,4	16,8	16,0	503	412	384
5	30	43,8	42,6	42,0	80	73	70
30	30	35,5	35,0	34,7	192	175	164

V – strumień zatłaczanej wody, tz – temperatura zatłaczanej wody (na wlocie do wymiennika), t(10d), P(10d) – temperatura na wypływie i moc cieplna po 10 dniach eksploatacji, t(20d), P(20d) – temperatura na wypływie i moc cieplna po 20 dniach eksploatacji, t(30d), P(30d) – temperatura na wypływie i moc cieplna po 30 dniach eksploatacji.

Jeszcze innym przykładem badań związanych z rekonstrukcją starego odwiertu były prace wykonane przy odwiercie Mszczonów IG-1. Na podstawie „Projektu rekonstrukcji i badań hydrogeologicznych wód geotermalnych z horyzontu kredowego w otworze Mszczonów

IG-1” przygotowanego w 1991 roku przez Przedsiębiorstwo Geologiczne Polgeol z Warszawy, w 1996 roku IGSMiE PAN opracowano szczegółową metodologię przeprowadzenia prac i badań odwiertu w celu udostępnienia dolnokredowego poziomu wodonośnego wraz z wnioskiem o finansowanie tzw. Projektu Celowego za środki Komitetu Badań Naukowych MNiSW. Wniosek ten został złożony do KBN przez Gminę Mszczonów reprezentowaną przez Burmistrza mgr inż. Józefa Kurka. Realizatorem prac badawczych był IGSMiE PAN reprezentowany w tym zakresie przez autora, a komercyjnym beneficjentem bezpośrednio uczestniczącym w pracach była Geotermia Mazowiecka SA reprezentowana przez Prezesa mgr inż. Marka Balcera. Taka trójstronna formuła zadania badawczego (samorząd, przedsiębiorca, jednostka naukowa) okazała się bardzo skuteczna na etapie realizacji i co najważniejsze w późniejszym racjonalnym wdrożeniu osiągnięcia badawczego.

Rekonstrukcja ta miała maksymalnie możliwy zakres gdyż, jak wcześniej wspomniano, otwór Mszczonów IG-1 został całkowicie zlikwidowany w 1977 roku, a teren wiertni zreultywowany w stopniu uniemożliwiającym naoczną lokalizację nawet śladów po otworze.



Rys. 7.8. Odwiert Mszczonów IG-1 – stan w 1977 roku (Bujakowski red. 2000)

Fig. 7.8. The Mszczonów IG-1 well – the state in 1977 (Bujakowski ed. 2000)

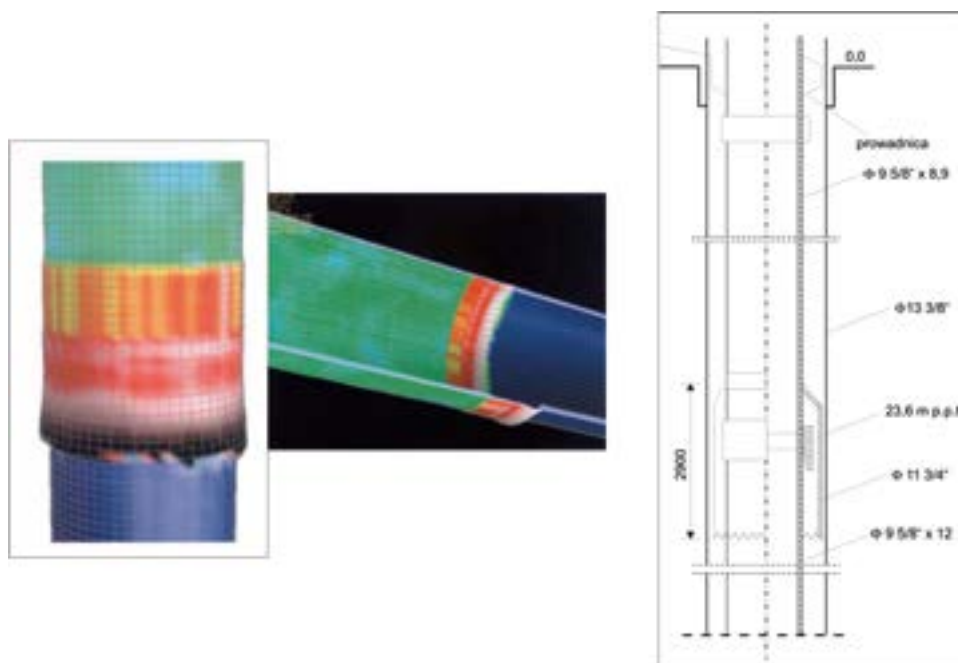
Zadanie to pn. „Pilotowa stacja eksploatacji ciepła ze zrekonstruowanego otworu Mszczonów IG-1” rozpoczęto w 1997 roku i zakończono w 1999 roku. Była to pierwsza w Polsce całkowita rekonstrukcja do celów geotermalnych starego odwiertu (Bujakowski red. 2000).

Metodyka prac objętych programem dotyczyła dwóch podstawowych zadań (Bujakowski red. 2000):

- I. Prace techniczne, w skład których weszły m.in.:
 - prace wiertnicze i zabezpieczające otwór,
 - udostępnienie strefy złożowej,
 - instalacje i urządzenia eksploatacyjne.
- II. Badania i testy złożowe obejmujące m.in.:
 - pompowanie oczyszczające,
 - pompowanie pomiarowe,
 - pompowanie przedeksploatacyjne,
 - testy hydrodynamiczne,
 - badania geofizyczne stref chłonnych,
 - badania stanu technicznego odwiertu,
 - badania fizyko-chemiczne wód,
 - badania mineralogiczno-petrograficzne,
 - badania izotopowe wód.

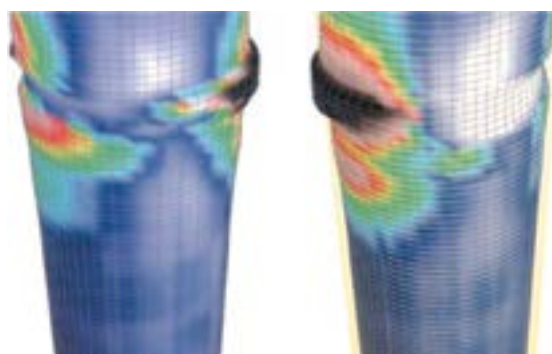
W pierwszym etapie wykonano techniczne prace wiertnicze, które głównie dotyczyły zwiercenia korków cementowych, płukania odwiertu, szablonowania rur okładzinowych dla stwierdzenia drożności, diagnozy uszkodzeń orurowania oraz ich likwidacji. Zakończeniem tych prac była perforacja rur w wytypowanym interwale 1602,5–1645,5 i 1663,5–1714,0. Techniczne prace, niemożliwe w całości do przewidzenia w etapie projektu rekonstrukcji z powodu braku jakichkolwiek zapisów w dokumentacjach z okresu wiercenia i likwidacji, miały kluczową rolę w doprowadzeniu do skutecznej naprawy odwiertu gwarantującej jego wieloletnie funkcjonowanie jako źródła energii systemu ciepłowniczego. Diagnoza uszkodzeń rur okładzinowych wykonana została z użyciem kamery telewizyjnej i średnicomierza wieloramiennego MAC-80 i MIT-60. Obraz uzyskany po przeprowadzonych badaniach umożliwił przestrzenną obserwację dowolnego odcinka rur okładzinowych. Szczególna uwaga skupiona była na interwale 0–95 m, gdzie występowało uszkodzenie rur okładzinowych w głębokościach; około 5, 23 i 55 m (rys. 7.9 i 7.10). W interwale 24–46 m zaobserwowano nieznaczne rozejście się profilowań średnicomierzem wskazujące na pojawienie się owalności rur. Stwierdzono również niezgodność w zapisie głębokości pomiarów wykonanych w 2001 roku (błędna korelacja głębokościowa na mufie pod głowicą otworu). Dla korekty skali głębokości profilowań MAC-80 i wyjaśnienia uszkodzeń rur okładzinowych występujących na głębokościach 23 i 59 m wykonano dodatkowy pomiar wieloramiennym kawernomierzem MIT-60, od wylotu otworu do głębokości 109 m. Uszkodzenie w głębokości 23 m zostało naprawione poprzez posadowienie uzupełniającego odcinka rur (rys. 7.9), (Bujakowski i in. 2013a).

Uszkodzenie orurowania stwierdzone na głębokości około 59 m zostało zidentyfikowane i naprawione poprzez frezowanie rur (rys. 7.10).



Rys. 7.9. Obraz naprawy rur okładzinowych na głębokości 23 m (z lewej obraz połączonych rur z sondy MIT, z prawej projekt uzupełnienia rur) (Bujakowski i in. 2013a)

Fig. 7.9. The picture of repair of casing at a depth of 23 m (left picture shows tube connected, on the right project of the connection of tubes) (Bujakowski et al. 2013a)

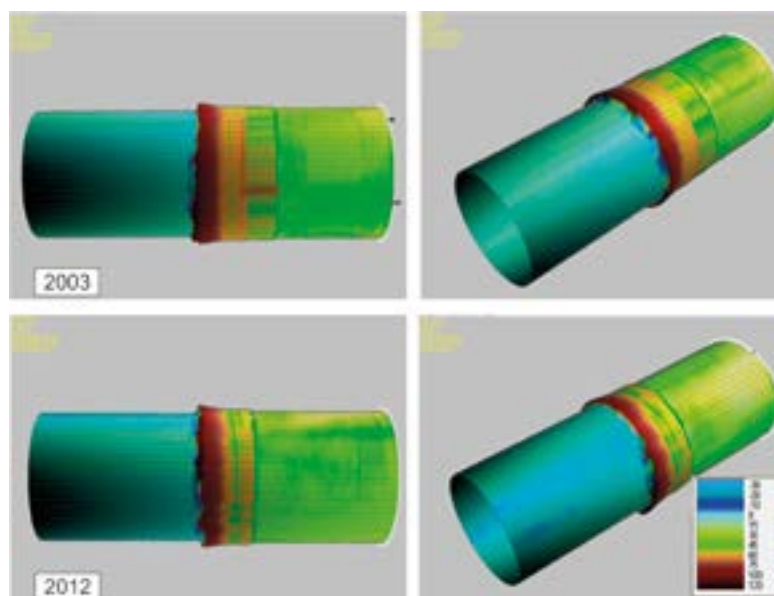


Rys. 7.10. Uszkodzenie rury okładzinowej na głębokości 59 m – obraz z sondy MIT (Bujakowski i in. 2013a)

Fig. 7.10. Damage to the casing string at a depth of 59 m – the image of the probe MIT (Bujakowski et al. 2013a)

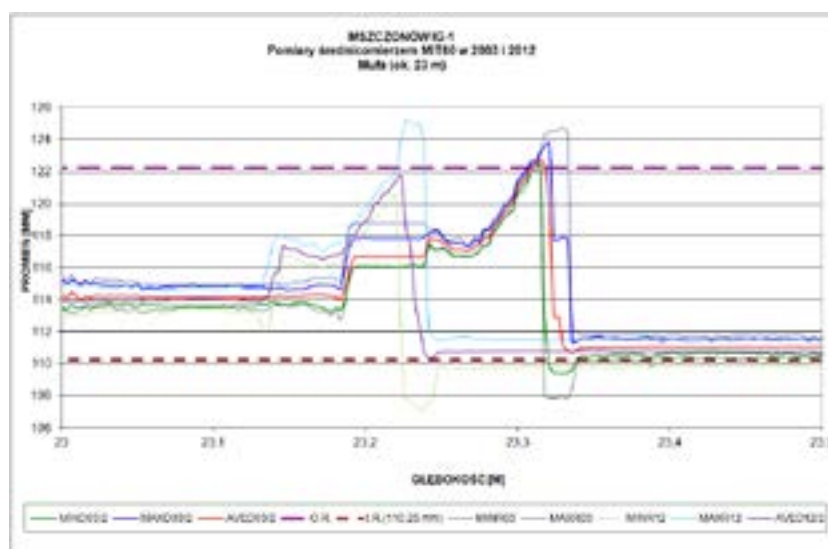
Strefy te są pod kontrolą i obserwacją przy wykorzystaniu geofizycznych sond otworowych.

Na poniższych rysunkach przedstawiono wybrane obrazy i wyniki obserwacji kontrolnych stref uszkodzeń: w głębokości 23 m (rys. 7.11 i 7.12) i w głębokości 59 (rys. 7.13 i 7.14) (Bujakowski i in. 2013a).



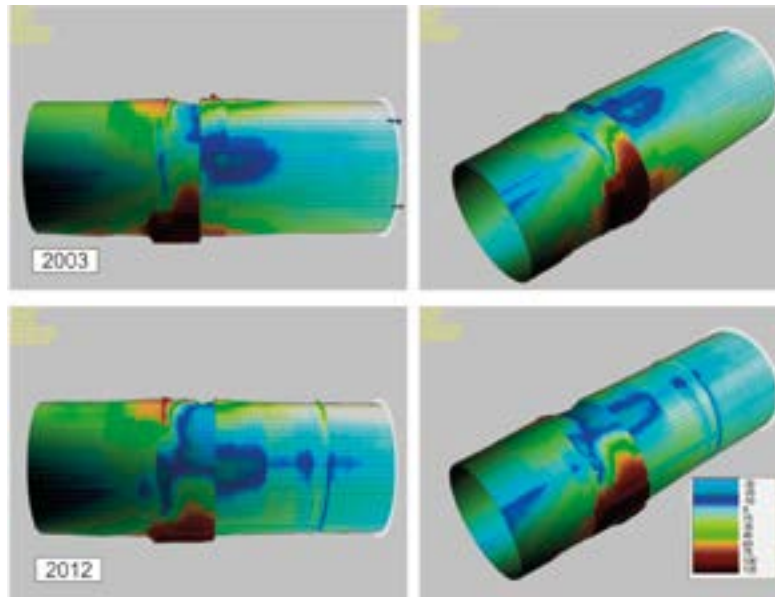
Rys. 7.11. Obrazy deformacji rur okładzinowych 9 5/8" w głębokości 23 m sporządzone na podstawie pomiarów sondą MIT60 z 2003 i 2012 roku (Bujakowski i in. 2013a)

Fig. 7.11. Images of deformation of casing pipes 9 5/8" at a depth of 23 m made from measurements of the probe MIT60 from 2003 and 2012 (Bujakowski et al. 2013a)



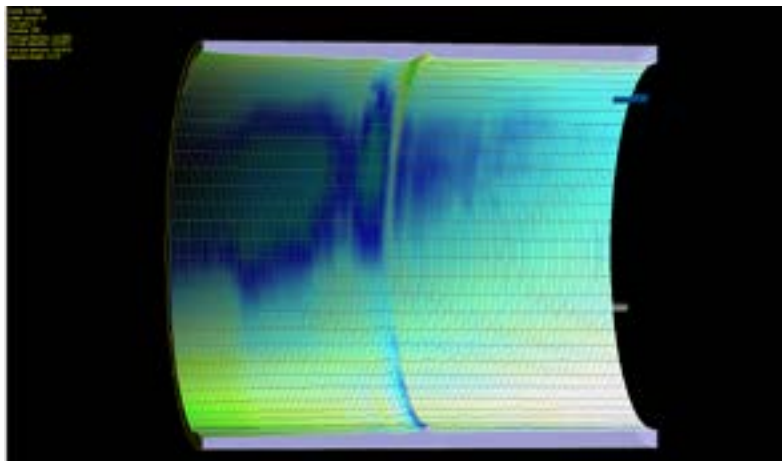
Rys. 7.12. Wykres porównawczy badań MIT60 strefy na głębokości około 23 m (2003 i 2012) (Bujakowski i in. 2013a)

Fig. 7.12. Figure comparison study of MIT60 zone to a depth of 23 m (2003 and 2012) (Bujakowski et al. 2013a)



Rys. 7.13. Obraz deformacji rur okładzinowych 9 5/8" w głębokości około 59 m sporządzony na podstawie pomiarów sondą MIT60. Zestawienie porównawcze pomiarów z 2003 i 2012 roku (taka sama skala kolorystyczna) (Bujakowski i in. 2013a)

Fig. 7.13. MIT60 image of deformation of casing pipes 9 5/8" at a depth of 59 m made from measurements of the probe MIT60. Comparison of measurements from 2003 and 2012 (the same color scale) (Bujakowski et al. 2013a)



Rys. 7.14. Obraz deformacji rur okładzinowych 9 5/8" w głębokości około 59 m (2012 r.) sporządzony na podstawie pomiarów sondą MIT60. Powiększenie miejsca oznaczonego literą „A” na rysunku 7.13 (Bujakowski i in. 2013a)

Fig. 7.14. Image of deformation of casing pipes 9 5/8" at a depth of 59 m (2012) made from measurements of the probe MIT60. Enlarge place marked with the letter "A" in rys.7.13 (Bujakowski et al. 2013a)

W celu dokładnej analizy ewentualnych zmian stanu technicznego rur 9 5/8" w głębokości 23 m, na rysunku 7.11 zestawiono obrazy rur otrzymane na podstawie pomiarów z 2003 i 2012 roku. Do analizy wybrano dokładnie ten sam odcinek rury, który przedstawiono jednocześnie w takiej samej orientacji przestrzennej. Analizowany odcinek nie jest wypełniony wodą. Nie widać wyraźnych różnic w stanie technicznym rur z 2012 r. w stosunku do 2003 r. Można jedynie zaobserwować powstanie niewielkich osadów na rurach powodujące zmniejszenie jego średnicy. Zasadniczych zmian stanu technicznego nie stwierdzono. Na rysunku 7.12 zestawione pomiary przesunięte są względem siebie głębokościowo o 10 cm i widoczny jest efekt „zaciągnięcia” na pomiarach z 2003 r. o długości około 5 cm na głębokości 23,2 m.

Podobnie obserwowana jest druga strefa znajdująca się w głębokości około 59 m. Przedstawione na rysunku 7.13 i 7.14 (Bujakowski i in. 2013a) szczegóły miejsca uszkodzenia ukazują ostro zarysowaną, znaczną dylatację poprzeczną rur na połączeniu mufowym. Górna końcówka dolnej rury jest z jednej strony mocno wgnieciona do wewnątrz, a z drugiej strony wypchnięta na zewnątrz, znacznie poza obrys zewnętrznej powierzchni rur. Takie uszkodzenie mogła spowodować dolna część mufy wkręcona lub wciśnięta na końcówkę niżej położonej rury. Połączenia muf z rurami okładzinowymi mają stożkowe gwinty i zbyt duży nacisk mógł spowodować pęknięcie mufy. Rury okładzinowe 9 5/8", jak i znajdujące poza nimi rury okładzinowe 13 3/8", sięgające do głębokości 508 m, zostały zacementowane do wierzchu. Powstanie takiego uszkodzenia mogło być skutkiem braku cementu w przestrzeni między rurowej i pęknięcia mufy w miejscu wybrzuszenia rury. Pośrodku wgniecenia rury do wewnątrz można zauważyć głębokie, podłużne pęknięcie rury ze śladami postępującej korozji. Głębokość pęknięcia powiększa się z czasem, co można zaobserwować na obrazie z 2012 r. w stosunku do obrazu pęknięcia z 2003 r. (Bujakowski i in. 2013a).

Na ścianie górnej rury, na głębokości 59,15 m można zaobserwować nieznaczną dylatację poprzeczną o kierunku przeciwnym do opisanej wyżej, związaną prawdopodobnie z górnym brzegiem mufy. Górna rura w miejscu łączenia wykazuje tylko nieznaczące uszkodzenie w miejscu podłużnego pęknięcia dolnej rury.

Wielkość wybrzuszenia zajmuje około 9 cm długości rury i około 20,8 cm jej obwodu. W stosunku do wewnętrznego obwodu rury, który wynosi 69,3 cm, wybrzuszenie stanowi około 30% obwodu. Przy takiej interpretacji długość mufy powinna wynosić 36 cm.

Jednym z ważniejszych zadań rekonstrukcji było określenie bezpiecznej dla środowiska przyrodniczego wielkości wydobywania wody geotermalnej oraz ich jakości (w przypadku jej nieprzydatności do celów spożywczych i konieczności zatłaczania wód do złoża odwiertem chłonnym, zmieniłoby to zasadniczo ekonomiczny plan całego przedsięwzięcia).

Z szeregu przeprowadzonych badań warto wyszczególnić badania i testy złożowe. Były to: pompowanie oczyszczające, pompowanie pomiarowe, pompowanie przed eksploatacyjne, testy hydrodynamiczne oraz badania geofizyczne stref chłonnych. Zestawienie wybranych wyników pomiarów w trakcie pompowania pomiarowego przedstawiono w tabeli 7.2 i na wykresach (rys. 7.15, 7.16 i 7.17) (Bujakowski red. i in. 2000).

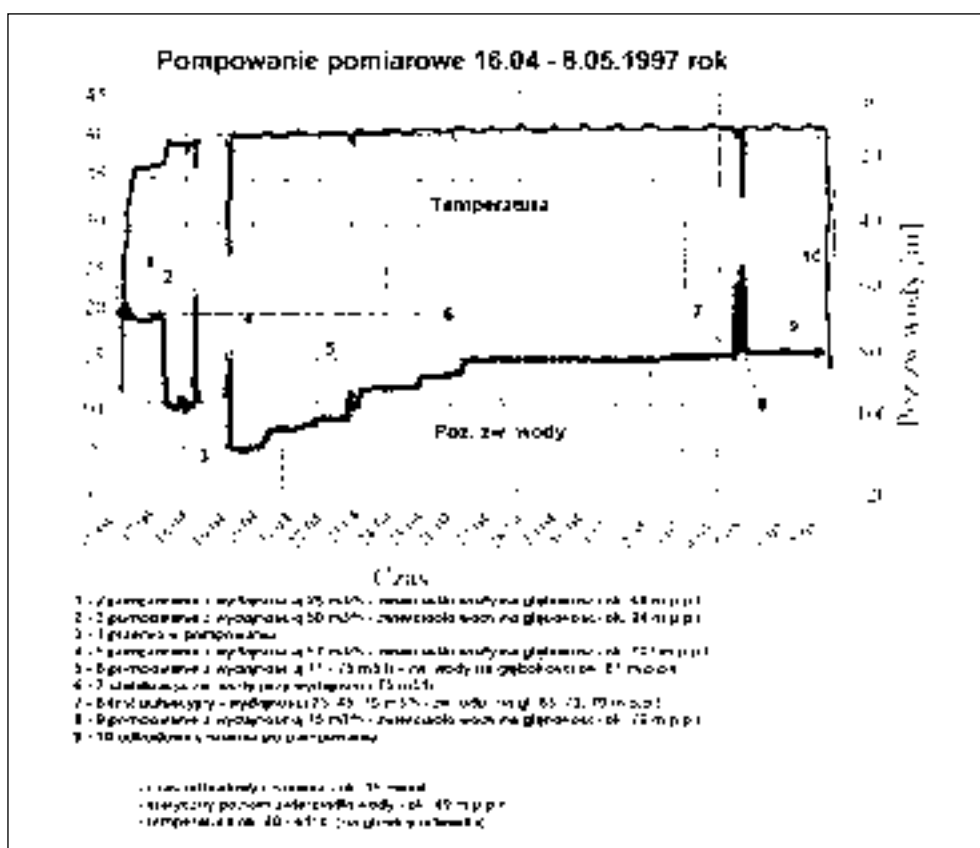
Tabela 7.2

Zestawienie wyników pompowania pomiarowego (Bujakowski red. 2000)

Table 7.2

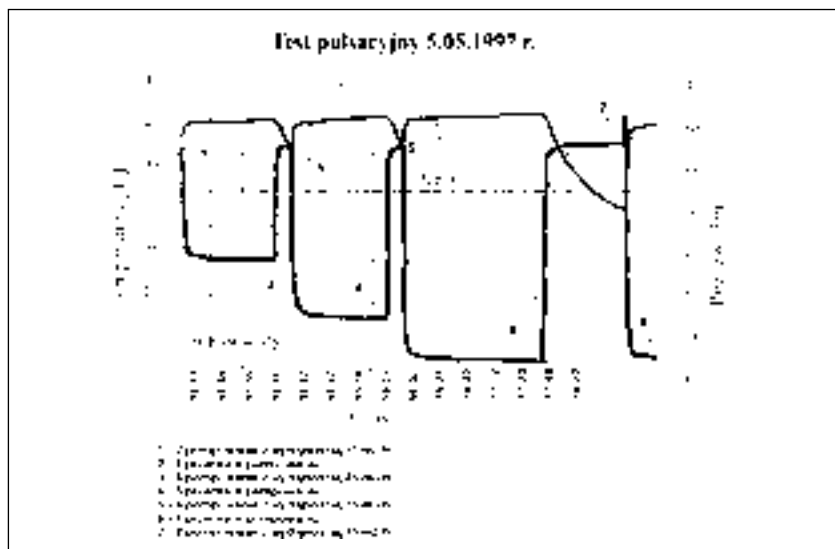
Summary of the results of the measuring of pumping (Bujakowski ed. 2000)

Wydajność [m ³ /h]	Czas pompowania	Najniższe położenie zw. wody [m p.p.t]	Depresja [m]	Wydajność jednostkowa [m ³ /h/m]	Temperatura pod koniec pompowania [°C]
29,00	29 h 30'	67,46	14,46	2,01	36,6
56,00	47 h 45'	91,73	38,73	1,45	39,3
od 69,00 do 75,00	442 h	107,3–79,09	54,3–26,09	1,27–2,87	40,5



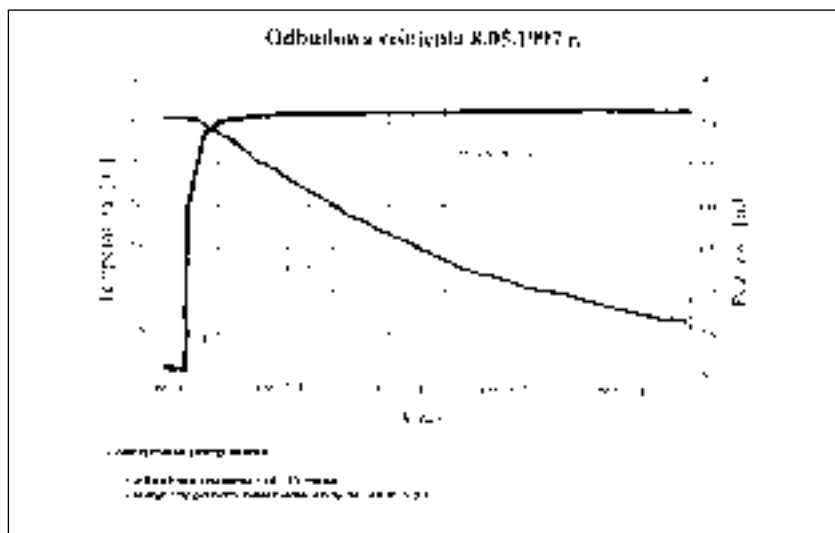
Rys. 7.15. Wykres zmian położenia zwierciadła wody podczas pompowania pomiarowego (Bujakowski red. 2000)

Fig. 7.15. Graph of the water level during pumping measurement (Bujakowski ed. 2000)



Rys. 7.16. Wykres położenia zwierciadła wody i zmian temperatury wody na głowicy podczas testu pulsacyjnego (Bujakowski red. 2000)

Fig. 7.16. Graph the water level and water temperature change at the wellhead during of the pulsed test (Bujakowski ed. 2000)



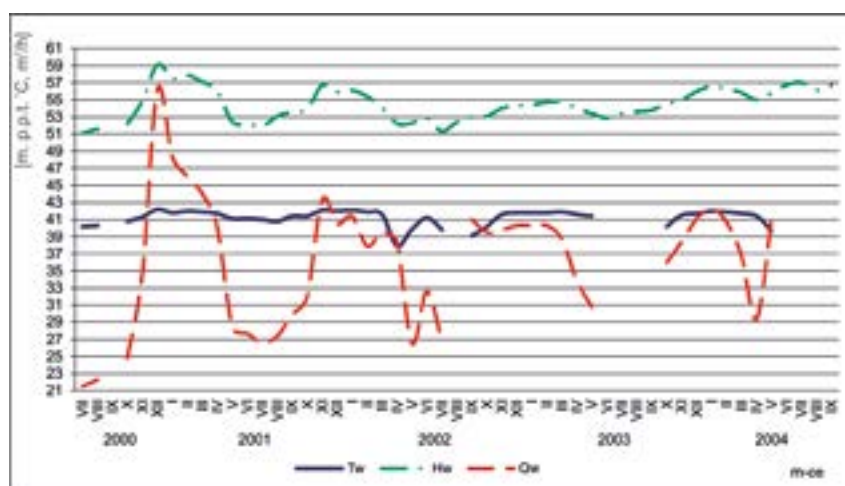
Rys. 7.17. Wykres położenia zwierciadła wody i zmian temperatury wody na głowicy podczas odbudowy ciśnienia (Bujakowski red. 2000)

Fig. 7.17. Graph the water level and changes of water temperature on the wellhead during the build-up of pressure (Bujakowski ed. 2000)

Wykonanymi pracami udokumentowano wody geotermalne o następujących parametrach:

- wydajność 60 m³/h,
- depresja $S = 24,6$ m,
- temperatura 41,5 °C,
- mineralizacja 490 mg/dm³,
- typ wód HCO₃-Cl-Na-Ca,
- zwierciadło statyczne wody na głębokości 49 m p.p.t.

Kolejnym zagadnieniem badawczym był monitoring głównych parametrów umożliwiający rejestrację ewentualnych zmian temperatury i położenia zwierciadła wody. Monitoring taki winien być prowadzony w czasie pracy złoża obejmując wieloletnie obserwacje. Na rysunku 7.18 przedstawiono wybrane zestawienie obserwacji podstawowych parametrów pracy złoża w okresie ponad 4 lat. Wykres wskazuje na stabilną pracę złoża.



Rys. 7.18. Zbiorcze zestawienie miesięcznych pomiarów parametrów pracy odwiertu geotermalnego Mszczonów IG-1

Tw – temperatura, Hw – położenie zwierciadła wód, Qw – wydajność (Bujakowski red. 2000)

Fig. 7.18. Graph of summary of monthly measurements of parameters of the geothermal well Mszczonów IG-1
Tw – temperature, Hw – the position of the water table, Qw – productivity (Bujakowski ed. 2000)

W trakcie rekonstrukcji przeprowadzono badania horyzontu wodnego z wykorzystaniem zestawu sond geofizyki otworowej, który używany jest w pomiarach produkcyjnych wykonywanych dla potrzeb przemysłu naftowego. Do celów badań strefy złożowej wód geotermalnych należą:

- ocena produktywności poszczególnych interwałów (udział procentowy),
- ocena przyływów z poszczególnych interwałów kompleksu zbiornikowego,
- lokalizacja stref nieprodukcyjnych (rozważanie możliwości powtórnej perforacji lub innych zabiegów udrażniających horyzonty),
- określenie miąższości efektywnej strefy złożowej dla oceny wydajności złoża.

W przypadku warunków subartezyjskich pomiary wykonywane są na chłonność złoza z wykorzystaniem kompleksowej sondy Producting Log (PL) w skład której wchodzi:

- mufolokator – CCL,
- sonda gamma – GRT,
- elektrotermometr – TLT,
- ciśnieniomierz – SPT,
- przepływomierz – FBF.

Dla wyznaczenia miejsca pochłaniania wody i ilościowej oceny chłonności badanej formacji stosuje się metodę wielokrotnych pomiarów tym zestawem PL w kierunku spodu i w kierunku wylotu odwiertu ze stałą, lecz różną dla każdego cyklu pomiarowego prędkością. Metoda ta pozwala ilościowo określić prędkość przepływu wody w odwiercie z pomiarów przepływomierzem i prędkości przemieszczania się zestawu pomiarowego w obrębie nieperforowanych rur.

W otworze Mszczonów IG-1 pomiary wykonano w interwale 1575–1711 m przy czym temperaturę w warunkach statycznych mierzono w całym otworze 0,0–1711 m. Pomiary realizowano przy stałym zatłaczaniu wody około 11 m³/h.

Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci wykresu zawierającego: zestawienie obliczonego zailenia, zawodnienia i przepuszczalności, zestawienie objętościowego składu litologicznego i porowatości oraz nasycenia wód. Jak wynika z zestawienia parametrów zbiornikowych, piaskowce w całej badanej strefie mają porowatości rzędu 15% z niewielkimi zmianami w stropie albu. Piaskowce w całości są nasycone wodą złożową słabo zmineralizowaną. Pomiędzy seriami piaskowców występują wkładki nieprzepuszczalnych i nieporowatych ilów (rys. 7.19, Bujakowski red. 2000).

Badania strefy złożowej zestawem sond PL należą do zakresu monitoringu i wykonywane były w trzech cyklach w trakcie realizacji Projektu Celowego rekonstrukcji oraz kontrolnie w roku 2003 i 2012 (Bujakowski i in. 2013b) – rysunek 7.20.

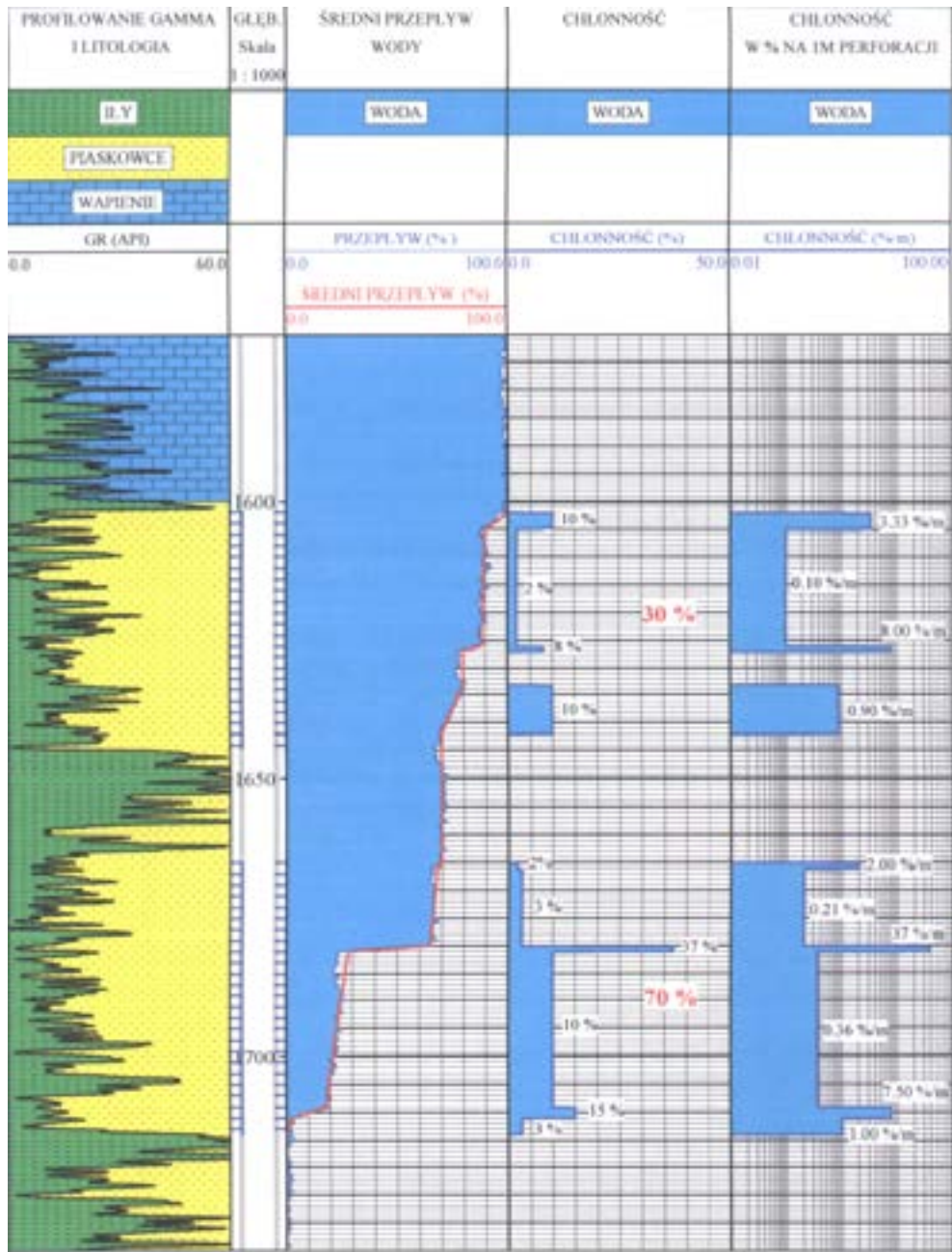
Z porównania analiz pomiarów produkcyjnych z poprzednich lat wynika (rys. 7.20), że chłonność odwiertu, oceniana na podstawie pomiarów przepływomierzem, nie ulega znaczącym zmianom, z wyjątkiem I cyklu badań w dniu 7 III 1997 r. kiedy to stwierdzono brak chłonności w interwale dolnej perforacji. Badaniami następnymi (20 VI 1997 r. i 13 VII 1999 r.) chłonność dolnej perforacji oceniona została na około 70% a górnej na około 30%.

Badania wykonane w 2003 roku i najnowsze z 2012 r. potwierdziły wcześniejszy obraz chłonności (rys. 7.20). Największa, skokowa zmiana chłonności odwiertu występuje na głębokości 1680 m (Bujakowski, i in. 2013b).

Dane dotyczące badań własności fizykochemicznych wód geotermalnych oraz badań wielkości piaszczenia złoza pozyskiwane były ze specjalnie wytworzonych stanowisk badawczych.

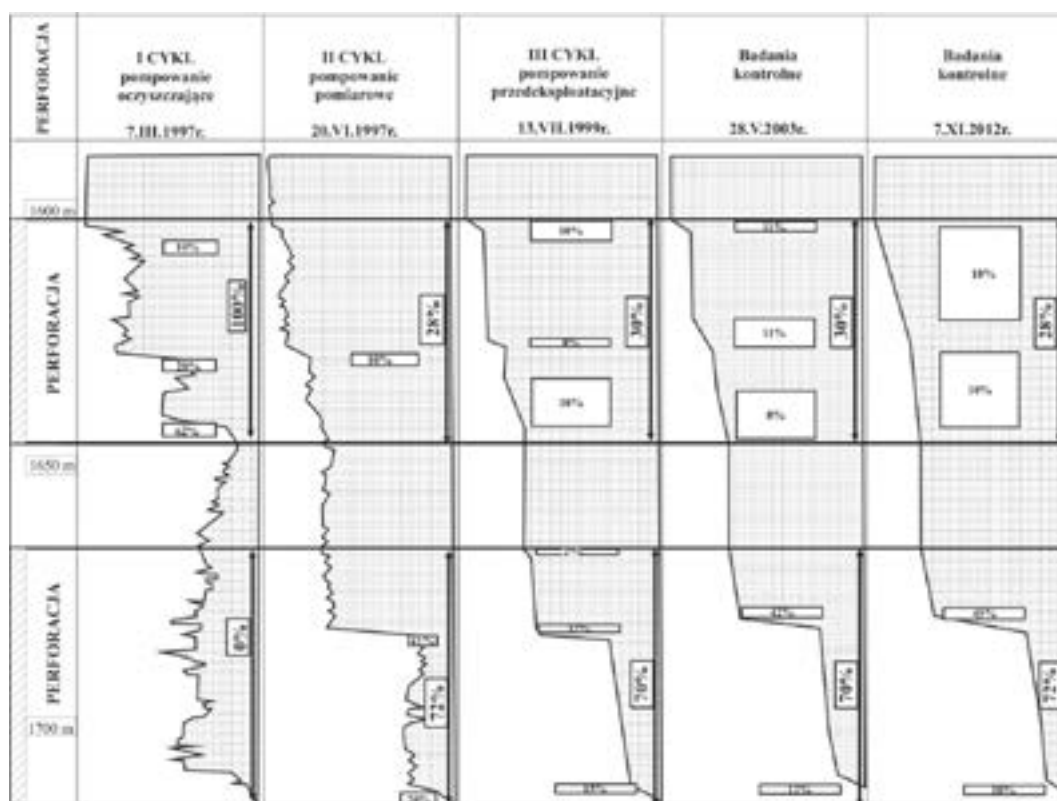
Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

- dolnokredowe złoże geotermalne wykazuje dużą stabilność wydajności i temperatury wody,



Rys. 7.19. Zestawienie wyników badań zestawem sond Production Log w otworze Mszczonów IG-1 (Bujakowski red. 2000)

Fig. 7.19. Summary of test results set of probes Production Log in Mszczonów IG-1 well (Bujakowski ed. 2000)



Rys. 7.20. Zestawienie wyników badań PL wykonanych w latach 1997, 1999, 2003 i 2012 (Bujakowski i in. 2013b)

Rys. 7.20. Summary of results of PL studies carried out 1997, 1999, 2003 and 2012 (Bujakowski et al. 2013b)

- piaszczenie ze złoża jest niewielkie i szybko się zmniejsza podczas intensywnego pompowania,
- szybko następuje odbudowa ciśnienia oraz temperatury wody złożowej,
- wyniki analiz chemicznych wody wskazują, że można dopuścić ją do użytku jako wodę pitną (likwiduje to problem utylizacji wody po wykorzystaniu jako źródła ciepła),
- badania rur okładzinowych wskazują na ich dobry stan pomimo ich wieku i innego pierwotnego przeznaczenia.

Odwiert Mszczonów IG-1 od 2000 roku pracuje jako eksploatacyjny w układzie jednootworowym (w odróżnieniu od układów wielootworowych, w których zachodzi proces wydobywania i zatłaczania wód) z jednoczesnym wykorzystaniem wód do celów grzewczych i pitnych oraz kąpieliskowych bez zatłaczania wód geotermalnych do górotworu.

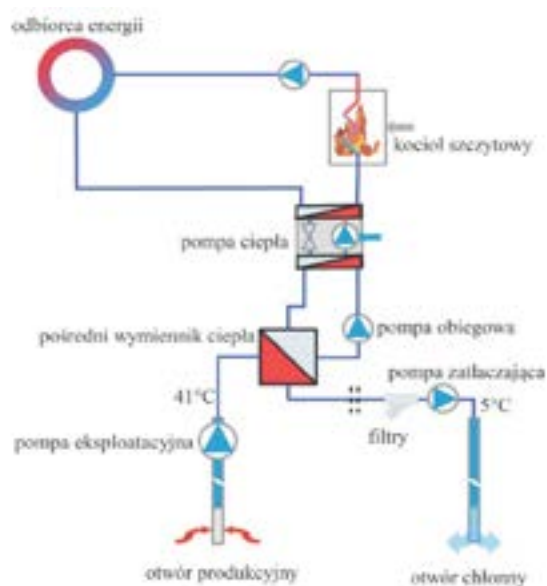
8. Etap projektowania i wykonania części powierzchniowej zakładu geotermalnego

Wielkość zasobów zatwierdzonych do eksploatacji oraz parametry wód złożowych, określone w dokumentacji hydrogeologicznej zamykającej fazę wykonania odwiertu, mają kluczowe znaczenie w projektowaniu układu technologicznego zagospodarowania energii wód geotermalnych. Zasadniczo można uznać, że w tej fazie uwaga inwestora skupiona jest na optymalnym zabezpieczeniu dostaw energii potencjalnemu odbiorcy. Pod pojęciem optymalny mieści się zasadniczo optymalizacja energetyczna i ekonomiczna. Energetycznie, system źródła ciepła winien charakteryzować się głównie dyspozycyjnością – bezpieczeństwem zapewnienia dostawy i koherencją – czyli pokryciem oczekiwanych przez odbiorcę potrzeb. Optymalizacja ekonomiczna dąży do określenia warunków wytworzenia jednostki energii po najniższych kosztach. Zasadniczo zależy ona od dwóch czynników, tj. od wartości kosztów (inwestycyjnych i operacyjnych) i liczby jednostek energii wygenerowanych ze źródła ciepła.

W rozdziale szóstym opisującym rozpoznanie w skali lokalnej, wykazano zakres prac objętych ekspertyzą o charakterze Wstępnego Studium Wykonalności. Wśród nich były zadania bezpośrednio poprzedzające prace projektowe części powierzchniowej zakładu geotermalnego, tj. opracowanie koncepcji: układu energetycznego dla zagospodarowania energii geotermalnej, wariantów technologicznych węzłów energetycznych (hybrydowych) dla eksploatacji i wykorzystania energii geotermalnej oraz wstępnej analizy ekonomicznej wytworzenia i funkcjonowania węzłów energetycznych.

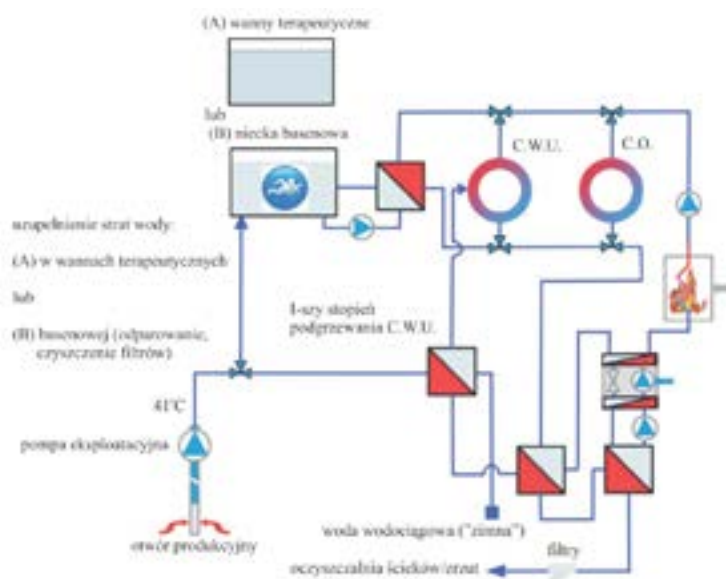
Realizacja tych zadań daje w efekcie wystarczający zasób wiedzy umożliwiający podjęcie racjonalnych decyzji przez inwestora oraz wskazuje warunki i parametry projektowe dla osiągnięcia zakładanych wyników energetycznych i ekonomicznych.

W ramach tej ekspertyzy opracowane układy technologiczne hybrydowego źródła ciepła są podstawą analizy różnych warunków wykorzystania energii np. do celów ciepłowniowych (rys. 8.1) i/lub rekreacyjno-leczniczych (rys. 8.2). Analizowane są one także od strony różnych parametrów wsadowych związanych głównie z warunkami złożowymi wytypowanych zbiorników wód geotermalnych. W efekcie do dalszej analizy zostaje wytypowanych zwykle kilka do kilkunastu wariantów technologicznych, które zostają oszacowane od strony energetycznej, ekonomicznej i ekologicznej. Celem uzyskania obrazu porównawczego opracowywany jest dodatkowo wariant odniesienia oparty na klasycznych źródłach energii,



Rys. 8.1. Schemat technologiczny układu wykorzystującego energię geotermalną w celach ciepłowniczych (Bujakowski i in. 2014)

Fig. 8.1. Technological scheme of the system utilizing geothermal energy for heating purposes (Bujakowski et al. 2014)



Rys. 8.2. Schemat technologiczny układu wykorzystującego energię i wody geotermalne w celach: (A) balneorekreacyjnych lub (B) balneoterapeutycznych (Bujakowski i in. 2014)

Fig. 8.2. Technological scheme of the system utilizing geothermal energy and waters for the purposes of: (A) balneo-recreation or (B) balneo-therapeutics (Bujakowski et al. 2014)

Tabela 8.1

Przykład zestawienia parametrów technicznych, ekonomicznych dla rozpatrywanych wariantów potencjalnego wykorzystania zasobów wód geotermalnych z otworu Sobniów 11 i alternatywnego źródła energii (gazu ziemnego i pomp ciepła) (Bujakowski i in. 2014)

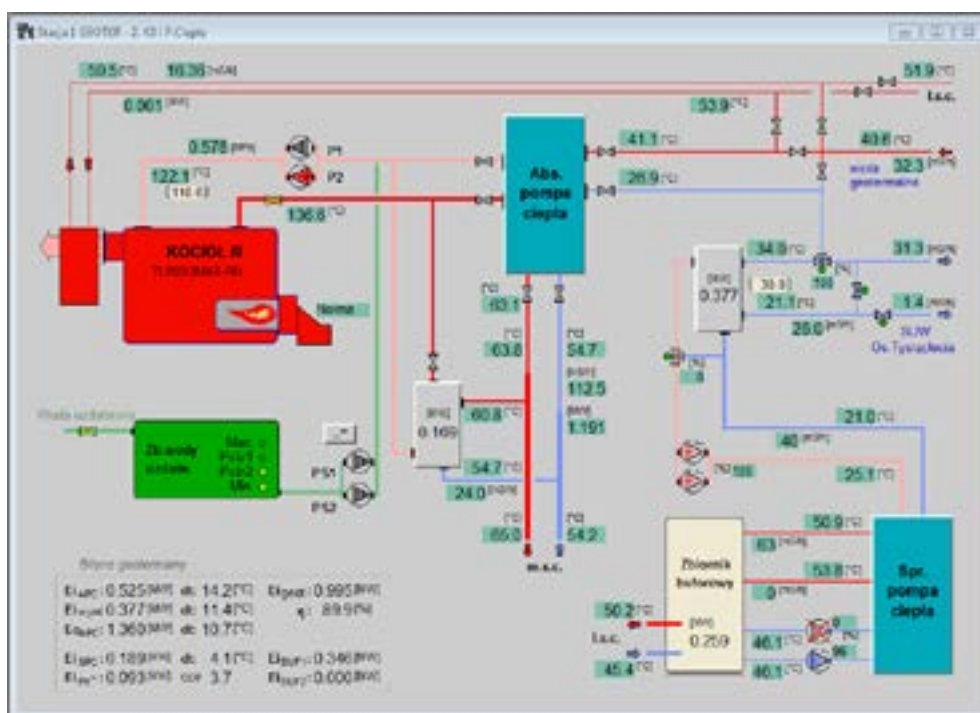
Table 8.1

Summary of technical, economic and environmental parameters for the considered variants of the potential use of geothermal resources from the hole Sobniów 11 together with alternative energy source (natural gas and heat pumps) (Bujakowski et al. 2014)

Lp.	Parametr	Wariant 1	Wariant 2 a	Wariant 2 b	Wariant 3 a	Wariant 3 b	Gaz ziemny
1.	Eksploatowany horyzont	piaskowce ciężkowickie	piaskowce ciężkowickie	piaskowce czarnorzeckie	piaskowce ciężkowickie	piaskowce czarnorzeckie	-
2.	Strumień wody geotermalnej [m ³ /h]	10	5	5	5	5	-
3.	Sposób eksploatacji	dublet geotermalny (jeden otwór nowy i jeden rekonstruowany)	jednotworowy (rekonstrukcja)	jednotworowy (rekonstrukcja)	jednotworowy (rekonstrukcja)	jednotworowy (rekonstrukcja)	-
4.	Sposób wykorzystania wód geotermalnych	ciepłownictwo	balneologia	balneologia	balneoterapia	balneoterapia	ciepłownictwo
5.	Głębokość otworu [m]	1 500	1 500	1 800	1 500	1 800	-
6.	Średnica otworów/u [cale]	6 5/8	6 5/8	6 5/8	6 5/8	6 5/8	-
7.	Temperatura w złożu [°C]	45-50	45-50	55-60	45-50	55-60	-
8.	Temperatura na głowicy otworu [°C]	41	41	41	41	41	-
9.	Moc cieplna bezpośrednio z geotermii [kW]	186	93	93	93	93	-
10.	Moc cieplna z geotermii przy wykorzystaniu pomp ciepła [kW]	570	285	285	285	285	-
11.	Moc szczytowych kotłów gazowych [kW]	571	286	286	286	286	1 000
12.	Moc cieplna całkowita [kW]	1141	571	571	571	571	1 142
13.	Całkowita produkcja energii cieplnej [GJ/rok]	9 004	6 483	6 483	5 403	5 403	9 004

Tabela 8.1. cd.
Table 8.1. cont.

Lp.	Parametr	Wariant 1	Wariant 2 a	Wariant 2 b	Wariant 3 a	Wariant 3 b	Gaz ziemny
14.	Produkcja energii z geotermii bezpośrednio [GJ/rok]	1 762	881	881	881	881	0
15.	Produkcja energii z pomp ciepła [GJ/rok]	6 522	5 152	5 152	5 152	5 152	0
16.	Produkcja energii z kotłów szczytowych [GJ/rok]	720	450	450	251	251	9 004
17.	Ilość zużytego gazu ziemnego [tys. m ³ /rok]	24	15	15	8	8	294
18.	Ilość zużytej energii elektrycznej [MWh/rok]	693	461	461	461	461	0
19.	Nakłady inwestycyjne całkowite [tys. zł]	11 337	3 369	4 369	3 369	4 369	900
20.	Otwór produkcyjny (rekonstrukcja) [tys. zł]	2 300	2 300	3 300	2 300	3 300	0
21.	Otwór chłonny [tys. zł]	7 000	0	0	0	0	0
22.	Pompy ciepła [tys. zł]	1 142	571	571	571	571	0
23.	Kotły szczytowe [tys. zł]	457	228	228	228	228	800
24.	Wymienniki ciepła [tys. zł]	86	43	43	43	43	0
25.	Rurociągi i armatura [tys. zł]	253	126	126	126	126	0
26.	Budynek ciepłowni * [tys. zł]	100	100	100	100	100	100
27.	Całkowite koszty obsługi [tys. zł/rok]	1 048	558	606	535	583	653
28.	Koszty zakupu nośników energii [tys. zł/rok]	410	271	271	259	259	568
29.	Koszty remontów i napraw [tys. zł/rok]	49	21	23	21	23	14
30.	Amortyzacja środków trwałych [tys. zł/rok]	589	190	235	190	235	71
31.	Koszty utylizacji wody [tys. zł/rok]	0	77	77	66	66	0
32.	Koszt jednostkowy wytworzenia energii cieplnej [zł/GJ]	116	86	93	99	108	72
33.	Koszt energii cieplnej w paliwie [zł/GJ]	46	42	42	48	48	63



Rys. 8.3. Schemat technologiczny układu ciepłego w zakładzie geotermalnym w Mszczonowie (dane źródłowe Geotermii Mazowieckiej SA 2014)

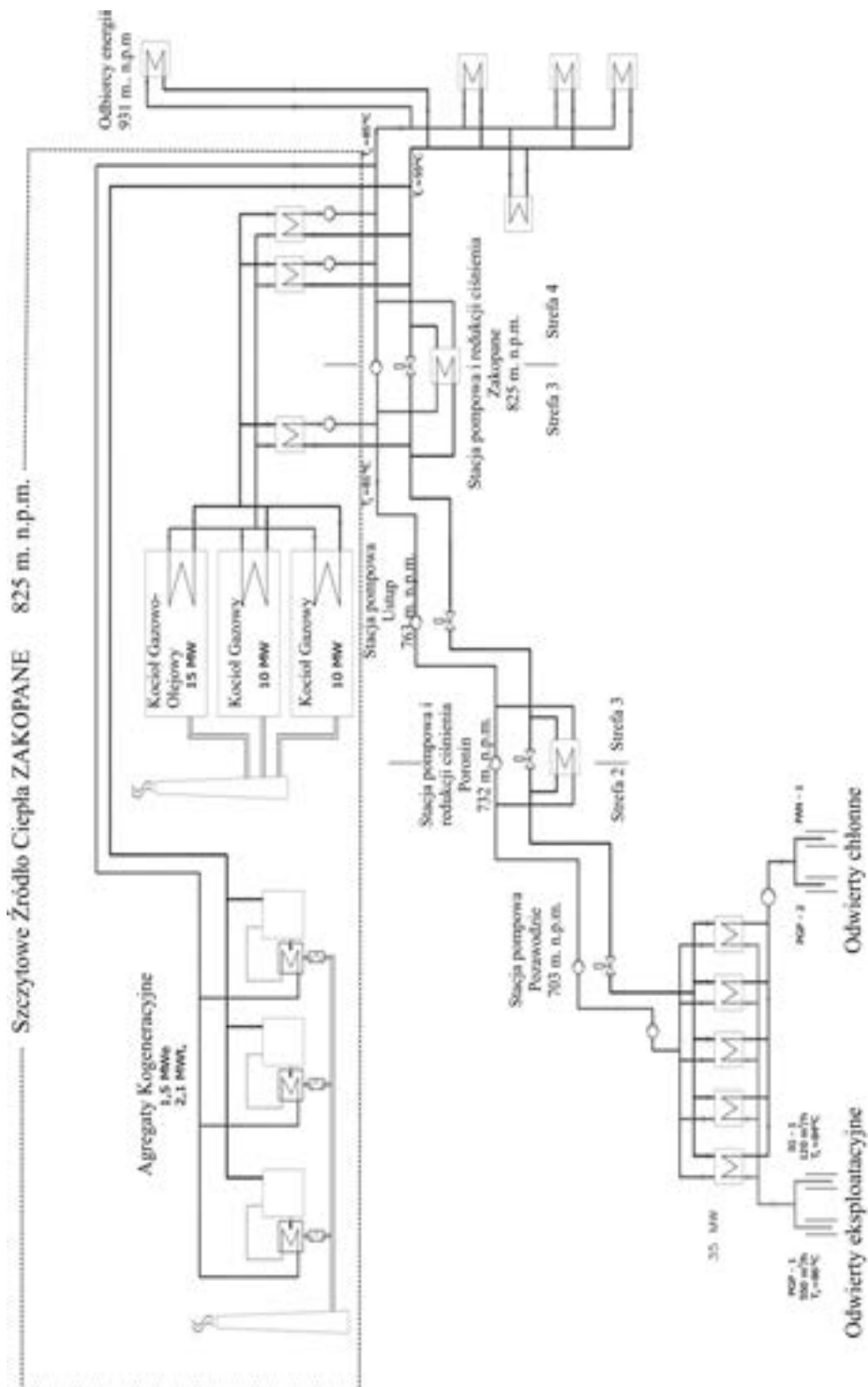
Fig. 8.3. Technological scheme of the heating system of the Geothermal Plant in Mszczonów (source of data Geotermia Mazowiecka SA 2014)

zwykle na gazie ziemnym. Przykład zestawu wariantów układów energetycznych z ich ocenami opracowany dla lokalizacji okolic miasta Jasło, przedstawiono w tabeli 8.1 (Bujakowski i in. 2014).

Z powyższego przykładu wynika, że żaden z analizowanych wariantów geotermalnych nie spełnia warunku ekonomicznej konkurencyjności w porównaniu z wariantem opartym na gazie ziemnym. Tu należy zaznaczyć, że wiele innych przypadków analiz wykonanych w IGSMiE PAN wykazało konkurencyjność geotermii w stosunku do paliw konwencjonalnych.

Poniżej zestawiono wybrane schematy technologiczne funkcjonujących instalacji hybrydowych układów źródeł ciepła w zakładzie geotermalnym Geotermii Mazowieckiej SA w Mszczonowie (rys. 8.3) – dane źródłowe Geotermii Mazowieckiej SA (2014) i PEC Geotermia Podhalańska SA w Bańskiej na Podhalu (rys. 8.4) (Górecki red. 2011).

Każdy z przedstawionych układów ciepłowniczych posiada swoją specyfikę, aczkolwiek oba zakłady są efektywne ekonomicznie. System Mszczonowa bazujący na temperaturze około 41°C wykorzystuje energię wody złożowej w około 50%. Odbiór ciepła następuje w dwóch stopniach schłodzenia wód geotermalnych. Pierwszy stanowi jednostka absorpcyjnej pompy ciepła, która zasila miejską sieć ciepłowniczą tzw. wysokotemperaturowych



Rys. 8.4. Schemat systemu ciepłowniczego PEC Geotermia Podhalańska SA (Górecki red. 2011)

Fig. 8.4. Scheme of PEC Geotermia Podhalańska PLC district heating system (Górecki ed. 2011)

odbiorców (realizowane to jest z wykorzystaniem szczytowych źródeł ciepła, tj. kotłów gazowych niewidocznych na rysunku 8.3). Drugi stopień schłodzenia wód geotermalnych realizuje sprężarkowa pompa ciepła, której górne źródło ciepła zasila wydzieloną sieć z odbiorcami niskotemperaturowymi. W efekcie woda złożowa wychłodzona zostaje do temperatury około 20°C. Dla uzyskania jeszcze lepszego efektu ekonomicznego woda złożowa jest dalej zagospodarowywana w lokalnym kąpielisku i w lokalnej sieci wodociągowej jako woda pitna. Tak kompleksowe zagospodarowanie ujętych zasobów kopaliny, jaką są wody geotermalne, jest unikalne nie tylko w naszym kraju. Skuteczne zarządzanie tą instalacją w kontekście funkcjonowania spółki obsługującej także systemy ciepłownicze w innych miastach daje, praktycznie od chwili rozpoczęcia produkcji ciepła w 2000 roku, pozytywny wynik finansowy firmy.

Z kolei zakład geotermalny na Podhalu obsługiwany przez PEC Geotermia Podhalańska SA jest jednym z najrozleglejszych niskotemperaturowych systemów geotermalnych w Europie. Duża ilość wytwarzanej energii, na którą mają wpływ warunki klimatyczne Podhala z długim okresem grzewczym oraz doskonale warunki hydrogeotermalne ukierunkowały rozwój tego systemu na pozyskiwanie jak największej liczby odbiorców. Strategia ta od blisko 10 lat przynosi bardzo dobre wyniki zarówno ekonomiczne, jak i ekologiczne, co jest wyjątkowo ważne w tym unikalnym w skali Polski regionie. Budowa tego systemu wiązała się jednakże z koniecznością poniesienia wyjątkowo dużych nakładów finansowych zwłaszcza na budowę sieci dystrybucyjnej, która musiała pokonać poważne problemy infrastrukturalne, terenowe i technologiczne. Szacuje się, że koszt energii (1 GJ) z wód geotermalnych *in situ* systemu dubletów eksploatacyjno-chłonnych jest rzędu 20 zł/GJ, podczas gdy u odbiorcy jest rzędu 60 zł/GJ. Różnicę tą powoduje znaczny koszt przesyłu i funkcjonowanie źródeł szczytowego podgrzewu wód ciepłowniczych. Wszystkie te elementy widoczne na rysunku 8.4 tworzą bardzo sprawnie funkcjonujący system grzewczy, który w ostatnim czasie został jeszcze rozbudowany o kolejny odwiert eksploatacyjny Bańska PGP-3 i zrekonstruowany odwiert chłonny Biały Dunajec PAN-1. Obecnie spółka dysponuje zasobami wód geotermalnych w ilości 960 m³/godz. o temperaturze na wypływie około 86°C. Parametry te umożliwiają ocenę potencjału energetycznego z wód geotermalnych na ponad 40 MWt. W związku z tym, że firma dysponuje urządzeniami umożliwiającymi schłodzenie wód do temperatury rzędu 45°C, analizuje się możliwość głębszego schłodzenia z wykorzystaniem pomp ciepła. Możliwe byłoby w ten sposób pozyskanie mocy na poziomie kilkunastu MW. Analiza ta uwzględnia czynniki energetycznej i ekonomicznej optymalizacji pracy nowego rozwiązania.

Prace badawcze wykonywane w etapie projektowania części powierzchniowej systemu geotermalnego uzyskują szczególne uzasadnienie jeżeli możliwa jest demonstracja inwestorowi wzorcowych funkcjonujących instalacji. Ta zasada była podstawą opracowania i uruchomienia w ZEO IGSMiE PAN na Podhalu kaskadowego systemu wykorzystania energii geotermalnej (Bujakowski 2006). W obrębie tej instalacji wyodrębniona jest część komercyjna, która jest obsługiwana przez spółkę PEC Geotermia Podhalańska SA. Drugim elementem instalacji są obiekty funkcjonujące w ramach doświadczalnego systemu

zagospodarowania energii geotermalnej. Wydobywana woda geotermalna ma temperaturę rzędu 82–86°C. Wykorzystywana jest ona w celach komercyjnych do ogrzewania budynków i mieszkań, jak również do produkcji c.w.u. Woda powracająca od odbiorców ma temperaturę, w zależności od wielkości odbioru, rzędu 50–60°C. Wody o tym przedziale temperatury są przedmiotem doświadczeń w kaskadowym systemie zagospodarowania w obiektach: suszarni drewna, szklarni, hodowli ryb i upraw warzyw w podgrzewanej glebie. Celem doświadczeń jest upowszechnianie technologii umożliwiających odzyskiwanie tzw. „ciepła odpadowego” (nie wykorzystywanego do ogrzewania domów i mieszkań) pochodzącego z zakładu ciepłowniczego opartego na geotermalnych źródłach energii (Bujakowski 2006). Na rysunku 8.5 przedstawiono istniejące w zakładzie geotermalnym na Podhalu stopnie odbioru ciepła w systemie kaskadowym (Bujakowski 2010).

Jak powyżej zaznaczono, woda geotermalna eksploatowana jest odwiertami Bańska IG-1 i PGP-1 i PGP-3, następnie kierowana jest na wymiennik ciepła, gdzie oddaje ciepło wodzie obiegu wtórnego i dalej kierowana jest do złoża poprzez odwierty iniekcyjne Biały Dunajec PAN-1 i Biały Dunajec PGP-2 (rys. 8.4). Kaskadowy odbiór ciepła odbywa się w obiegu wtórnym wody ciepłowniczej.



Rys. 8.5. Kaskadowy system selektywnego wykorzystania energii geotermalnej w Laboratorium Geotermalnym IGSMiE PAN na Podhalu (Bujakowski 2010)

Fig. 8.5. Cascade use of geothermal energy In the Geothermal Laboratory of Mineral and Energy Economy Research Institute, Polish Academy of Sciences (Bujakowski 2010)

Pierwszy poziom tego systemu stanowi geotermalna sieć ciepłownicza zaopatrująca w ciepło (c.o. i produkcji c.w.u.) indywidualne budynki mieszkalne, bloki mieszkalne i obiekty użyteczności publicznej. Wykorzystywane są tu najwyższe temperatury wody złożowej, tj. 86–65°C. Ten obieg ciepłowniczy obsługiwany jest przez firmę PEC Geotermia Podhalańska SA i wykorzystuje dwa główne źródła ciepła tj. wymiennikownię geotermalną zlokalizowaną przy odwiertach produkcyjnych w miejscowości Szaflary oraz kotłownię szczytową zlokalizowaną w Zakopanem (rys. 8.4). Główna sieć ciepłownicza o długości około 14 km, łącząca wymiennikownię geotermalną z kotłownią szczytową, wykazuje straty ciepła wynoszące 2–4°C.

Drugi poziom kaskady (rys. 8.5) stanowi suszarnia drewna, której układ grzewczy zaprojektowany został dla temperatury 60°C. Powszechnie używane suszarnie drewna wykorzystują temperaturę znacznie wyższą, przekraczającą 90°C. Użycie niższego parametru nieco wydłuża (kilka dni) proces suszenia drewna lecz jednocześnie pozwala na uzyskanie surowca o lepszych cechach jakościowych zwłaszcza dla jego wykorzystania w przemyśle meblarskim.

Trzeci poziom odbioru ciepła reprezentuje szklarnia parapetowa, w której instalacje grzewcze zaprojektowano na temperaturę rzędu 45°C. Wykorzystanie takiego parametru wymagało zainstalowania blisko trzykrotnie większej powierzchni grzewczej radiatorów. W rzeczywistych warunkach kubaturowych szklarni wymóg ten mógł być spełniony poprzez zastosowanie upraw roślin na parapetach, pod którymi umieszczono pakiety radiatorów. Ponadto zostały one zainstalowane także na ścianach bocznych szklarni.

Kolejnym elementem kaskady jest obiekt chowu ryb ciepłolubnych z instalacjami dogrzewu wody hodowlanej zaprojektowanymi na temperatury rzędu 35°C. Obiekt ten przedstawiono szczegółowiej w dalszej części niniejszego rozdziału.

Ostatni – piąty poziom funkcjonującego układu reprezentują tunele foliowe do upraw warzyw w podgrzewanej glebie. Do systemu rur kierowana jest woda ciepłownicza o temperaturze 30–40°C. Główny układ grzewczy stanowi ruszt z rur z tworzywa sztucznego zagłębionych w glebie uprawnej na głębokości 30–40 cm. Układ pomocniczy tworzy 8 rur umieszczonych około 50 cm powyżej poziomu gleby, po dwie wzdłuż ścian i w centralnej osi tuneli foliowych. Tak skonstruowany układ grzewczy umożliwia wydłużenie czasu prowadzenia upraw. W trudnych warunkach klimatycznych Podhala udało się uzyskać praktycznie całoroczną produkcję warzyw (z wyłączeniem okresu niezbędnego dla zabiegów pielęgnacyjnych i regeneracyjnych gleby). Uprawiane warzywa to głównie pomidory, ogórki, papryka, sałata (w różnych odmianach), rzodkiewka itp.

Jednym z bardziej interesujących elementów kaskady odbiorców energii geotermalnej jest obiekt, w którym prowadzona jest doświadczalna hodowla ryb ciepłolubnych. Budowa obiektu zrealizowana została w ramach projektu zamawianego MNiSW pn. „Wykorzystanie ciepła wód geotermalnych do intensywnej produkcji warzywniczej i chowu ryb” (Bujakowski i in. 2001). Budowa obiektu dla przeprowadzenia badań wymagała opracowania koncepcji i projektów technicznych uwzględniających specyficzne potrzeby i warunki środowiskowe ciepłolubnej ryby – suma afrykańskiego. Jednym z ważniejszych czynników, który

narzucił specyficzne kryteria projektowi budynku, były szczególnie wysokie warunki termiczne m.in. temperatura wód w zakresie 25–33°C. Budynek ma wymiary 21,20 × 12,25 m i wykonany jest w technologii energooszczędnej Thermomur. Zapewniło to osiągnięcie dobrych parametrów energetycznych. Obiekt ten zużywa około 60% energii potrzebnej na ogrzanie analogicznego obiektu wykonanego w technologii tradycyjnej. Ściany budynku cechuje niski współczynnik przenikania ciepła $k = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$. W budynku zastosowano energooszczędną stolarkę okienną z tworzyw sztucznych pozwalającą na dalsze ograniczenie strat ciepła do otoczenia. Okna zainstalowane w obiekcie mają współczynnik przenikania ciepła $k = 0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ (w wersji z wypełnieniem przestrzeni międzyszybowej gazem szlachetnym). Wykonanie tego budynku w wyżej wymienionej technologii jest szczególnie ważne ze względu na wysoką temperaturę, jaka musi panować w jego wnętrzu. Temperaturę tę wymusza fakt zabezpieczenia elementów konstrukcyjnych budynku przed wykraplaniem się wilgoci zawartej w powietrzu, a pochodzącej z wody odparowującej w ośmiu basenach hodowlanych. Odpowiednie warunki temperaturowe i wilgotnościowe wewnątrz obiektu uzyskano między innymi poprzez zastosowanie folii paroprzepuszczalnej o przepuszczalności wody 3000 g/m²/dobę (Bujakowski i in. 2001).

Hodowla ryb ciepłolubnych wymaga posiadania źródła ciepła zabezpieczającego pokrycie potrzeb związanych z przygotowaniem wody technologicznej, której temperatura (optymalna dla rozwoju ryb) powinna mieścić się w przedziale 25–33°C. Zapotrzebowanie na ciepło w tym procesie wynika z konieczności ciągłego oczyszczania wody znajdującej się w basenach hodowlanych. W trakcie oczyszczania woda ulega ochłodzeniu. Konieczne jest także ciągłe uzupełnianie jej ubytku wodą studzienną, którą uprzednio należy podgrzać. Woda w basenach powinna mieć stałą temperaturę, jej wielkość jest uzależniona od gatunku hodowanych ryb.

Efektom zrealizowanego projektu było opracowanie i przeprowadzenie doświadczeń rozruchowych i funkcjonowania instalacji grzewczych wykorzystujących odnawialne źródło ciepła oraz przeprowadzenie doświadczeń hodowli suma afrykańskiego w różnych wariantach chowu. Do podgrzania wody technologicznej stosuje się ciepło zawarte w wodzie powracającej z centralnego ogrzewania. Oddaje ona ciepło przepływając przez wymiennik umieszczony bezpośrednio w zbiorniku rozprowadzającym oczyszczoną wodę technologiczną. Po częściowym ochłodzeniu jest kierowana na dolne źródło pompy ciepła, gdzie ulega dalszemu schłodzeniu. Woda powracająca na wymienniki płytowe z gałęzi zasilanej przez wymiennik JAD ma temperaturę około 20–45°C (w zależności od warunków atmosferycznych). Tak skonstruowany obieg wód umożliwił utrzymanie temperatury wewnątrz hali hodowlanej na poziomie około 30°C i temperatury wód w basenach hodowlanych wynoszącej średnio około 25°C. W takich warunkach cieplnych przeprowadzono szereg doświadczeń hodowlanych w różnych, od 28 kg/m³ do 57 kg/m³, zagęszczeniach obsady (liczba narybku). Przeprowadzone badania oceniono na podstawie: przeżywalności ryb, przyrostu masy, średniego przyrostu jednostkowego (przyrost masy jednej sztuki narybku w okresie trwania badań) oraz współczynnika pokarmowego (stosunek zużytej ilości paszy na przyrost 1 kg masy ryby). Przeżywalność ryb wynosiła ponad 93%, a dla ostatnich obsad ustabilizowała

się na poziomie 99%. Średni przyrost jednostkowy wynosił od 167% do 210%, natomiast współczynnik pokarmowy, dla różnych wariantów, mieścił się w zakresie 1,14 do 0,93. Mówi to o bardzo dobrym wykorzystaniu pasz przez ryby; na 1 kg masy ryb zużyto od 1,14 do 0,93 kg paszy (Bujakowski i in. 2001). Wyniki te świadczą o bardzo dobrych warunkach bytowych, które zostały wytworzone dla rozwoju suma afrykańskiego.

Wykorzystując wyniki badań przeprowadzonych w powyższym projekcie opracowano propozycję wykorzystania energii geotermalnej do hodowli suma afrykańskiego. Źródłem ciepła były tu wody kopalniane wypełniające wyrobiska zlikwidowanej części kopalni węgla, które mają temperaturę 22°C (Bujakowski 2001).

Problem optymalnego wykorzystania ciepła ziemi był głównym zadaniem badawczym w ramach realizacji Projektu Celowego pn. „Kaskadowy system wykorzystania niskotemperaturowej wody geotermalnej dla celów ciepłowniczych i konsumpcyjnych w rejonie Słomnik”. Opracowano tu koncepcję całego geotermalnego systemu ciepłowniczego opartego na wodach o temperaturze około 17°C ujęte specjalnie wykonanym odwiertem. Wody te nie mają statusu wód geotermalnych (mają temperaturę poniżej 20°C), aczkolwiek poprzez zastosowanie pomp ciepła możliwe jest wykorzystanie ich potencjału energetycznego w celach grzewczych. Przeprowadzone badania, opracowane i wdrożone projekty umożliwiły wskazanie sposobów lokalnego wykorzystania powszechnie występujących niskotemperaturowych horyzontów wód geotermalnych. System wykorzystuje hybrydowe źródła energii, na które składa się energia geotermalna (poprzez pompy ciepła) i energia gazu ziemnego i oleju opałowego (kotły grzewcze), pokrywające potrzeby ciepła osiedla bloków mieszkalnych, szkoły i domów prywatnych (Bujakowski i Barbacki 2000; Bujakowski 2000b).

Wykorzystanie wód geotermalnych i energii geotermalnej może być szczególnie interesujące w rekreacji i balneologii. Wody geotermalne często zawierają duże a niekiedy bardzo duże ilości rozpuszczonych substancji mineralnych. Bardzo często skład chemiczny tych wód predestynuje je do zastosowania w różnego rodzaju kuracjach i zabiegach leczniczych. Ten kierunek wykorzystania wód oprócz kierunku ciepłowniczego może znacząco podnieść atrakcyjność geotermii, co winno przekładać się na efektywność ekonomiczną. Problematyka ta znajdowała swoje miejsce w opracowaniach wykonanych dla rejonu miasta Krakowa (Bujakowski, Barbacki i Pająk 2005) oraz dla terenów zakładu górniczego eksploatacji piasku podsadzkiowego dla kopalń KGHM (Bujakowski i Wirth 2011).

Analiza warunków geotermalnych przeprowadzona dla Krakowa była podstawą do opracowania propozycji zagospodarowania wód i energii geotermalnej w ośrodku rekreacyjno-leczniczym lokalizowanym w rejonie Przylasku Rusieckiego (rys. 8.7). Układ terenowy oraz infrastrukturalno-własnościowy pozwoliły na ulokowanie na terenie około 18 ha szeregu funkcji rekreacyjnych, których centralnym rozwiązaniem jest kąpielisko geotermalne i obiekty balneologiczne. Realizacja dużego kompleksu rekreacyjno-sportowo-kulturalnego w Przylasku Rusieckim, który obejmowałby zespół geotermalnych kąpielisk, z podziałem na baseny całoroczne i sezonowe, a ponadto baseny rekreacyjne, zespół parkowy, tereny sportowo-rekreacyjne, boiska sportowe, zespół półnaturalnych zbiorników wodnych w wyrobiskach poeksploatacyjnych poszerzający ofertę rozwoju rekreacji wodnej i kąpeli sło-

necznych, daje szansę na aktywizację rekreacyjno-turystyczną wschodniej części Krakowa (Bujakowski 2015; Bujakowski i in. 2005; Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego 2005a, i).

Zbliżony charakter miała koncepcja zagospodarowania geotermalnego potencjału wód kopalnianych opracowana dla warunków obszaru kopalni piasku podsadzowego znajdującej się w miejscowości Obora koło Lubina (Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego 2005h, 2009c, m; Bujakowski i Wirth 2011).

Eksploatacja kopalni wymaga zastosowania szeregu urządzeń i wykonania prac znacząco wpływających na wygląd i cechy terenu. Jednym z ważniejszych zagadnień zrównoważonej gospodarki kopalniami jest rekultywacja terenu poeksploatacyjnego. Zakłady górnicze mają w zakresie swoich obowiązków prowadzenie takich prac rekultywacyjnych, które są często bardzo kosztowne. Zapisana w planie ruchu zakładu górniczego rekultywacja terenów poeksploatacyjnych zakłada m.in. niwelację terenu i obsadzenie roślinnością: drzewa i krzewy. Koncepcja rekultywacji terenu objętego eksploatacją piasku do potrzeb podsadzowych kopalń KGHM-u zakłada wykonywanie jej zgodnie z docelowym zagospodarowaniem w kierunku rekreacyjno-balneologicznym. Opracowana koncepcja wprowadza do formalnych obowiązków rekultywacji element dostosowania terenu do potrzeb wypoczynku, rekreacji, balneologii, sportu i innych usług niezbędnych jako oferta usług towarzyszących (parkingi, sklepy, mała gastronomia, drogi transportowe itp.). Odbiorcami usług będą zarówno osoby starsze i przebywające na emeryturze szukające ciszy i relaksu, młodzież wymagająca pro-



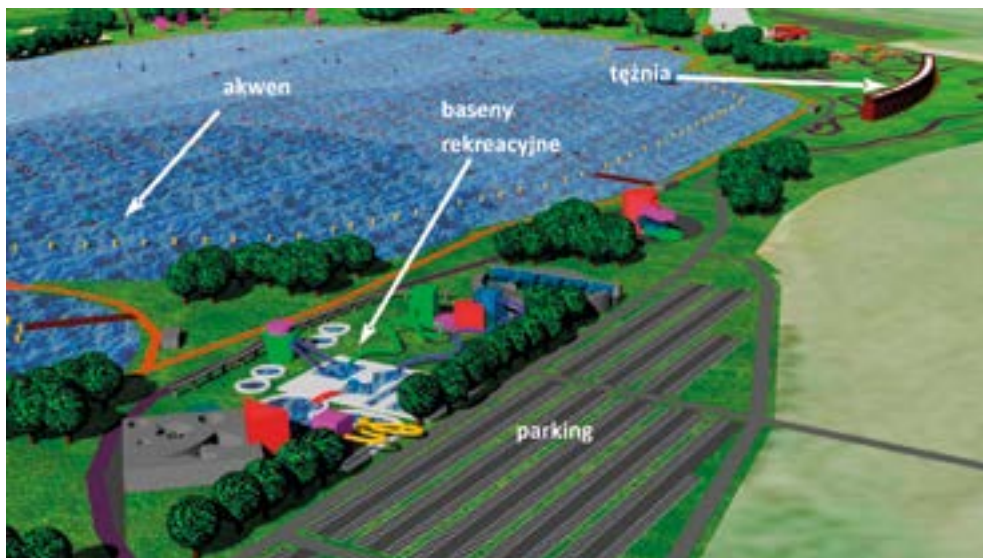
Rys. 8.6. Koncepcja kompleksowego zagospodarowania wód geotermalnych pod cele rekreacyjno-balneologiczne we wschodniej strefie Krakowa (Bujakowski 2015; Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego 2005a, i)

Fig. 8.6. The proposal of comprehensive utilization of geothermal water for recreational and balneological purposes in eastern zone of Krakow (Bujakowski 2015; Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego 2005a, i)



Rys. 8.7. Wizualizacja ośrodka rekreacyjno-leczniczego na terenie piaskowni Obora (Bujakowski i Wirth 2011; Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego 2005h)

Fig. 8.7. Visualization of the therapeutic and recreation center in the Sand pit Obora (Bujakowski and Wirth 2011; Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego 2005h)



Rys. 8.8 Widok na obiekty kąpieliska geotermalnego i obiekty innych funkcji (Bujakowski i Wirth 2011; Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego 2005h)

Fig. 8.8. Visualization of geothermal spa facilities and other objects (Bujakowski and Wirth 2011; Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego 2005h)

pozycji aktywnego wypoczynku, dzieci – placów zabaw i rozrywki pod okiem opiekunów, osoby aktywne fizycznie oczekujące oferty uprawiania sportów – boisk, basenów, zbiorników wodnych oraz osoby poszukujące usług poprawiających ich stan zdrowia – balneologia (Bujakowski i Wirth 2011).

Na rysunku 8.7 przedstawiono wizualizację głównych elementów koncepcji. W prawej górnej części obszaru ulokowane są obiekty rekreacyjno-lecznicze wraz z basenami bazującymi na energii geotermalnej wód kopalnianych. Funkcje tych obiektów w powiększeniu ukazano na rysunku 8.8. Wody kopalniane doprowadzane są w ten rejon rurociągiem z obszaru górniczego Lubin, gdzie są wypompowywane na powierzchnię. Potencjał tych wód był przedmiotem odrębnych analiz, którymi oszacowano potencjał techniczny ciepła zawartego w wypompowywanych wodach kopalnianych trzech na poziomie ponad 2700 TJ/rok. Temperatura tych wód jest rzędu 21–28°C i wymaga zastosowania pomp ciepła (Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego 2005h).

9. Etap funkcjonowania systemu geotermalnego

Ten etap rozwoju przedsięwzięcia geotermalnego rozpoczyna się z chwilą uzyskania odpowiedniej koncesji i dokumentów uprawniających do prowadzenia działalności górniczej. Są to głównie działania administracyjne wymagające jednakże odpowiedniego przygotowania i wiedzy.

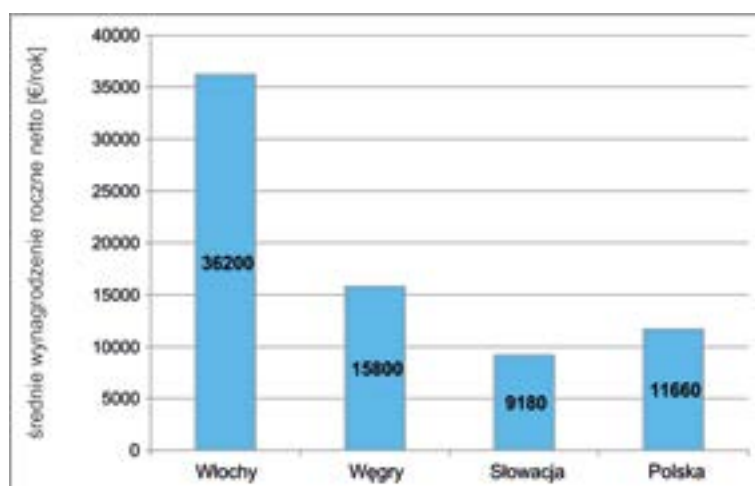
W trakcie funkcjonowania systemu geotermalnego występują problemy, które można zestawić w trzech obszarach tj. formalno-prawne, ekonomiczne i techniczne. Nawiasem mówiąc te obszary można także zidentyfikować we wcześniejszych etapach rozwoju projektu geotermalnego, jednakże w tym nabierają one bardzo wyraźnego znaczenia – komercyjnego. Wyraża się to głównie poprzez elementy:

- ekonomiczne mające wpływ na akceptację cen przez konsumentów energii oraz stan przedsiębiorstwa – operatora systemu geotermalnego,
- środowiskowe związane z bezpiecznym użytkowaniem złoża w skali wieloletniej (wydobycie, wykorzystanie i zrzut wód) oraz pozytywnym oddziaływaniem na atmosferę, co związane jest z eliminacją bądź ograniczeniem niskiej emisji, a także zmiany w zagospodarowaniu przestrzennym w tym krajobrazowe (kaskadowe wykorzystanie, możliwości rekreacyjno-lecznicze wód).

W zakresie oceny sytuacji ekonomicznej przedsięwzięć geotermalnych opracowano artykuły dotyczące problematyki cen energii cieplnej w skali wieloletniej (Pająk i Bujakowski 2007, 2011, 2013 i 2015) oraz dotyczące działań pomocowych uwzględniających ocenę przedsięwzięć i wsparcia finansowego środkami publicznymi (Bujakowski 2010). Jak zarysowano w pierwszym rozdziale pracy, ceny jednostki ciepła pochodzące ze źródła geotermalnego mogą być atrakcyjne dla konsumentów, konkurując w tym zakresie z tradycyjnymi nośnikami energii. Sytuację zmian tych cen pokazano na rysunku 1.1. Już obecnie ceny energii z geotermii są zdecydowanie niższe od ciepła wytworzonego z energii elektrycznej i oleju opałowego. Są one porównywalne, a nawet nieco niższe niż te dotyczące gazu ziemnego. Stwierdzony trend wzrostu cen ciepła z geotermii wykazuje najmniejszą dynamikę w okresie wieloletnim ze wszystkich nośników energii. Inaczej można stwierdzić, że koszty wytwarzania ciepła z geotermii są najbardziej stabilne w dłuższej perspektywie czasu pomimo wyższych kosztów inwestycyjnych determinujących wysokie koszty jednostki ciepła w początkowym okresie funkcjonowania źródła ciepła. Jest także w pełni zrozumiałe, że wprowadzenie systemu wsparcia finansowego przedsięwzięć geotermalnych na

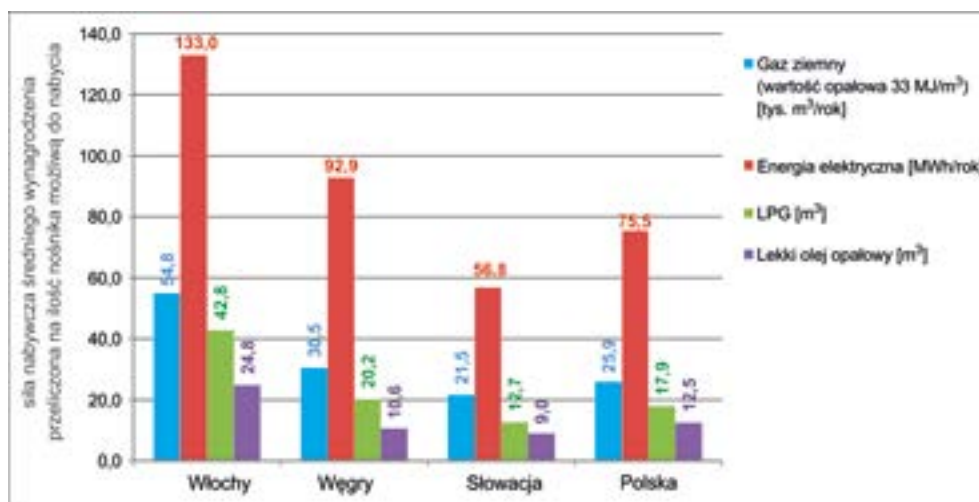
etapie inwestycyjnym przyniosłoby jeszcze lepszy wynik w perspektywie wieloletniej niż to stwierdza się obecnie (rys. 1.1). Jednocześnie trzeba wyjaśnić, że jakkolwiek każda forma wsparcia czy dotacji może budzić sprzeciw liberalnej ekonomicznie części społeczeństwa, to podniesienie problemu niskiej emisji a zwłaszcza uświadomienie skutków, jakie za sobą niesie i wpływu na zdrowie, może radykalnie zmienić to negatywne stanowisko. Wydaje się oczywiste, że lepiej zapobiegać i wydawać środki na działania wyprzedzające niż na skutki i problemy z nimi związane. Niestety, to także wymaga zrozumienia a dodatkowo dużej odwagi i determinacji u decydentów rządowych, regionalnych a nawet lokalnych.

Problem akceptacji tego ekologicznego źródła energii związany jest ściśle z sytuacją ekonomiczną polskich gospodarstw, a dokładniej z siłą nabywczą nie tyle złotówki co średniego miesięcznego wynagrodzenia. Wyniki przeprowadzonych analiz porównawczych warunków istniejących w Polsce, Włoszech, Słowacji i Węgrzech przedstawiono na rysunku 9.1 i 9.2 (Pająk i Bujakowski 2015). Według zestawionych danych w chwili obecnej średnie wynagrodzenie w Polsce jest nieco niższe niż na Węgrzech a wyższe niż na Słowacji, i jednocześnie ponad trzykrotnie niższe niż we Włoszech (rys. 9.1). Taka sytuacja ekonomiczna i istniejący poziom cen energii w tych krajach dają w efekcie duże zróżnicowanie siły nabywczej w nagrodzenia w kontekście zakupu energii we Włoszech i w krajach znacznie uboższych. W krajach naszego regionu (Polska, Słowacja, Węgry) siła nabywcza jest zbliżona i adekwatna do średnich przychodów. Jakkolwiek wyraźnie zaznacza się trend wskazujący, że im wyższe dochody, tym większa siła nabywcza. Interesujący jest analizowany przypadek Włoch, gdzie pomimo tego iż wynagrodzenie jest ponad trzykrotnie wyższe niż w Polsce, to analizowana siła nabywcza nośników energii jest wyższa, ale na poziomie dwukrotnym, rysunek 9.2 (Pająk i Bujakowski 2015).



Rys. 9.1. Średnie roczne dochody w wybranych krajach w latach 2011/2012 w EUR/rok (Pająk i Bujakowski 2015)

Fig. 9.1. The average annual net salary for selected countries in the years 2011/2012 in EUR/year (Pająk and Bujakowski 2015)



Rys. 9.2. Siła nabywcza średniej płacy, jak wiele energii można nabyć za roczne średnie wynagrodzenie w wybranych krajach (Pająk i Bujakowski 2015)

Fig. 9.2. Purchasing force of a salary, how many energy might be bought by a yearly salary (Pająk and Bujakowski 2015)

Analizując siłę nabywczą pieniądza (po przeliczeniu na EUR) w danym kraju dla przypadku energii elektrycznej, dochodzimy do odmiennych wniosków. Najmniej energii za 1 EUR można nabyć we Włoszech – około 3,7 kWh, nieco więcej na Węgrzech około 5,9 kWh, na Słowacji 6,2 kWh, a w Polsce ta wielkość jest prawie dwukrotnie wyższa, bo około 6,5 kWh.

Oczywiście wyniki te wskazują jedynie na względnie niskie koszty wytwarzania energii w naszym kraju; prawdziwą sytuację możliwości nabywczych, a co się z tym wiąże akceptacji społecznej – prezentuje wykres z rysunku 9.2, zgodnie z którym przeciętny Polak może kupić za swoją pensję znacznie mniej energii niż obywatel Węgier nie mówiąc o Włoszu.

Innym przykładem badań realizowanych w ramach etapu funkcjonowania systemu geotermalnego były prace wykonane w projekcie „Geothermal Regulation-Heat” (Bujakowski, Kępińska, Tomaszewska 2010). Projekt ten dotyczył obszarze działań formalno-prawnych i ekonomicznych. Analizie poddano obowiązujące akty prawne – głównie Prawo Geologiczno-Górnictwo i sposoby finansowego wsparcia przedsięwzięć geotermalnych. Celem badań była identyfikacja barier oraz przeszkód prawnych i finansowych utrudniających rozwój wykorzystania geotermii w aspekcie ich likwidacji (Kępińska i Tomaszewska 2010). Badania realizowano w ramach projektu współfinansowanego przez UE pn. „Intelligent Energy – Europe Geothermal Regulation-Heat” – GTR-H”, w którym autor był kierownikiem polskiej części projektu. W projekcie brało udział kilkunastu partnerów z siedmiu krajów. Wśród nich były kraje tzw. dobrych praktyk – Francja, Niemcy, Holandia, oraz kraje tzw. docelowe – posiadające perspektywiczne zasoby geotermalne – Polska, Węgry, Irlandia, Wielka Brytania-Irlandia Północna. W trakcie jego realizacji wydano kilka publikacji (m.in. Bujakowski, Kępińska, Tomaszewska 2010), oraz opracowano raport końcowy „Geothermal

Regulation Framework” Final version Report of EU Project Intelligent Energy Europe”. W oparciu o wieloletnie doświadczenia z prac rozwojowych i wdrożeń projektów geotermalnych stwierdzono konieczność wprowadzenia ułatwień w obszarze formalno-administracyjnym. Nacisk położono na procedury pozyskiwania koncesji poszukiwawczej i eksploatacyjnej, które winny być bardziej czytelne i szybsze. Efektem między innymi tych prac, konsultowanych na szczeblu rządowym w Ministerstwie Środowiska, było przekazanie uprawnień w tym zakresie na poziom województwa na podstawie uchwalonych przepisów ustawy Prawo geologiczne i górnicze z dnia 9 czerwca 2011 r.

Innym zagadnieniem mocno podnoszonym w dokumentach wynikowych z prac projektu GTR-H był problem wsparcia finansowego przedsięwzięć geotermalnych.

W wielu krajach stosuje się różnego rodzaju działania, np. we Francji etap wiercenia objęty jest ubezpieczeniem krótkoterminowym opartym na funduszu ubezpieczeniowym utworzonym wokół agencji państwowej – ADEME. Ubezpieczeniu temu podlega ryzyko nieuzyskania zadawalających inwestora parametrów złożowych. W takim przypadku inwestor może otrzymać z tego funduszu zwrot 65% do maksymalnie 95% kosztów odwiertu. Na fundusz ten składa się m.in. składka 3–5% wartości ubezpieczenia. Ta propozycja dotyczy wiercenia odwiertu, inna obejmuje etap funkcjonowania zakładu geotermalnego. Dla tego przypadku ma zastosowanie tzw. ubezpieczenie długoterminowe. Fundusz tworzy podobnie jak w ubezpieczeniu krótkoterminowym agencja ADEME i inne podmioty. Firmy ubezpieczające się wnoszą do funduszu składkę 12 tys. EUR/rok. Ze środków tych można korzystać w sytuacji zmiany parametrów złoża (wydajność, temperatura) w okresie 20 lat funkcjonowania zakładu. Jednorazowo na naprawę można uzyskać do 1,2 mln EUR wsparcia.

W ramach wspierania energetyki geotermalnej a szerzej energii z Odnawialnych Źródeł Energii w niektórych państwach podatek VAT został obniżony z 19,6 do 5,6% na energię wytworzoną z energii geotermalnej. Podatek ten dotyczy energii wyprodukowanej z zakładu w którym 60% energii pochodzi z geotermii. Te i inne metody wsparcia geotermii były dyskutowane w naszym kraju na poziomie rządowym.

W efekcie przyjęty został model wsparcia finansowego geotermii w zakresie utrzymania zerowej stawki opłaty eksploatacyjnej oraz preferencyjny poziom opłaty za wykorzystanie informacji geologicznej w wysokości 1% jej wartości.

Uruchomiony został także ze środków NFOŚiGW wieloletni program dofinansowania robót geologicznych pierwszego odwiertu geotermalnego pn. „Energetyczne wykorzystanie zasobów geotermalnych” z budżetem przekraczającym 100 mln zł (www.mg.gov.pl). Można uznać, że była to forma wsparcia zbliżona do funkcjonującego we Francji ubezpieczenia krótkoterminowego proponując wsparcie do 50% kosztów kwalifikowanych przy jednocześnie maksymalnej kwocie wsparcia 12 mln zł. Program funkcjonował kilka lat i został przerwany pomimo że na 9 objętych wsparciem obiektów tylko jeden, odwiert Czarony Potok GT-1 zlokalizowany w wyjątkowo trudnej sytuacji geologicznej, okazał się negatywny tzn. nie udostępniono nim wód geotermalnych. Pozostałe odwierty są na różnych etapach zagospodarowania ujętych nimi wód złożowych. Program miał funkcjonować do 2015 roku, ale jak wspomniano został przerwany w 2013 roku i nie zastąpiony jakąś inną formą

wsparcia ekonomicznego zmniejszającego ryzyko geologiczne niezyskania oczekiwanych parametrów złożowych.

W etapie funkcjonowania systemu geotermalnego jednym z większych problemów eksploatacyjnych zakładów geotermalnych jest proces zatłaczania schłodzonych wód geotermalnych. Dotyczy to praktycznie wszystkich polskich zakładów geotermalnych, w których wody geotermalne wydobywane są otworami produkcyjnymi, a następnie po oddaniu ciepła w wymiennikach kierowane są do otworów chłonnych i zatłaczane do złoża. W takim dublecie otworów eksploatacyjno-chłonnych wielkość zasobów eksploatacyjnych ujęcia musi być ustalana na podstawie wielkości chłonności a nie wydajności, która może być znacznie większa od chłonności. W efekcie nawet potencjalnie bardzo wysoka wartość mocy cieplnej systemu (według wydajności) może okazać się znacznie niższa (według chłonności). W trakcie zatłaczania wód, zwykle po 2–3 latach, obserwuje się spadek chłonności, co determinuje konieczność wykonania bardzo kosztownych zabiegów uzdatniania i oczyszczania strefy chłonnej (Kapuściński i in. 1997). Niezwykle istotne dla operatora systemu jest zatem uzyskanie maksymalnie dużej wartości chłonności i utrzymanie jej w możliwie długim czasie na niezmiennym poziomie.

Badania chłonności były podstawą merytoryczną Projektu Celowego MNiSW pn. „Stymulacja otworów geotermalnych zmodyfikowana metodą „miękkiego kwasowania” (*soft acidizing*)” zrealizowanego w 2008 roku. Wnioskodawcą projektu był PEC Geotermia Podhalańska SA a wykonawcą prac badawczo-rozwojowych IGSMiE PAN – kierownikiem prac badawczo-rozwojowych był autor. W efekcie tego projektu zaprojektowano, wykonano i przetestowano aparaturę umożliwiającą zatłaczanie cieczy stymulującej chłonność horyzontu wodonośnego (fot. 9.1) (Bujakowski i in. 2008).



Fot. 9.1. Stanowisko pompowe i kontrolno-pomiarowe do zabiegów „miękkiego kwasowania”
(fot. Graczyk, Bujakowski i in. 2008)

Phot. 9.1. Station of pumping and controlling for procedure “soft acidizing”
(photo. Graczyk, Bujakowski et. al. 2008)

Instalacja została przetestowana w warunkach prowadzonej eksploatacji i zatłaczania wód geotermalnych w zakładach geotermalnych w Bańskiej i w Uniejowie, a więc przy różnych typach skał zbiornikowych. Przeprowadzonymi badaniami stwierdzono, że zabiegi stymulacji zmodyfikowaną metodą „miękkiego kwasowania” odwiertu i skał zbiornikowych w Uniejowie udrożniały w pewnym zakresie odwiert i strefę przyodwiertową, spowalniając postępujący spadek chłonności. Warto podkreślić, że skałami zbiornikowymi są tu piaskowce kwarcytowe o spoiwie ilastym z bardzo niewielkim udziałem węglanów do 2,8% a więc mało podatne na działanie kwasu solnego. Najlepsze wyniki uzyskano w efekcie jednego z cykli zabiegów, kiedy indeks chłonności osiągnął $I_{ch} = 6,80\text{--}8,70 \text{ m}^3/\text{h}/\text{bar}$, a następnie obniżył się do poziomu $6,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{bar}$ w ciągu 8 miesięcy po zabiegu. Dla porównania – po wykonaniu tradycyjnego kwasowania strefy złożowej w odwiercie Uniejów PIG/AGH-1 w 2000 r. indeks chłonności wynosił $I_{ch} = 9,17 \text{ m}^3/\text{h}/\text{bar}$, po czym obserwowano spadek chłonności odwiertu (Bentkowski i Biernat 2001). Oceniono, że osiągnięty dzięki „miękkiemu kwasowaniu” indeks chłonności na poziomie $7\text{--}8 \text{ m}^3/\text{godz.}/\text{bar}$ będzie satysfakcjonujący dla eksploatatora systemu geotermalnego, o ile utrzymywałby się przez 3–4 miesiące (do wykonania następnego). W takim przypadku natężenie przepływu rzędu $50\text{--}60 \text{ m}^3/\text{h}$ (wymagane w okresie szczytowego zapotrzebowania na ciepło) można byłoby uzyskać przy ciśnieniu zatłaczania $7\text{--}7,6 \text{ bar}$, natomiast po spadku chłonności zapewniałoby zatłoczenie jedynie połowy podanej objętości (około $30\text{--}35 \text{ m}^3/\text{h}$) wody. Uznano, że wyniki te są jednoznacznie obiecujące, mają charakter efektów wstępnych i będą wykorzystane w dalszych badaniach (Bujakowski i in. 2008).

Tematyka zastosowań stymulacji złoża w celu podtrzymania/podniesienia chłonności została podjęta na odwiertach w Skierniewicach w 2009 roku oraz w Pyrzycach w 2012 r. Badania zrealizowane w Skierniewicach opisano poniżej natomiast zrealizowane w Pyrzycach wykonywane były przez Geotermię Pyrzyce sp. z o.o. w latach 2012–2014 w ramach programu unijnego LIFE+ (Geotermia Pyrzyce 2014). Zastosowano tu tzw. „Super Miękkie Kwasowanie” (SMK), która to metoda ma być udoskonaleniem metody „miękkiego kwasowania”. Wadą tej metody, według autorów, było nierytmiczne stosowanie zabiegów zatłaczania kwasu solnego oraz usuwanie skutków kolmatacji, a nie zapobieganie powstawania inkrustacji. Autorzy uważają, że metoda SMK jest wynikiem nowatorskiego podejścia polegającego na odejściu od stosowania jedynie metod okresowej poprawy chłonności warstwy złożowej na rzecz ich zintegrowania z metodą pozwalającą na utrzymanie chłonności (www.acidizing.com.pl/pl/). W tej metodzie zapobieganie powstawaniu inkrustacji winno być uzyskane poprzez ciągle dozowanie znacznie niższych niż w metodzie „miękkiego kwasowania” dawek 30% odtlenionego kwasu solnego z dodatkiem antyskalanta lub dyspergatora do przepływającej solanki przed filtrami i wymiennikami ciepła. Według autorów dozowanie niedużych dawek antyskalanta i/lub dyspergatora pozwala obniżyć dawkę kwasu solnego, wynoszącą kilkadziesiąt g kwasu na 1 m^3 solanki. W metodzie SMK proces degradacji kwasu solnego zachodzi wyłącznie w rurze zatłaczającej (reakcja szybka), a nie w otworze zatłaczającym, lub w warstwie złożowej (Geotermia Pyrzyce 2014; www.acidizing.com.pl/pl/). Projekt ten w bardzo interesujący sposób modyfikuje dotych-

czas stosowane w świecie metody „miękkiego kwasowania”. Należy z dużą uwagą śledzić jej skuteczność w dłuższym okresie czasu.

Problematyka poprawy chłonności była zasadniczym celem badawczym programu zrealizowanego w ramach zamówienia Ministra Środowiska z 2009 roku pn. „Opracowanie wytycznych projektowych poprawy chłonności skał zbiornikowych w związku z zatłaczaniem wód geotermalnych w polskich zakładach geotermalnych”. Temat wykonywany był przez konsorcjum Geotermii Mazowieckiej SA (lider) oraz Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, którego reprezentantem w programie był autor (Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego 2009d).

Głównym celem przedsięwzięcia było opracowanie wytycznych projektowych poprawy chłonności skał zbiornikowych: piaskowców jury dolnej i kredy dolnej (Niż Polski) oraz wapieni i dolomitów zbiornika eoceńsko-triasowego (niecka podhalańska).



Fot. 9.2. Prace rekonstrukcyjne na otworze Skierniewice GT-1 z wykorzystaniem przewodu coiled tubing (fot. B. Bielec)

Phot. 9.2. Reconstruction work in the Skierniewice GT-1 well using the coiled tubing (photo B. Bielec)

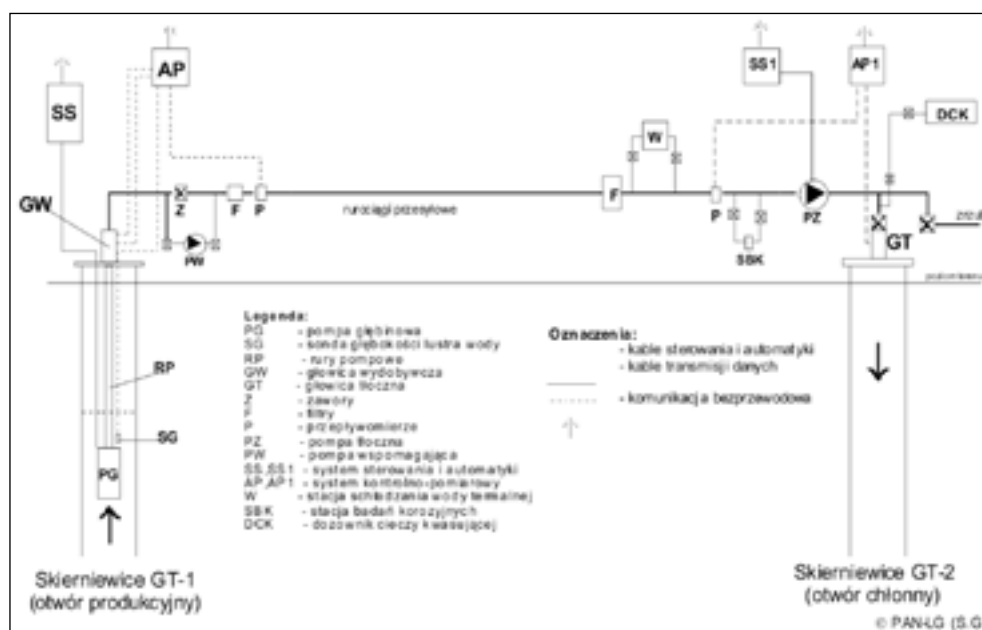
Program badawczy bazował na dublecie otworów Skierniewice GT-1 i Skierniewice GT-2, które były podstawowym obiektem dla testów metod optymalizacji procesu zatłaczania.

Zakres prac objętych projektem składał się z trzech etapów (Kępińska i Bujakowski red. 2011):

- Etap I – obejmował uruchomienie funkcjonowania obu otworów co wymagało ich rekonstrukcji i połączenia rurociągiem oraz wyposażenia w stanowiska badawcze.
- Etap II – dotyczył prowadzenia eksploatacji i zatłaczania wód geotermalnych z badaniami, pomiarami i testami, realizowanymi w tzw. cyklach badawczych uwzględniających wyniki istniejących w świecie rozwiązań.
- Etap III – obejmował opracowanie dokumentacji z wykonanych prac oraz wytycznych projektowych poprawy chłonności skał zbiornikowych w polskich zakładach geotermalnych. Projekt realizowany był od 01.10.2009 r. do 30.09.2011 r.

W I etapie wykonano prace o charakterze prac rekonstrukcyjnych otworów obejmujące m.in. czyszczenie otworów jednostką coiled tubing (CT) (fot. 9.2), badania stanu technicznego zarurowania metodami geofizyki wiertniczej oraz kwasowanie strefy złożowej. W wyniku tych prac wytypowano jako wydobywczy otwór Skierniewice GT-1, zaś jako chłonny otwór Skierniewice GT-2.

Do przeprowadzenia testów stymulacyjnych skał strefy chłonnej przygotowano i wykonano instalację wydobywczo-zatłaczającą według schematu zamieszczonego na rysunku 9.3.



Rys. 9.3. Schemat geotermalnej instalacji wydobywczo-zatłaczającej Skierniewice GT-1 – Skierniewice GT-2 (Kępińska i Bujakowski red. 2011)

Fig. 9.3. Schema of installation of exploitation and injection geothermal water in doublet wells: Skierniewice GT-1 and Skierniewice GT-2 (Kępińska and Bujakowski ed. 2011)

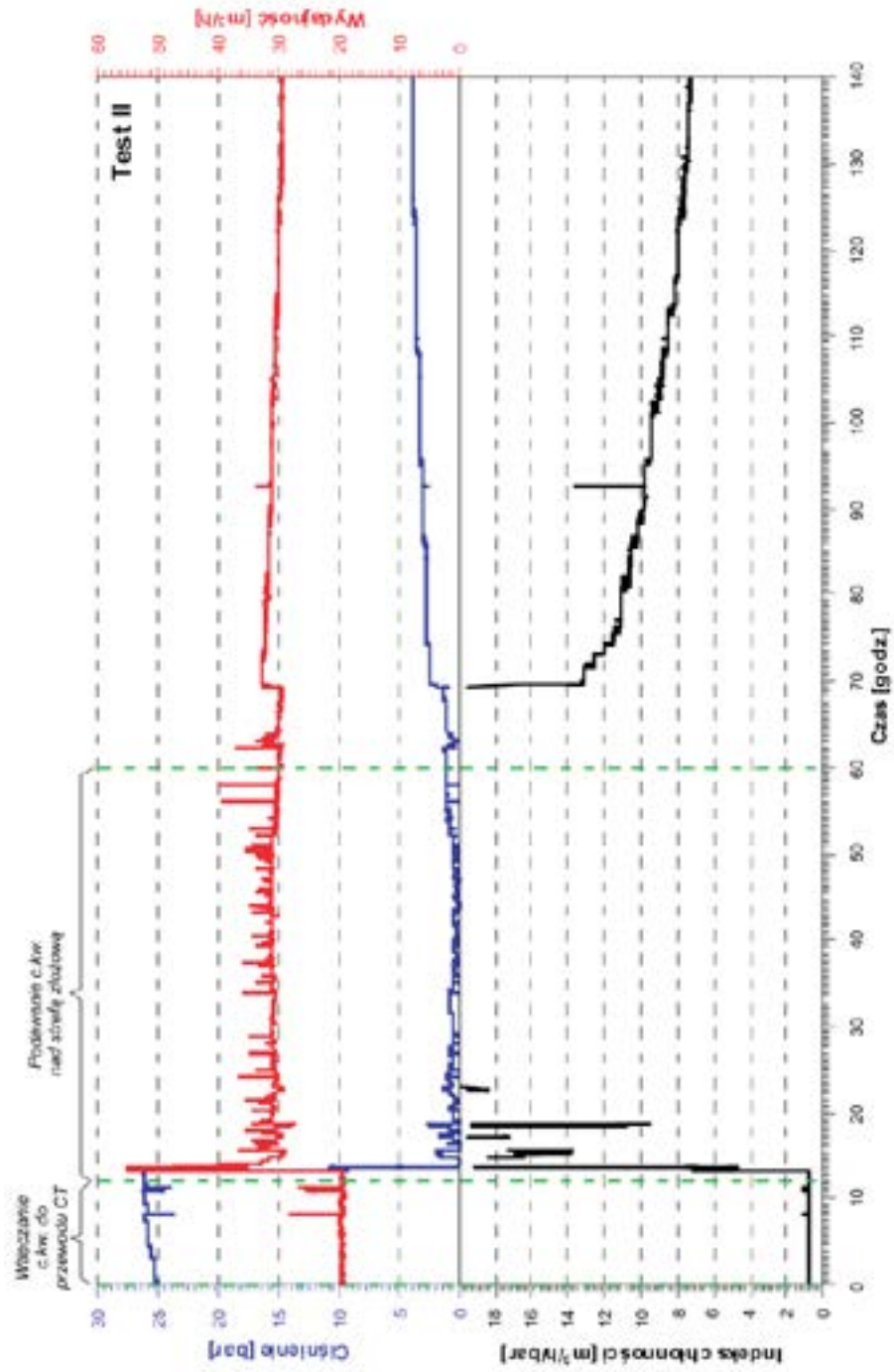
Otwory wyposażono w odpowiednie głowice oraz aparaturę kontrolno-pomiarową. W otworze eksploatacyjnym Skierniewice GT-1 zamontowano pompę głębinową. Na głowicy otworu chłonnego Skierniewice GT-2 zamontowano pompę obiegową ssąco-tłoczącą, której zadaniem było wspomaganie zatłaczania. Dla separacji fazy stałej, na rurociągu łączącym odwierty, zamontowano filtr workowo-magnetyczny. Konstrukcja głowicy tłocznej otworu Skierniewice GT-2 umożliwiała zamontowanie aparatury do dozowania cieczy kwasującej wykorzystywanej w testach stymulacyjnych.

W okresie od marca do sierpnia 2011 r. wykonano osiem testów. Sześć z nich przeprowadzono przy użyciu przewodu coiled tubing (CT), w którym ciecz kwasująca podawana była do strumienia zatłaczanej wody geotermalnej bezpośrednio nad strefę chłonną na głębokość około 2765 m, natomiast dwa testy polegały na podawaniu cieczy kwasującej wprost do wody geotermalnej na głowicy otworu chłonnego. Do dozowania cieczy użyto specjalnego zestawu dozującego, składającego się ze zbiornika na ciecz kwasującą oraz pompy tłokowej z nurnikiem ceramicznym, która umożliwiała dozowanie cieczy z wydajnością od 0,1 do 10 dm³/min przy maksymalnym ciśnieniu roboczym 6,0 MPa (fot. 9.2). Dobór i skład standardowej cieczy kwasującej oparto o następujące proporcje (dla przygotowania 1000 dm³ cieczy kwasującej: kwas solny HCl (33%) – 864 dm³, inhibitor korozji AII 600 – 5 dm³, woda geotermalna z otworu Skierniewice GT-1 – 131 dm³). Tak przygotowana mieszanina standardowa służyła (przy odpowiedniej wydajności dozowania) do osiągnięcia odczynu pH = 2 wody geotermalnej (cieczy stymulującej) zatłaczanej do strefy złożowej.

Podczas testów prowadzono pomiar i archiwizację parametrów zatłaczania przy użyciu czujników rozmieszczonych w różnych miejscach instalacji wydobywczo-zatłaczającej. Pomiarami objęto m.in.: wydajność zatłaczania, temperaturę i ciśnienie wody geotermalnej na głowicach obu badanych otworów a także położenie zwierciadła wody w otworze Skierniewice GT-1.

Poniżej na rysunku 9.4 przedstawiono przykładowe wyniki badań wykonanych w ramach testu nr II. W trakcie tego testu wtłoczono 1000 dm³ cieczy kwasującej o standardowym składzie z użyciem przewodu CT i stanowiska pompowego „miękkiego kwasowania” przy stałej wydajności 30 m³/godz. wody geotermalnej przetłaczanej z otworu Skierniewice GT-1 do otworu Skierniewice GT-2 w czasie 60 godzin. Obserwacje ciśnienia prowadzono przy tej samej stałej wydajności przez okres 25 dób. Zestawienie zmian ciśnienia i wydajności oraz wynikające z nich zmiany indeksu chłonności zaobserwowane w trakcie początkowej fazy testu nr II przedstawiono na rysunku 9.4.

Z przebiegu testów „miękkiego kwasowania”, analiz ich rezultatów oraz innych badań i obserwacji głównie związanych z korozyjnością instalacji (przeprowadzone przez zespół prof. Jacka Banasia z AGH), badań mineralogiczno-petrograficznych skał złożowych (opracowanych przez prof. Macieja Pawlikowskiego z AGH) i modelowań wytrącania substancji mineralnych z wód geotermalnych i zjawisk chemicznych zachodzących w zatłaczanych wodach (wykonywane przez prof. Barbarę Tomaszewską z IGSMiE PAN), wynika, że głównymi przyczynami spadku chłonności strefy przyotworowej i skał zbiornikowych w otworze Skierniewice GT-2 są zjawiska korozji i wytrącania wtórnych substancji mineralnych



Rys. 9.4. Zmienność parametrów hydrodynamicznych w trakcie testu nr II „miękkiego kwasowania” (Kepińska i Bujakowski red. 2011)

Fig. 9.4. Variability of hydrodynamic parameters during the test no. II „soft acidizing” (Kepińska and Bujakowski ed. 2011)

(Kępińska i Bujakowski red. 2011). Ich produktami są tlenki, wodorotlenki i siarczki żelaza (efekty korozji), a także wtórny aragonit i kalcyt, prowadzące do uszkodzeń chłonności. Procesy te zależą m.in. od wydatku i czasu zatłaczania wody geotermalnej. Potwierdzono, że ciśnienie rośnie w znacznie większym tempie w przypadku zatłaczania z dużą wydajnością: w ciągu 120 h od zaprzestania podawania cieczy kwasującej do wody geotermalnej indeks chłonności w teście II obniżył się z 25 do 8 m³/godz./bar.

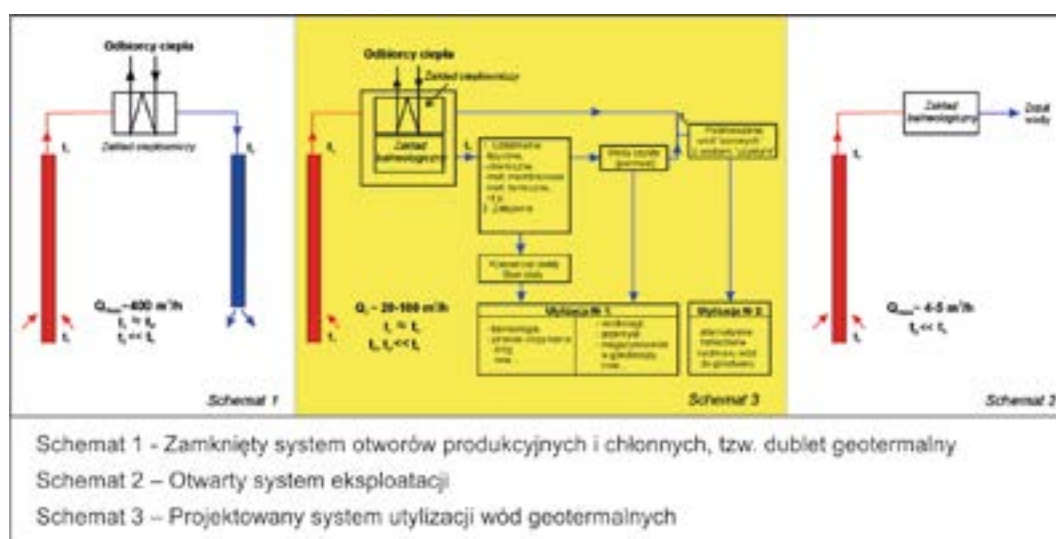
W wyniku przeprowadzonych badań opracowano szereg zaleceń dotyczących m.in. (Kępińska i Bujakowski red. 2011):

- wyposażenia odwiertów oraz instalacji kontaktujących się z wodami złożowymi w materiały zabezpieczające lub co najmniej ograniczające korozyjne własności wód geotermalnych,
- skutecznego zabezpieczenia instalacji przed dostępem tlenu i zminimalizowania odgazowywania wody geotermalnej mogących powodować zwiększoną korozyjność lub wytrącanie składników mineralnych,
- utrzymania eksploatacji dubletu odwiertów w warunkach optymalnych dla złoża unikając gwałtownych zmian wielkości natężenia wydobywania,
- stosowania inhibitorów, których działanie może ograniczać wytrącanie substancji jak i korozję, w warunkach stałego lub okresowego dawkowania,
- stosowania zabiegów intensyfikacji chłonności poprzez okresowe kwasowanie strefy złożowej z użyciem różnych substancji oraz „miękkie kwasowanie” w warunkach stałego lub okresowego, ale o dużej częstotliwości, dawkowania cieczy stymulujących w rejon złożowy (poprzez rurki zabiegowe) lub bezpośrednio do strumienia wód na głowicy odwiertu chłonnego,
- prowadzenia monitoringu pracy całej instalacji ze szczególnym uwzględnieniem obserwacji zachowania się złoża w trakcie wieloletniej eksploatacji i zatłaczania.

Skuteczna stymulacja złóż geotermalnych jest jednym z ważniejszych zadań oddziaływania na złożę, umożliwiającą wieloletnią i ekonomicznie uzasadnioną pracę systemu geotermalnego. Badania nad tym zagadnieniem będą z pewnością jednym z najintensywniej rozwijanych obszarów.

Innym istotnym problemem z obszaru rozwiązań technologicznych zmierzających do poprawy efektywności pracy całego systemu geotermalnego jest kwestia uzdatniania wód geotermalnych. W Polsce i krajach europejskich przyjęte są dwa systemy eksploatacji wód geotermalnych (rys. 9.5): zamknięty system otworów produkcyjnych i chłonnych, tzw. dublet geotermalny (m.in. Niemcy, Francja, w Polsce: Podhale, Pyrzyce, Stargard Szczeciński, Uniejów) oraz system otwarty (m.in. Islandia, Słowacja, w Polsce: Mszczonów, Poddębice, Szymbark, Bukowina Tatrzańska, Białka).

W ramach realizacji projektu rozwojowego finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju pn. „Kompleksowe wykorzystanie wód geotermalnych w kontekście poprawy bilansu wodnego i ograniczenia lub likwidacji ilości zatłaczanych wód do górotworu” przeprowadzono badania zmierzające do określenia warunków i możliwości uzdatniania wód geotermalnych w zakładach o różnych metodach eksploatacji. Kierownikiem tematu



Rys. 9.5. Schemat istniejących i projektowanych systemów użycia wód geotermalnych (Bujakowski i Tomaszewska 2009)

Fig. 9.5. Diagram of the existing and planned utilization of geothermal systems (Bujakowski and Tomaszewska 2009)

był autor, a głównym wykonawcą dr hab. inż. Barbara Tomaszewska. Projektowany proces oczyszczania wód geotermalnych opiera się na znanych metodach stosowanych dla innych celów, jednakże wdrożenie ich w systemach geotermalnych w istotny sposób przyczyniłoby się do obniżenia wysokich nakładów inwestycyjnych (koszty otworu chłonnego, koszty poprawy chłonności itp.) i poprzez to do szybszego rozwoju krajowej geotermii. Możliwość eksploatacji wód w układzie otwartym poprawia ekonomiczny aspekt przedsięwzięcia, co związane jest z brakiem konieczności wykonania otworu chłonnego, a zagospodarowanie eksploatowanych wód na cele pitne, dodatkowo sprzyja poprawie systemu gospodarki wodami zwykłymi.

W Polsce dla wydobywania wód geotermalnych dla celów balneoterapeutycznych i rekreacyjnych stosowany jest system otwarty, a eksploatacja prowadzona jest zwykle ze stosunkowo małą wydajnością (rys. 9.5 – Schemat 2). Tylko w nielicznych przypadkach system bazuje na dublecie otworów (np. Ustroń). Nadmiar wód bądź wody zużyte w kąpieliskach i sanatoriach odprowadzane są zwykle do kanalizacji lub zrzucane do cieków powierzchniowych (Lądek, Cieplice, Duszniki).

W systemie zamkniętym (rys. 9.5 – Schemat 1) wykorzystanie wód geotermalnych ma charakter ograniczony. W zakładzie ciepłowniczym następuje odzysk wyłącznie ciepła jako jednego z elementów decydujących o właściwościach wody. Właściwości lecznicze i terapeutyczne wód geotermalnych, stanowią wciąż jeszcze niewykorzystywaną szansę rozwoju sektora turystyki i lecznictwa w naszym kraju. Prace zmierzające do kompleksowego wykorzystania wód geotermalnych dla celów ciepłowniczych, balneologicznych oraz pitnych



Fot. 9.3. Kontener stanowiska uzdatniania wód geotermalnych (fot. B. Tomaszewska)

Photo. 9.3. The container of the research station of the geothermal water treatment (phot. B. Tomaszewska)



Fot. 9.4. Wyposażenie stanowiska badawczego uzdatniania wód geotermalnych (fot. B. Tomaszewska)

Photo. 9.4. Equipment of the research station of the geothermal water treatment (phot. B. Tomaszewska)

przewidują wprowadzenie sprawnego technicznie systemu uzdatniania wód geotermalnych (rys. 9.5 – Schemat 3), co przyczyniłoby się do:

- poprawy warunków gospodarowania zasobami wód zwykłych, poprzez wykorzystanie uzdatnionych wód geotermalnych,
- ograniczenia procesów korozji i wytrącania minerałów decydujących o kolmatacji systemów geotermalnych, poprzez próbę zmieszania w odpowiednich proporcjach, surowych wód schłodzonych na wymiennikach ciepła z „wodami czystymi” po procesie uzdatniania,
- rozwoju sektora balneoterapii, turystyki i rekreacji,
- odzysku substancji mineralnych o znaczeniu balneologicznym i gospodarczym (produkcja surowców mineralnych).

Dla przeprowadzenia prac badawczych uruchomione zostało w Zakładzie Energii Odnawialnej i Badań Środowiskowych IGSMiE PAN na Podhalu specjalne stanowisko badawcze (fot. 9.3 i 9.4). Aparatura ta umożliwiła prowadzenie testów uzdatniania wód geotermalnych pozyskiwanych w zakładach geotermalnych. Sercem stanowiska są dwa stopnie odwróconej osmozy wykorzystujące specjalne membrany połączone w układzie szeregowym dla skutecznego wyeliminowania jonów boru, którego podwyższone stężenia są dość powszechnie odnotowywane w wodach geotermalnych (Tomaszewska 2014). Membrany umożliwiają pozyskanie czystych wód zdemineralizowanych, które po przejściu przez mineralizator i system sterylizacji bakteriologicznej mają charakter wód nadających się do spożycia. Po drugiej stronie membran pozyskiwany jest koncentrat charakteryzujący się znacznie podwyższoną zawartością składników mineralnych odseparowanych z wód geotermalnych. Całe stanowisko zainstalowane zostało w kontenerze (fot. 9.3), co zapewnia jego mobilność i instalację w innych lokalizacjach.

W etapie projektowania prac badawczych projektu zakładano, że proces odsalania wód geotermalnych realizowany będzie w dwóch lokalizacjach, w Bańskiej Niżnej (w Laboratorium Geotermalnym IGSMiE PAN) oraz w Uniejowie. Wstępne prace badawcze zrealizowane w pierwszej lokalizacji wykazały, że jednym z podstawowych wymaganych elementów przygotowania wody, jest jej efektywne schłodzenie do temperatury poniżej 35°C. W Laboratorium Geotermalnym IGSMiE PAN w Bańskiej Niżnej wytworzono niezbędny system ochładzania wód dla potrzeb zasilania pilotowej instalacji odsalania wód geotermalnych. Czynnikiem ten nie był możliwy do osiągnięcia w drugiej rozpatrywanej lokalizacji, tj. w Zakładzie Geotermalnym w Uniejowie. Ostatecznie zdecydowano, iż testy odsalania wód geotermalnych z wykorzystaniem pilotowej instalacji odsalania wód geotermalnych przeprowadzone zostaną na Podhalu. Odsalaniu poddano wody z trzech ujęć geotermalnych: niecki podhalańskiej (Bańska IG-1), Nizu Polskiego (Uniejów PIG/AGH-2) i Karpat Zachodnich (Rabka IG-2).

Wody poddane badaniom posiadały różną mineralizację, od 2,5 do 24,4 g/dm³, podwyższoną i wysoką zawartość boru (od 2,5 do 96,7 mg/dm³), żelaza, strontu, krzemionki i częściowo również metali ciężkich: arsenu (Rabka IG-2, Bańska IG-1) i chromu (Rabka IG-2). Temperatura badanych wód wynosiła 30°C w przypadku ujęć Bańska IG-1 i Uniejów

PIG/AGH-2, oraz 22°C – Rabka IG-2. Odczyn wody wahał się od słabo kwaśnego do zasadowego. Odgazowana woda z ujęcia Bańska IG-1 kierowana była do stacji odsalania w zamkniętym systemie, bezpośrednio po schłodzeniu na wymiennikach ciepła. Woda z dwóch pozostałych ujęć geotermalnych, Uniejów PIG/AGH-2 i Rabka IG-2, pobrana została bezpośrednio z otworu eksploatacyjnego w ilości 30 m³ do cysterny termoizolacyjnej i niezwłocznie przetransportowana do laboratorium. Chwilowe natężenie przepływu wody geotermalnej zasilającej system odsalania wynosiło około 4–5 m³/h (średnie 2,4 m³/h) w przypadku odsalania wody z otworu Bańska IG-1 i 2–3 m³/h (średnie 1,5 m³/h) dla wody z odwiertów Uniejów PIG/AGH-2 i Rabka IG-2.

W trakcie realizacji badań, na bieżąco prowadzono obserwacje sprawności systemu poprzez ocenę składu chemicznego permeatu i retentatu (koncentratu). Badania zmierzały w kierunku oceny możliwości zagospodarowania uzdatnionych wód do celów pitnych oraz odzysku substancji mineralnych przydatnych do celów balneologicznych bądź gospodarczych.

Badania między innymi efektywności odsalania przeprowadzono w trakcie testów krótko terminowych (dla wszystkich trzech ujęć w okresie 11 godzin) i długo terminowych (dla ujęcia Bańska IG-1 w okresie 8 miesięcy). W trakcie realizacji tych testów odsalania, wykonano badania fizyko-chemiczne wód geotermalnych „surowych” zasilających instalację oraz wody po kolejnych stopniach odsalania. Wyniki analiz potwierdziły wysoką jakość odsolonych wód geotermalnych z ujęć Bańska IG-1 i Uniejów PIG/AGH-2. Nie spełniły tych oczekiwań wody z ujęcia Rabka IG-2. Przekroczenie dopuszczalnych wskaźników stwierdzono tu w odniesieniu do przewodności elektrolitycznej właściwej (zbyt wysokie zasolenie wody) oraz zawartości sodu, chlorków, chromu i boru. Wyniki analizy potwierdzają, że woda geotermalna średniozmineralizowana (około 24,4 g/dm³ w przypadku ujęcia Rabka IG-2) powinna być odsalana w układzie dwuhybrydowym łączącym odwróconą osmozę (wykorzystującą wyższe przedziały ciśnienia transmbranowego około 2,5-3,0 MPa) i destylację MSF z krystalizacją soli lub w systemie trój-hybrydowym z wykorzystaniem nanofiltracji – odwróconej osmozy – metody destylacyjnej z krystalizacją soli (Tomaszewska 2011a, b, c, 2012).

W żadnym przypadku nie stwierdzono przekroczenia dopuszczalnych zawartości niebezpiecznych substancji organicznych i toksycznych. Badaniami mikrobiologicznymi, w zakresie niezbędnych wskaźników bakteriologicznych, określonych rozporządzeniem Ministra Zdrowia, we wszystkich próbkach wód nie stwierdzono występowania bakterii grupy coli, w tym również *Escherichia coli*. Wyniki badań potwierdziły wysoką czystość mikrobiologiczną odsolonych wód geotermalnych. Także badania radiologiczne odsolonych wód geotermalnych potwierdziły spełnienie wymagań wobec wód pitnych. We wszystkich badanych próbkach wód stężenie trytu, w granicach dokładności pomiarów jest zerowe (Tomaszewska 2012).

Zrealizowane w ramach projektu prace badawcze wykazały, że oczyszczanie wód zasolonych, o podwyższonej zawartości mikroelementów takich jak: bor, brom, bar, stront i metale ciężkie jest efektywne przy wykorzystaniu procesów membranowych. Zagospoda-

rowanie odsolonych wód do celów pitnych, ale także jako np. wód technologicznych w systemach grzewczych, może w wielu przypadkach być rozpatrywane jako alternatywny sposób ich utylizacji, szczególnie w systemach pracujących w układzie otwartym a więc głównie wód słodkich, i słonawych, często obecnie zrzucanych do cieków powierzchniowych oraz w układach półotwartych, w których do górotworu zatłaczana jest tylko część ochłodzonych wód.

Powstający w trakcie procesu odsalania retentat (koncentrat) także poddano badaniom. Jego skład chemiczny zależy od składu chemicznego wody surowej, poddawanej odsalaniu, stopnia retencji poszczególnych składników wody oraz wydajności instalacji odsalania (założenia koncentratu). W odniesieniu do wód wysoko zasolonych, dąży się do uzyskiwania produktu stałego, soli o znaczeniu balneologicznym bądź gospodarczym. Wody geotermalne bogate są w potas i mikroelementy, takie jak: Li, Sr, B, Br, I oraz krzemionkę. W wielu regionach świata stosowane są metody ekstrakcji, elektrolizy i strącania soli siarczanowych z wód geotermalnych (Tomaszewska i Bodzek 2013a, b).

O wadze tematyki poruszonej w tym projekcie badawczym świadczy duże zainteresowanie środowiska naukowego wyrażone zaproszeniem do opracowania rozdziału w monografii wydanej przez Taylor & Francis Group (Bujakowski, Tomaszewska i Bodzek, 2012), oraz Oregon Institute of Technology (Bujakowski i Tomaszewska 2010). Wyniki zaprezentowane zostały także w publikacjach pracowników Pracowni Odnawialnych Źródeł Energii IGSMiE PAN kierowanej przez autora, wśród których wiele znalazło się w uznanych wydawnictwach znajdujących się na tzw. liście filadelfijskiej (Tomaszewska 2011c, 2014; Tomaszewska i Bodzek 2013a, b; Tomaszewska i Pająk 2010, 2012).

Wyniki projektu wskazały na potrzebę pogłębienia badań w połączeniu z konkretnymi operatorami instalacji geotermalnych eksploatujących wody złożowe. Odzysk substancji mineralnych z wód geotermalnych jest dużym wyzwaniem badawczym, który spotkał się z wielkim zainteresowaniem ze strony potencjalnych inwestorów. Zyskał on również akceptację środowisk naukowych, czego wyrazem jest bardzo wysoka ocena i przyjęcie w 2014 roku do realizacji przez NCBiR projektu badawczego złożonego w ramach Programu Badań Stosowanych pn. „Pozyskanie wód pitnych oraz cieczy i substancji balneologicznych w procesie uzdatniania schłodzonych wód geotermalnych”.

Podsumowanie

W podsumowaniu przedstawiono stan rozpoznania warunków hydrogeotermalnych w skali krajowej, regionalnej i lokalnej oraz stan obecnego zagospodarowania zasobów geotermalnych w naszym kraju. Podniesiono również walory wyróżniające energię geotermalną spośród innych nośników energii odnawialnej, zwracając szczególną uwagę na wyjątkowo korzystne oddziaływanie na środowisko naturalne.

Stan rozpoznania warunków hydrogeotermalnych w skali krajowej scharakteryzowany w rozdziale czwartym można uznać za wystarczająco dobry. Praktycznie cały obszar Polski z wyjątkiem obszaru sudeckiego, został pokryty mapami i opracowaniami przynoszącymi informacje na poziomie wystarczającym dla podejmowania konkretnych decyzji inwestycyjnych. Materiały informacyjne zostały opracowane na podstawie danych pochodzących z prac geologicznych wykonanych na terenie całego kraju. Pośród tych prac kluczowe informacje dla geotermii pochodzą z ponad 7 tysięcy odwiertów badawczych i hydrogeologicznych a zwłaszcza naftowych, w których pojawienie się wód w odwiercie traktowano jednak jako informację negatywną w kontekście poszukiwań węglowodorów. W efekcie nie wykonywano żadnych kosztownych prac umożliwiających bardziej szczegółową ocenę parametrów złożowych napotkanych poziomów wodonośnych. Informacje te miały zatem bardzo ogólny i fragmentaryczny charakter. Umiejętność czytania i interpretacji tak szczątkowych informacji jest wynikiem wieloletniego doświadczenia, jakie nabyło środowisko naukowe zajmujące się profesjonalnie rozpoznawaniem i wdrażaniem przedsięwzięć geotermalnych. Wynikiem nabytego bogatego doświadczenia jest opracowany unikalny zestaw atlasów geotermalnych, które uwzględniając nieprecyzyjność archiwalnych danych otworowych, przynoszą wiele ważnych informacji dla prawidłowej konstrukcji programu robót geologicznych dla początkowej fazy biznes planu przedsięwzięcia inwestycyjnego. Atlasy te wyspecyfikowane w rozdziale czwartym opisującym rozpoznanie zasobów krajowych, obejmują swoim zasięgiem praktycznie cały obszar kraju, gdzie istnieją potencjalne warunki występowania wód geotermalnych. Wiodącą rolę odgrywa tu zespół specjalistów ośrodka krakowskiej AGH pod kierunkiem prof. W. Góreckiego oraz IGSMiE PAN.

Rozpoznanie zasobów w skali regionalnej opisane w rozdziale piątym, scharakteryzowano na podstawie bogatego materiału badawczego zestawionego w opracowaniach o skali krajowej. Wynikiem ich są opracowania obejmujące obszar regionu zwykle utożsamiany z obszarem województwa. Region w takim ujęciu może być skutecznym beneficjentem

wyników badań rozpoznawczych, gdyż posiada dużą samodzielność w kreowaniu i promowaniu przedsięwzięć inwestycyjnych. Niestety, tylko nieliczne województwa i regiony posiadają kompleksową wiedzę zgromadzoną w zwartych dokumentacjach złożowych. Zdecydowanie najpełniejsze rozpoznanie dotyczące wód geotermalnych i leczniczych posiada region województwa małopolskiego. Kompleksowość takiego opracowania wyraża się integracją danych z rozpoznania regionalnego i lokalnego. Cenne byłoby poszerzenie tego rozpoznania poprzez objęcie nim innych województw lub mniejszych obszarów administracyjnych, np. powiatów czy też obszarów objętych zainteresowaniem lokalnych inicjatyw społecznościowych typu Lokalnych Grup Działania czy Stowarzyszeń Gmin. Opracowania takie zawierałyby wystarczającą ilość danych o zasobach wód i energii geotermalnej oraz sposobach ich wykorzystania włącznie z ocenami ekonomicznymi w celu sporządzenia ofert inwestycyjnych, a także do podejmowania racjonalnych decyzji przez inwestorów. Pozytywnym przykładem wpływu regionalnego rozpoznania na rozwój przedsięwzięć inwestycyjnych jest obszar Podhala. Stopień i szczegółowość rozpoznania warunków hydrogeotermalnych w tym obszarze minimalizuje ryzyko geologiczne. W efekcie obserwujemy tu największą liczbę zakładów ciepłowniczych, rekreacyjnych i leczniczych wykorzystujących wody geotermalne. Przykład negatywny przynosi natomiast obszar sudecki, gdzie pomimo dobrych warunków hydrogeotermalnych, jakie występują np. w rejonie Cieplic, dotychczas nie rozwinęła się w innych lokalizacjach tego regionu działalność gospodarcza opierająca się na wodach geotermalnych. Powodem takiego stanu jest brak skutecznych metod badawczych umożliwiających osiągnięcie wystarczającego rozpoznania hydrogeotermalnego tego unikalnego geologicznie regionu Polski. Pomimo iż, jak wspomniano, wody geotermalne tego regionu są znane i wykorzystywane od setek lat (Łądek Zdrój od XIII w.), badania występujących tu warunków geotermalnych były prowadzone fragmentarycznie i ograniczone głównie do stref występowania wód geotermalnych do celów terapeutycznych. Niezbędne jest zatem stworzenie efektywnego narzędzia badawczego (np. wykorzystującego metody teledetekcyjne geofizyki powierzchniowej i otworowej) do identyfikacji występujących tu stref geotermalnych, gwarantujących podniesienie stopnia rozpoznania i związanego z tym stopnia gospodarczego wykorzystania.

Rozpoznanie w skali lokalnej jest zadaniem wykonywanym w etapie wstępnej decyzji o realizacji przedsięwzięcia. W tym etapie rozpoznania wykonywane są prace mające charakter badawczy do których zalicza się oceny zasobowe i energetyczne wód geotermalnych. Prace badawcze winny być poprzedzone ocenami formalnymi m.in. określeniem dostępności pozwoleń na korzystanie z informacji geologicznej, ustaleniem dostępności (wykluczenia terenu, np. ze względu na Obszary Natura 2000) i własności terenu pod lokalizację odwiertu (dzierżawa, wykup, czasowe zajęcie). Rozpoznanie w skali lokalnej zawiera analizy badawcze miejscowych warunków hydrogeotermalnych oraz analizy i modele energetyczne dotyczące sposobu wykorzystania potencjału geotermalnego. Analizy energetyczne obejmują swoim zakresem opracowanie wielowariantowych rozwiązań technologicznych (jak np. hybrydowego – wielopaliwowego węzła energetycznego) uzupełnionych wstępnymi szacunkami ekonomicznymi umożliwiającymi podjęcie racjonalnych decyzji inwestycyjnych.

Wartość tych prac jest tym większa, im bardziej kompleksowo jest rozpoznanie hydrogeotermalne. Problem szczegółowości badań jest niezwykle istotny z punktu widzenia inwestora, gdyż ma wpływ na poziom ryzyka nietrafnej decyzji finansowej. Jak ważne jest posiadanie szczegółowych zweryfikowanych badaniami informacji o złożu geotermalnym i jego potencjale energetycznym świadczą przykłady pochodzące z Podhala i Mszczonowa. Rozpoznanie lokalne wykonane na złożu geotermalnym niecki podhalańskiej w 1981 roku bazowało na danych pochodzących z prac badawczych Państwowego Instytutu Geologicznego i miało bardzo ogólny charakter. Odwiertem Bańska IG-1 stwierdzono i udokumentowano wówczas wody geotermalne o wydajności 60 m³/h, a w następnych latach zasoby te dwukrotnie podnoszono do obecnych 120 m³/godz. Także odwiert Mszczonów IG-1 wykonany w ramach prac badawczych PIG-u w 1977 roku udostępnił utwory kredy dolnej umożliwiając udokumentowanie zasobów wód złożowych w ilości 10 m³/godz. Obecnie, po przeprowadzeniu rekonstrukcji w latach 1997–2000, ujęcie to ma zatwierdzone zasoby w ilości 60 m³/godz. a zatem 6-krotnie wyższe. Prace dokumentacyjne realizowane były ze środków finansowych pochodzących w całości ze źródeł publicznych lub z dużym udziałem dotacji. Uzyskane znacznie większe wydajności poprawiały efekt finansowy i spowodowały podjęcie decyzji inwestorów o finansowaniu pozostałych elementów systemu geotermalnego ze środków komercyjnych (pożyczki, kredyty, środki własne itd.).

Obecnie ciągle jeszcze wielu inwestorów nie jest skłonnych finansować prace badawcze i naukowe wyprzedzające prace techniczne, ponieważ uważają, że jest to zadaniem programów centralnych lub regionalnych. Polityka władz zmierza jednak wyraźnie w kierunku podzielenia się kosztami wykonania badań z przedsiębiorcami. Jest to interesujący kierunek oddziaływania na naukę, aczkolwiek wydaje się, że uruchamiane będą w ten sposób jedynie najmniej ryzykowne projekty.

Stan zagospodarowania energii i wód geotermalnych jest ściśle uzależniony od stanu rozpoznania w skali lokalnej. W Polsce spośród 23 zakładów górniczych eksploatujących wody o temperaturze ponad 20°C (tab. 1.3) na podstawie informacji i objawów powierzchniowych pochodzących z zapisów historycznych powstało 6 zakładów. Pozostałe 17 powstało na podstawie rozpoznania wykonanego w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku. W tej drugiej grupie mieszczą się wszystkie (13) instalacje zaliczone do grupy I (tab. 1.3), tj. wykorzystujących wody geotermalne do ogrzewania i rekreacji oraz 4 instalacje z grupy II (tab. 1.3). Wysoki stopień rozpoznania regionalnego i lokalnego, z jakim mamy do czynienia w obrębie zbiornika podhalańskiego zaowocował uruchomieniem tu 6 instalacji (rys. 1.4), których łączna zainstalowana moc geotermalna szacowana jest na 44,65 MWt, a produkcja energii na około 340 TJ/rok. W bilansie mocy wszystkich polskich instalacji geotermalnych (bez pomp ciepła), około 50% stanowią instalacje zainstalowane na Podhalu. Udział tych instalacji w bilansie wytwarzanej energii przekracza 51%. Drugim obszarem o dość dobrym rozpoznaniu regionalnym i lokalnym jest rejon środkowej Polski (rys. 1.4). Funkcjonujące tu zakłady geotermalne w Mszczonowie, Uniejowie, Poddębicach czy w Ciechocinku, będą uzupełnione w niedalekiej przyszłości o kolejne instalacje m.in. w Toruniu, Kleszczowie czy w Gostyninie oraz w Koninie, gdzie wykonane zostały odwierty geotermalne i udokumen-

towano zasoby wód geotermalnych. Obszary północno-zachodniej Polski i region sudecki posiadają zakłady geotermalne, aczkolwiek nie są one wystarczająco liczne w aspekcie istotnego potencjału geotermalnego. Dzieje się tak pomimo stwierdzenia bardzo korzystnych parametrów geotermalnych w zakładach w Pyrzycach, Stargardzie Szczecińskim i Cieplicach. Barię powstawania nowych przedsięwzięć są, jak wspomniano wcześniej, wysokie nakłady finansowe niezbędne na wstępnych etapach budowy zakładu. Problem poniesienia tych nakładów, przy niestety zawsze istniejącym ryzyku geologicznym, skutecznie hamuje zintegrowanie potencjalnych inwestorów.

Problem ekonomiczny związany jest także z adaptacją nowych technologii, m.in. wyposażenia części węgłnej zakładu geotermalnego. Badania związane z opracowaniem optymalnych konstrukcji odwiertów geotermalnych koncentrują się na określeniu jakości materiałów odpornych na oddziaływanie wód geotermalnych lub wyposażenia odwiertów w systemy umożliwiające iniekcję odpowiednich płynów do strumienia wód geotermalnych. Przykładowo, wdrażanie materiałów bazujących na włóknie szklanym ma już miejsce w naszym kraju (odwierty w Toruniu i w Kleszczowie). Niestety, brakuje opublikowanych wyników tych prac, które wystarczająco opisywałyby możliwości tych technologii i doświadczeń związanych z wykorzystaniem tych materiałów. Ograniczona informacja jest tu zrozumiała gdyż ryzyko związane z wdrożeniem nowych rozwiązań ponosił prywatny inwestor. Identyczna sytuacja odnosi się do wyposażenia rur kolumny eksploatacyjnej w odporne na korozję wykładziny. Zadania takie podejmowane były indywidualnie przez operatorów systemów geotermalnych, a w przypadku ich dofinansowania ze środków publicznych nie zapewniono wymogów dotyczących potrzeby konieczności opublikowania wyników tych prac.

Podobnie problem dotyczący zwiększenia chłonności otworów jest dość dobrze opisany i przeanalizowany w publikacjach tematycznych, ale głównie na poziomie teoretycznym. Wykonane próby zastosowania metod miękkiego i super miękkiego kwasowania, jakkolwiek obiecujące, nie zostały w wystarczający sposób udokumentowane. Barię stanowił brak środków na dopracowanie i przetestowanie tych technologii.

Nowe rozwiązania dotyczące części powierzchniowej instalacji geotermalnych mają najbardziej wymierny charakter. Istniejące w świecie technologie są proste do finansowego oszacowania zarówno od strony inwestycyjnej, jak i operacyjnej. Znając parametry złoża geotermalnego można z dużym prawdopodobieństwem określić efektywność energetyczną systemu, a co się z tym ściśle wiąże – wielkość produkcji energii. Tak więc poniesione nakłady na wytworzenie ujęcia geotermalnego umożliwiają pozyskanie wód geotermalnych o określonej temperaturze i o określonym składzie chemicznym. Badania w tym obszarze działań powinny dotyczyć optymalizacji sposobu wykorzystania zasobów wód geotermalnych. Wyróżnia się tu dwa kierunki badań, jeden ukierunkowany na maksymalizację wykorzystania potencjału energetycznego a drugi na wykorzystaniu własności fizykochemicznych wód geotermalnych.

Potencjał energetyczny zasadniczo jest związany z temperaturą i wydajnością wód. Posługując się prostą zasadą obowiązującą szczególnie dla geotermalnego źródła energii mówiącą, że cena jednostki energii u odbiorcy jest tym niższa im więcej jednostek energii

będzie wytworzonych – powinno się dążyć do maksymalnego schłodzenia wód złożowych. Warunkiem sensowności takiego rozwiązania jest posiadanie odpowiedniego odbiorcy energii, takiego który zagospodaruje nawet wody o niskiej temperaturze. Przykładami badań prowadzonych w tym zakresie jest kaskadowy system zagospodarowania energii IGSMiE PAN na Podhalu oraz dwa obiegi grzewcze funkcjonujące w zakładzie geotermalnym w Mszczonowie opisane w rozdziale ósmym. W naszym kraju nadal nierozwiązany pozostaje problem oddziaływania na odbiorców energii cieplnej tak aby chcieli dokonywać zmian w swoich instalacjach w kierunku maksymalnego schłodzenia dostarczanych im systemem ciepłowniczym wód. Na Islandii odbiorcy energii cieplnej mobilizowani są do takich działań poprzez rozliczanie się z zakładem ciepłowniczym z dostawy gorącej wody w m³, a nie tak jak u nas, gdzie rozliczenie dotyczy dostarczonej ilości energii. Odbiorca energii na Islandii jest w ten sposób motywowany do maksymalnego schłodzenia wody i sam znajduje sposób na realizację tego schłodzenia np. podgrzewając chodniki, dachy itp., gdyż i tak ponosi takie same koszty dostawy ciepłej wody. Ten sposób wymagałby jednak w naszych warunkach prawnych wprowadzenia bardzo głębokich zmian.

Pozyskane ujęciem otworowym wody złożowe, jak wcześniej wspomniano, posiadają często specyficzny skład chemiczny. Przeprowadzone badania wskazują tę cechę jako jedną z bardziej interesujących w aspekcie podniesienia ekonomicznej efektywności zagospodarowania wód geotermalnych. Walor ten może być wykorzystany w szerokim wachlarzu możliwości np. w lecznictwie, balneoterapii, rekreacji, kosmetologii ale także jako podkład mineralny dla hodowli alg.

Badania realizowane w ramach projektów NCBiR obejmują także wykorzystanie wód geotermalnych do wytwarzania wód spełniających wymogi wód pitnych. Jedynie w zakładzie geotermalnym w Mszczonowie wody złożowe po oddaniu ciepła kierowane są do stacji uzdatniania wód miejskiej sieci wodociągowej i wykorzystywane do celów pitnych. W pozostałych instalacjach wody geotermalne są zatłaczane do złoże lub zrzucane do cieków powierzchniowych. Biorąc pod uwagę skromne zasoby wód pitnych w naszym kraju, należałoby poszerzyć zakres badań w kierunku zagospodarowania wychłodzonych wód geotermalnych do celów konsumpcyjnych. Wydaje się, że problem braku wody pitnej szczególnie wyraźnie zaznacza się na terenie Podhala, gdzie mieszkańcy korzystają z sieci wodociągów ujmujących strefy źródłiskowe, których wydajność już obecnie nie pokrywa zgłaszanych potrzeb. Jednocześnie istniejące tu zakłady geotermalne mogą wydobywać (zgodnie z koncesjami) ponad 1200 m³/h wód geotermalnych, których mineralizacja nie przekracza 3 g/dm³, a nawet jest na poziomie mineralizacji wód słodkich (0,33–0,5 g/dm³). Zgodnie z formalnymi pozwoleniami blisko połowa z nich może być zrzucana do cieków powierzchniowych, pozostała jest zatłaczana do złoże. Wykorzystanie tych wód do celów pitnych musi być poprzedzone szczegółową analizą ich składu chemicznego przeprowadzoną indywidualnie dla każdego ujęcia. Niemniej zasoby te winny być traktowane jako poważny element programu poprawy zaopatrzenia mieszkańców w wodę.

Innym, może najważniejszym, walorem energii geotermalnej są jej cechy ekologiczne. Wykorzystanie jej jako jednego z możliwych czystych źródeł energii objęte jest formalnie

różnego rodzaju zaleceniami, wskazaniem, priorytetami szczebla centralnego i lokalnego. Niestety często mają one czysto PR-owy charakter. Podobnie, pojęcie „świadomości ekologicznej” jest zdecydowanie nadużywane w różnych gremiach i ma wymiar sloganu. Brak odwagi decydentów w podejmowaniu decyzji kluczowych dla naszego zdrowia i przyszłości naszych potomków powoduje stałe pogarszanie się naszego środowiska. Akcje typu „Anty-smogowy marsz żałoby”, jaki odbył się w 2013 roku w Krakowie mają praktycznie lokalny zasięg. Zakaz stosowania paliw stałych w indywidualnych instalacjach grzewczych został wprowadzony w Londynie w latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku po dramatycznym tzw. epizodzie smogowym, w wyniku którego szacuje się, że zmarło w krótkim odstępie czasu około 4000 ludzi (www.krakowskialarmsmogowy.pl).

Dane Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska (GIOŚ 2014) w sposób jednoznaczny ukazują nam dramatyczny stan środowiska, w tym powietrza. Jego degradacja może przyczynić się do wzrostu występowania szeregu chorób cywilizacyjnych, takich jak m.in.: nowotwory, otyłość, choroby serca, cukrzyca, a także choroby układu odpornościowego. Według szacunków Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) obciążenie chorobami środowiskowymi w regionie europejskim odpowiada za prawie 20% wszystkich zgonów (GIOŚ 2014).

Zagospodarowanie energii geotermalnej ma największy wpływ na stan powietrza, w którym jednymi z groźniejszych dla zdrowia jest pył zawieszony i benzo(a)piren.

Pył zawieszony jest mieszaniną bardzo małych cząstek stałych i ciekłych złożoną zarówno ze związków organicznych, jak i nieorganicznych. W skład pyłu zawieszonego mogą wchodzić: węglowodory, węgiel elementarny, związki krzemu, aluminium, żelazo, metale śladowe, siarczany, azotany, chlorki oraz związki amonowe. Pomimo działań podejmowanych na rzecz redukcji stężeń pyłu zawieszonego w powietrzu, przekroczenia norm pozostają najistotniejszym problemem jakości powietrza w Polsce (GIOŚ 2014). Przekroczenia te dotyczą przede wszystkim obszarów miast i z reguły mają miejsce w okresie zimowym. Według GIOŚ (2014) praktycznie we wszystkich województwach przekroczenia związane są najczęściej z emisją pyłu z indywidualnego ogrzewania budynków oraz z transportu.

Innym ważnym ze względu na skutki zdrowotne zanieczyszczeniem powietrza są również związki z grupy wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA). Związki te mają udowodnione właściwości nowotworowe i mutagenne (GIOŚ 2014). W ocenie jakości powietrza wskaźnikiem poziomu zanieczyszczenia powietrza WWA jest benzo(a)piren. Ocena jakości powietrza w Polsce za 2012 rok opracowana przez GIOŚ (2014) pod kątem benzo(a)pirenu wykazała, że spośród 46 stref podlegających ocenie aż 42 strefy zaliczono do najgorszej klasy C. Tak duża liczba stref zaliczonych do klasy C wiąże się ze strukturą zużycia paliw w gospodarstwach domowych, gdzie zachodzi niepełne, w niskich temperaturach, spalanie paliw stałych, głównie węgla i drewna (GIOŚ 2014). Na rysunku 10.1 przedstawiono stężenie tego polutanta w Krakowie na tle wybranych innych miast Europy.

Wykorzystanie zasobów energii geotermalnej w Polsce nie rozwiąże w całości problemów ekologicznych i nie pokryje wszystkich potrzeb energetycznych, ale może być jednym



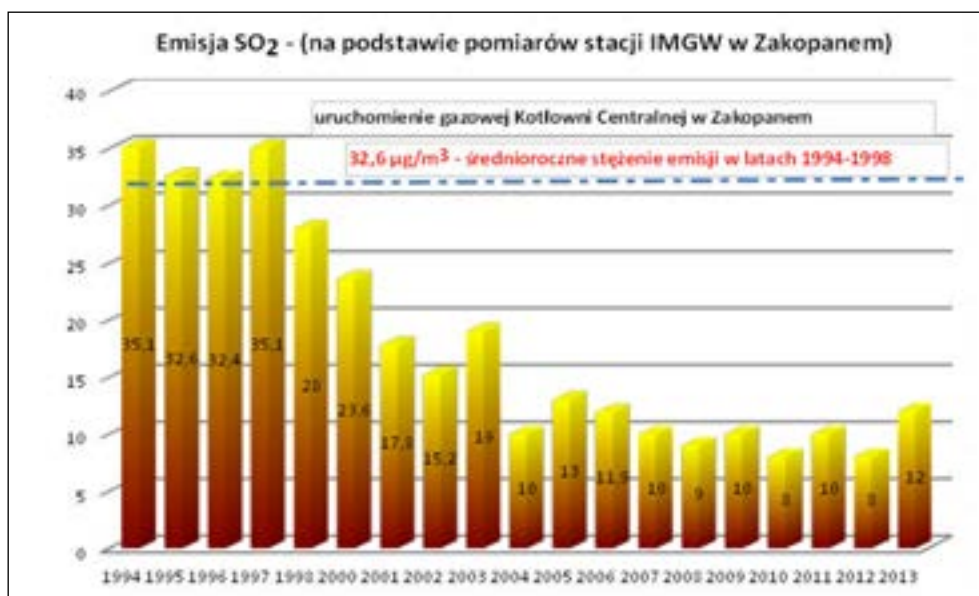
Rys. 10.1. Średnioroczne stężenia benzo(a)pirenu w wybranych miastach europejskich (www.krakowskialarmsmogowy.pl)

Fig. 10.1. Average annual concentrations of benzo(a)pyrene in selected European cities (www.krakowskialarmsmogowy.pl)

z elementów łańcucha działań zmierzających do ograniczenia i w efekcie eliminacji niskiej emisji tak bardzo uciążliwej i niebezpiecznej dla Polaków. O tym, że sytuacja ekologiczna może ulec poprawie dzięki energii geotermalnej świadczą wyniki wieloletniego monitoringu stanu środowiska w Zakopanem (rys. 10.2).

Zgodnie z Dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy (Dz.U. L 152 z 11.06.2008): „Należy utrzymać jakość powietrza tam, gdzie jest ona dobra, lub ją poprawić, w przypadku gdy cele dotyczące jakości powietrza nie są osiągnięte. Mając na względzie ochronę zdrowia ludzkiego i środowiska jako całości, szczególnie ważna jest walka z emisjami zanieczyszczeń u źródła oraz identyfikacja i wdrażanie na szczeblu lokalnym, krajowym i wspólnotowym najskuteczniejszych środków mających na celu redukcję emisji.”

Rzetelnie przeprowadzona analiza SWOT, także w ujęciu porównawczym z innymi nośnikami energii (konwencjonalnymi i OZE) ukazałaby, iż energia geotermalna posiada szereg niepowtarzalnych cech wyróżniających ją również wśród innych OZE. Od walorów



Rys. 10.2. Efekt ekologiczny rejestrowany po uruchomieniu w 1998 r. sieci geotermalnej w Zakopanem
(www.geotermia.pl/ekologia/ochrona-srodowiska.html)

Fig. 10.2. Ecological effect recorded in 1998, after running geothermal network in Zakopane
(www.geotermia.pl/ekologia/ochrona-srodowiska.html)

fizykochemicznych (lecznictwo, rekreacja), powszechności i dyspozycyjności występowania (zasób krajowy niezależny od warunków atmosferycznych), społecznych (rozwój regionalny i/lub lokalny wpływający na zatrudnienie) poprzez bardzo pozytywny wpływ na lokalny stan atmosfery (ochrona zdrowia), aż po dużą stabilność kosztów operacyjnych wytwarzania energii (minimalny wpływ cen energii elektrycznej, gazu itp.). Zalety te korespondują z zaleceniami Parlamentu Europejskiego i są spójne z oczekiwaniami mieszkańców naszego kraju. Niezbędne jest jednakże ciągle podnoszenie świadomości nie tylko społeczeństwa, ale i decydentów poprzez rzetelne informowanie o faktycznych zasobach energii geotermalnej oraz możliwościach, jakie niesie jej wykorzystanie.

Literatura

- Andritsos N., Ungemach P., Koutsoukos P., 2010 – Corrosion and scaling. [W:] Popovski K., Andritsos N., Fytikas M., Vasilevska-Popowska S., Sanner B., Ungemach P., Koutsoukos P., Valdimarsson P., 2010 – Geothermal Energy. MAGA. Skopje.
- Barbacki A., 2002 – Geotermalny basen górnej jury centralnej części zapadliska przedkarpackiego i południowo-wschodniej części Niecki Miechowskiej – budowa geologiczna i warunki hydrogeotermalne. *Przegląd Geologiczny* 50, 9, s. 773–782.
- Barbacki A., 2004a – Zbiorniki wód geotermalnych Niecki Miechowskiej i środkowej części Zapadliska Przedkarpackiego. *Studia Rozprawy Monografie* Nr 125. Wyd. IGSMiE PAN Kraków.
- Barbacki A., 2004b – Zbiorniki paleozoiczne obszaru krakowsko-kieleckiego – możliwości wykorzystania energii geotermalnej. *Przegląd Geologiczny* 52, 3, s. 243–252.
- Barbacki A., Bielec B., Bujakowski W., Hołojuch G., Kasztelewicz A., Kępińska B., Lankof L., Miecznik M., Mierzwa E., Pająk L., Skrzypczak R., Tomaszewska B., 2014 – Badania naukowe i ocena występowania oraz możliwości zagospodarowania energii geotermalnej przy wsparciu innych OZE w kontekście zrównoważonego rozwoju gmin powiatu piotrkowskiego. *Archiwum Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków*, s. 184.
- Barbacki A., Bujakowski W., 2005 – Geological and Technical Aspects of Geothermal Energy Utilization in Małopolska Region (South Poland). *World Geothermal Congress 2005 Turcja*.
- Barbacki A., Bujakowski W., Pająk L. 2006 – Atlas zbiorników wód geotermalnych małopolski, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- Barbacki A., Bujakowski W., Pająk L., Tomaszewska B., Kasztelewicz A., Skrzypczak R., Herman Z., Hajto M., Capik M., 2013 – Możliwości wykorzystania istniejących otworów do celów eksploatacji wód geotermalnych w rejonie Karpat wschodnich. [W:] Górecki W. red. – *Atlas Geotermalny Karpat Wschodnich, formacje fliszowe oraz utwory mioceńskie i mezozoiczno-paleozoiczne podłoża Karpat Wschodnich*. Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, s. 608–631.
- Bauer K., Pussak M., Stiller M., Bujakowski W., 2014 – Combined interpretation of 3D seismic reflection attributes for geothermal exploration in the Polish Basin using self-organizing maps. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 16.
- Bertani R., 2010 – Geothermal Power Generation In the World 2005–2010 Update Report. *Geothermics* 41, s. 1–29.
- Bertani R., 2015 – Geothermal Power Generation In the World 2010–2015 Update Report. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*. Melbourne.

- Biernat H., Kulik S., Noga B., Kosma Z., 2009 – Możliwości pozyskania energii odnawialnej i problemy związane z eksploatacją ciepłowni geotermalnych wykorzystujących wody termalne z kolektorów porowych. *Przeł. Geol.* t. 57, nr 8.
- Bilans zasobów złóż i kopalin w Polsce wg stanu na 31.XII.2013 r. Wyd. PIG-PIB. Warszawa 2014.
- Borsukiewicz-Gozdur A., 2010 – Dual-fluid-hybrid power plant co-powered by low-temperature geothermal water. *Geothermics* 39, s. 170–176.
- Borsukiewicz-Gozdur A., Nowak A., Stachel A., 2009 – Analiza i ocena wpływu parametrów pracy elektrowni z układem binarnym na efektywność wykorzystania energii geotermalnej. *Archiwum Energetyki* 39, 2, s. 153–160.
- Bujakowski red. 2009 – Barbacki A., Bujakowski W., Czerwińska B., Hołojuch G., Stefaniuk M., Trzeźniowski Z. Opracowanie i testy zintegrowanej metodyki prac sejsmo-magnetotellurycznych w aspekcie rozpoznania przestrzennego wglębnej budowy geologicznej dla wskazania optymalnej lokalizacji otworów geotermalnych. Wyd. Revel, Kraków.
- Bujakowski red. 2000 – Energia Geotermalna – Świat, Polska, Środowisko. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków.
- Bujakowski red. 2001 – Energia wokół nas. Wyd. „Kaję”, Kraków, 60 s.
- Bujakowski red. 2014 – Bujakowski W., Barbacki A., Bielec B., Hołojuch G., Kasztelewicz A., Kępińska B., Lankof L., Miecznik M., Mierzwa E., Pająk L., Skrzypczak R., Tomaszewska B. Studium rozpoznania i zagospodarowania lokalnych zasobów OZE Lokalnej Grupy Działania „BUD-UJ RAZEM”. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- Bujakowski red. 2007 – Barbacki A., Bujakowski W., Chowaniec J., Górka A., Mularz S., Oszczytko N., Pająk L., Pyka K. Rozpoznanie geotermicznej anomalii w strefie nasunięcia karpackiego w rejonie Tarnów-Lękawica. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- Bujakowski red. 2000 – Barbacki A., Bujakowski W., Graczyk S., Hołojuch G., Kazanowska A., Kępińska B., Pająk L., Uliasz-Misiak B. Rekonstrukcja otworu Mszczonów IG-1 na potrzeby eksploatacji złoża geotermalnego do systemu grzewczego. [W:] Wybrane problemy wykorzystania geotermii – część 1; *Studia Rozprawy Monografie* nr 76, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków.
- Bujakowski red. 2006 – Bujakowski W., Barbacki A., Hołojuch G., Kępińska B., Pająk L., Pussak M. Program wykorzystania odnawialnych źródeł energii na terenach nieprzemysłowych województwa śląskiego. *Archiwum Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków-Katowice*, 186 s.
- Bujakowski red. 2003 – Bujakowski W., Czerwiński T., Garlicki A., Jarzyna J., Mularz S., Tarkowski R. Termiczna charakterystyka górotworu w rejonie wysadów solnych. IGSMiE PAN, Kraków.
- Bujakowski red. 2005 – Bujakowski W., Barbacki A., Grzybek A., Hołojuch G., Pająk L., Skoczek A., Skrzypczak S., Skrzypczak M. Odnawialne źródła energii i możliwości ich wykorzystania na obszarach nieprzemysłowych województwa śląskiego. Raport z realizacji pracy pt.: Opracowanie metody programowania i modelowania systemów wykorzystania odnawialnych źródeł energii na terenach nieprzemysłowych województwa śląskiego, wraz z programem wykonawczym dla wybranych obszarów województwa. Wyd. Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków, 75 s.
- Bujakowski W., 1999 – Projekty geotermalne w Polsce. *TPGGiG* nr 4–5.
- Bujakowski W., 2000a – Sprawozdanie z międzynarodowego seminarium na temat: Rola energii geotermalnej w zrównoważonym rozwoju regionów mazowieckiego i łódzkiego Osuchów k. Żyrardowa, 04–06.10.2000. *Przegląd Geologiczny*, vol. 48, nr 12, PIG, Warszawa.

- Bujakowski W., 2000b – The cascaded system of utilising low-temperature geothermal waters for heating and consumptive purposes. [W:] 8th International Energy Forum Energy 2000, Las Vegas, 23–28.07.2000.
- Bujakowski W., 2001 – Odzysk ciepła z wód kopalnianych KWK „Nowa Ruda” do hodowli suma afrykańskiego. *Czasopismo Techniczne* nr 66–71, s. 9–17.
- Bujakowski W., 2005a – A Review of Polish Experiences in the Use of Geothermal Water. *World Geothermal Congress 2005*, Turcja.
- Bujakowski W., 2005b – Założenia, realizacja i efekty projektu pn. Opracowanie metody programowania i modelowania systemów wykorzystania odnawialnych źródeł energii na terenach nieprzemysłowych województwa śląskiego wraz z programem wykonawczym dla wybranych obszarów województwa. *Mat. Konferencyjne Odnawialne źródła energii w województwie śląskim*. Katowice 22 kwietnia 2005.
- Bujakowski W., 2006a – Przegląd wybranych zakładów geotermalnych i projektów w Polsce. [W] Śliwka M., Jakubiak M. red. – „Zielone prądy w edukacji II edycja”, Wyd. Art.-Tekst Kraków.
- Bujakowski W., 2006b – Selektywne wykorzystanie energii geotermalnej. *Przegląd Górniczy* Nr 4.
- Bujakowski W., 2007 – „Energia Geotermalna” [W:] Praca Zbiorowa – „Odnawialne źródła energii w Małopolsce”, Wyd. Stowarzyszenie Gmin Polska Sieć „Energie Cities, Kraków.
- Bujakowski W., 2010 – Kryteria oceny projektów geotermalnych w aspekcie finansowego wsparcia ich realizacji. *Biuletyn PIG 439*, s.199–204.
- Bujakowski W., 2010 – Wykorzystanie wód termalnych w Polsce (stan na rok 2009). *Przegląd Geologiczny* t. 58. nr 7, s. 580–588.
- Bujakowski W., 2015 – Wody geotermalne – możliwości ich wykorzystania. [W:] Baścik M., Degórska B. (red.), Środowisko przyrodnicze Krakowa. Zasoby-Ochrona-Kształtowanie, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, Kraków, s. 320–327.
- Bujakowski W., Balcer M., Banaś J., Barbacki A., Bielec B., Dajek B., Górecki W., Graczyk S., Hołojuch G., Kasztelewicz A., Kepińska B., Miecznik M., Pajak L., Tomaszewska B., 2011 – Dokumentacja geologiczna dotycząca opracowania wytycznych projektowych poprawy chłonności skał zbiornikowych w związku z zatłaczaniem wód termalnych w polskich zakładach geotermalnych. *Arch. IGSMiE PAN*, Kraków.
- Bujakowski W., Balcer M., Bielec B., 2013a – Ocena zmian stanu technicznego rur okładzinowych w trakcie wieloletniej eksploatacji odwiertu geotermalnego Mszczonów IG-1. *Technika Poszukiwań Geologicznych Geotermia, Zrównoważony Rozwój* nr 1, s. 83–90.
- Bujakowski W., Balcer M., Bielec B., 2013b – Porównawczy obraz produktywności poziomu wodonośnego na podstawie badań zestawem sond PL i sonda MIT 60 na przykładzie odwiertu geotermalnego Mszczonów IG-1. *Technika Poszukiwań Geologicznych Geotermia, Zrównoważony Rozwój* nr 1, s. 73–82.
- Bujakowski W., Barbacki A., Pajak L., 2005 – Możliwość wykorzystania niskotemperaturowych wód w kąpieliskach termalnych w rejonie Krakowa. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 8 z. 2, IGSMiE PAN.
- Bujakowski W., Barbacki A., 2000 – System wykorzystania niskotemperaturowej wody geotermalnej dla celów ciepłowniczych i konsumpcyjnych w mieście Słomniki. *Czasopismo Techniczne* nr 58–63, KTT, s. 9–12.

- Bujakowski W., Barbacki A., 2004 – Potential for geothermal development in Southern Poland. *Geothermics* 33, s. 383–395.
- Bujakowski W., Barbacki A., 2007 – Możliwości wykorzystania energii geotermalnej między Bochnią a Brzeskiem (woj. Małopolskie). *Przegląd Geologiczny* nr 3.
- Bujakowski W., Barbacki A., Czerwińska B., Pająk L., Pussak M., Stefaniuk M., Trzeźniowski Z., 2010 – Integrated seismic and magnetotelluric exploration of the Skierniewice, Poland, geothermal test site. *Geothermics* 39, s. 78–93.
- Bujakowski W., Barbacki A., Długosz P., Graczyk., Hołojuch G., Kazanowska A., Kępińska B., Ney R., Pająk L., Tarkowski R., Uliasz-Misiak B., 2001 – Wykorzystanie ciepła wód geotermalnych do intensywnej produkcji warzywniczej i chowu ryb. [W:] Ney red. *Wybrane problem wykorzystania geotermii II*. Wyd. IPAN, Kraków.
- Bujakowski W., Barbacki A., Graczyk S., Hołojuch G., Kępińska B., Pająk L., Pussak M., 2005 – Program działań wraz z oceną możliwości uruchomienia eksploatacji energii geotermalnej z dubletu odwiertów Skierniewice GT-1 i Skierniewice GT-2 – wstępne studium celowości. Arch. IGSMiE PAN, Kraków.
- Bujakowski W., Barbacki A., Hołojuch G., Kasztelewicz A., Pająk L., Tomaszewska B., Augustyńska J., 2011 – Możliwości wykorzystania energii geotermalnej w wybranych miastach Karpat Zachodnich. [W:] Górecki W., red. *Atlas zasobów wód i energii geotermalnej Karpat Zachodnich*. Goldruk.
- Bujakowski W., Barbacki A., Hołojuch G., Kotyza J., Pająk L., Tomaszewska B., 2007 – Ocena stanu istniejącego oraz wyznaczenie kierunków i możliwości wykorzystania energii geotermalnej na obszarze województwa podkarpackiego. *Archiwum Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków*, 205 s.
- Bujakowski W., Barbacki A., Pająk L. 2003 – Występowanie i możliwości zagospodarowania energii geotermalnej w Małopolsce. IGSMiE PAN, Kraków, 53 s.
- Bujakowski W., Barbacki A., Pająk., Skrzypczak R., 2014 – Wody geotermalne okolic Jasła oraz możliwości ich zagospodarowania. *Technika Poszukiwań Geologicznych Geotermia, Zrównowazony Rozwój*, nr 1, s. 27–52.
- Bujakowski W., Górecki W., Kępińska B., Nagy S., Soboń J., 2006 – Zatlaczanie wód geotermalnych w piaskowcowych i węglanowych skałach zbiornikowych do otworu chłonnego. [W:] Górecki W. red. *Atlas zasobów geotermalnych na Niżu Polskim. Formacja Mezozoiku*, Wyd. AGH, Kraków.
- Bujakowski W., Graczyk S., Hołojuch G., Kępińska B., Tomaszewska B., Wartak W., Kurpik J., Barbacki P., Pająk L., 2008 – Dokumentacja wynikowa realizacji Projektu Celowego Nr 6T12 2003 C.6005 „Stymulacja otworów geotermalnych zmodyfikowaną metoda „miękkiego kwasowania” (soft acidizing) Arch. IGSMiE PAN, Kraków.
- Bujakowski W., Kępińska B. 2000 – Energia geotermalna w Japonii – reminiscencje po Światowym Kongresie Geotermalnym w Japonii – World Geothermal Congress 2000 Kyushu-Tohoku, Japonia, 28.05–10.06.2000. *Przegląd Geologiczny* vol. 48, nr 9.
- Bujakowski W., Kępińska B., 2006 – Przykłady stymulacji odwiertów i złóż geotermalnych przy zastosowaniu metody „miękkiego kwasowania. [W:] Górecki W. red. *Atlas zasobów geotermalnych na Niżu Polskim. Formacja Mezozoiku*, Wyd. AGH, Kraków.
- Bujakowski W., Pająk L., Tomaszewska B., 2008 – Zasoby energii odnawialnej w województwie śląskim oraz możliwości ich wykorzystania. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 24, z. 2/3.

- Bujakowski W., Pajak L., Tomaszewska B., Hołojuch G., Łuszczewski J., 2014 – Otworowy wymiennik ciepła. Zgłoszenie Patentu nr 401721. Biuletyn Urzędu Patentowego nr 11(1054), 29 s.
- Bujakowski W., Tarkowski R., 2003 – Główne wyniki badań dotyczące termicznej charakterystyki górotworu w rejonie wysadów solnych. TPGGiG nr 4, Kraków.
- Bujakowski W., Tomaszewska B., red. 2014 – Atlas wykorzystania wód termalnych do skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepłej w układach binarnych w Polsce. Wyd. „Jak”, Kraków.
- Bujakowski W., Tomaszewska B., 2009 – Koncepcja odsalania wód termalnych w kontekście poprawy bilansu wodnego. Biuletyn PIG 436, s. 17–21.
- Bujakowski W., Tomaszewska B., 2010 – Geothermal water desalination – preliminary studies. Geo-Heat Center Quarterly Bulletin. Vol. 29 No. 2. August.
- Bujakowski W., Tomaszewska B., Bodzek M., 2012 – Geothermal water treatment – preliminary experiences from Poland with a global overview of membrane and hybrid desalination technologies. Chapter 7 [W:] Bundschuh J. & Hoikins J. Renewable Energy Applications for Freshwater Production. Taylor & Francis Group. London, UK.
- Bujakowski W., Wirth H., 2011 – Koncepcja zagospodarowania terenów pogórnicych. [W:] Zrównoważona produkcja i konsumpcja surowców mineralnych. Wyd. IGSMiE PAN. s. 148–154.
- Cataldi R., Hodgson S., Lund J., eds., 1999 – Stories from a heated Earth. Our geothermal heritage. GRC, IGA. Sacramento. California.
- Chowaniec J., 2007 – Hydrogeologia Karpat. Przegląd Geologiczny 54, 10, 846–847.
- Chowaniec J., 2009 – Studium hydrogeologii zachodniej części Karpat polskich. Biuletyn PIG, Hydrogeologia z. VIII, nr 434, 98 s.
- Chowaniec J., Freiwald P., Operacz T., Witek K., 2010 – Atlas hydrogeoróżnorodności województwa małopolskiego. Wyd. Departament Rolnictwa i Geologii Urzędu Marszałkowskiego Województwa Małopolskiego, Kraków, 144 s.
- Ciardi M., Cataldi R., 2005 – Il calore della terra – Contributo alla Storia della Geotermia in Italia. Pisa, ETS, ISBN 88-467-1407-5.
- Ciężkowski W., Michniewicz M., Przylibski T.A., 2011 – Wody termalne na Dolnym Śląsku. [W:] Mezozoik i Kenozoik Dolnego Śląska, 107–120, WIND, Wrocław.
- Ciężkowski W., 2007 – Wybrane zagadnienia gospodarki wodami leczniczymi w Polsce. [W:] Współczesne Problemy Hydrogeologii t. XIII. Toruń.
- Ciężkowski W., Jackowicz-Korczyński J., Kielczowa B., 2005 – Złoże wód leczniczych i ich granice. [W:] Współczesne Problemy Hydrogeologii t. XIII. Toruń.
- Ciężkowski W., Liber-Makowska E., 2011 – Charakterystyka warunków występowania i eksploatacji wód termalnych Łądka-Zdroju. Technika Poszukiwań Geologicznych nr 1–2, s. 61–69.
- Cleveland C.J., Morris Ch., eds., 2006 – Dictionary of Energy. Elsevier Ltd. Printed in Italy.
- Długosz P., Nagy S., 1996 – Determination of hydrodynamic parameters of the Podhale geothermal reservoir. Biuletyn PAN. Geologia. Warszawa.
- Doelling R.J., Schulte I., 2009 – Deep Groundsourced Heat Exchanger with Coaxial Pipe, Closed Water Circuit – Improvement Proposals in Project Development and Technical Pipe Conception. Beitrag Der Geothermiekongress 2009” Bochum, Germany, 17–19 November.
- Dowgiałło J., 1976 – Wody termalne Sudetów. Acta Geol. Pol., 26, 4, s. 617–643.
- Dowgiałło J., 2002 – The Sudetic geothermal region of Poland. Geothermics 31 (3), s. 343–359.

- Dowgiałło J., 2007 – Przegląd regionalny wód mineralnych, termalnych oraz uznanych za lecznicze [W]: Hydrogeologia regionalna Polski. Tom II. Wody mineralne lecznicze i termalne oraz kopalne. PIG, Warszawa.
- Dowgiałło J., Fistek, J., 2007 – Prowincja sudecka. [W:] Paczyński B., Sadurski A. red. – Hydrogeologia regionalna Polski t. II, s. 57–78.
- Dubiel S., Luboń K., Luboń W., Wartak W., 2012 – Problemy rekonstrukcji odwiertów geotermalnych na przykładzie odwiertu Biały Dunajec PAN-1. AGH Drilling Oil Gas. Vol. 29, No 1.
- Dz.U. 2015 poz. 478 Ustawa o odnawialnych źródłach energii z dnia 20 lutego 2015 r.
- Dz.U. L 152 z 11.06.2008. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystsze powietrze dla Europy.
- Dziewański red., 1993 – Encyklopedyczny słownik zoologiczny. Wyd. 2. Wyd. CPPGSMiE PAN Kraków.
- Franko O., Remšik A., Fendek M., (eds.), 1995 – Atlas of geothermal energy of Slovakia. Dionýz Štúr Institute of Geology, Bratislava, s. 1–268.
- Fridleifsson I.B., 1995 – Historical aspects of geothermal utilization in Iceland. Proceedings of the WGC 1995. Włochy.
- Fridleifsson I.B., 2000 – Geothermal energy for the benefit of the people worldwide. Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, Japan.
- Fridleifsson I.B., Freeston D.H., 1994 – Geothermal Energy Research and Development. Geothermics, 23, 2.
- Ganz B., Schellschmidt R., Schulz R., Sanner B., 2013 – Geothermal Energy Use in Germany. European Geothermal Congress Pisa, Italy.
- Geotermia Pyrzyce sp. z o.o., 2014 – Demonstracja nowatorskiej technologii poprawy chłonności warstwy złożowej wód geotermalnych. Broszura informacyjna. Projekt Life+ 11 ENV/PL/000447.
- Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, 2014 – Stan Środowiska w Polsce. Raport 2014. Biblioteka Ministerstwa Środowiska, Warszawa.
- Główny Urząd Statystyczny, 2014 – Energia ze źródeł odnawialnych w 2013 roku. Warszawa 2014.
- Gonet A., Śliwa T., Jezuit Z., Sapińska-Śliwa A., Knez D., 2010 – Koncepcja wykorzystania odwiertów naftowych w Karpatach. Wiertnictwo Nafta-Gaz. 27, 4, s. 773–780.
- Gonet A., Śliwa T., Stryczek S., Sapińska-Śliwa A., Jaszczur M., Pająk L., Złotkowski A., 2011 – Metodyka identyfikacji potencjału cieplnego górotworu wraz z technologią wykonania i eksploatacji otworowych wymienników ciepła. Wyd. AGH, Kraków.
- Gordienko V.V., Gordienko I.V. (eds.), 2004 – Geothermal Atlas of Ukraine. National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Geophysics of S. I. Subbotin. Kiev.
- Górecki W. red., 2006a – Atlas zasobów geotermalnych formacji mezozoicznej na Niziu Polskim. AGH Kraków.
- Górecki W. red., 2006b – Atlas zasobów geotermalnych formacji paleozoicznej na Niziu Polskim. AGH Kraków.
- Górecki W. red., i in., 2011 – Atlas zasobów wód i energii geotermalnej Karpat zachodnich. ZSE AGH Kraków.
- Górecki W. red., i in., 2012 – Atlas geotermalny zapadliska przedkarpackiego. ZSE AGH Kraków.
- Górecki W. red. nauk., i in., 2013 – Atlas geotermalny Karpat Wschodnich. ZSE AGH Kraków.

- Górecki W. red. Kuźniak T., Łapinkiewicz A.P., Maćkowski T., Strzetelski W., Szklarczyk T., 1995 – Atlas zasobów energii geotermalnej na Niżu Polskim. Towarzystwo Geosynoptyków „GEOS”, Kraków.
- Górecki W., (red.), Adamczyk A.F., Szczepański A., Szklarczyk T., 1990 – Atlas wód geotermalnych Niżu Polskiego. ISE AGH Kraków. Okręgowe Przed. Geodezyjno-Kartograficzne.
- Górecki W., 1995 – Atlas zasobów energii geotermalnej na Niżu Polskim. Towarzystwo Geosynoptyków GEOS, AGH Kraków.
- Górecki W., Kępińska B., Bujakowski W., Soboń J., 2011 – Zatlaczanie wód geotermalnych w piaszkowcowych i węglanowych skałach zbiornikowych do otworu chłonnego. [W:] Górecki W., red. Atlas zasobów wód i energii geotermalnej Karpat Zachodnich. Goldruk.
- Hurter S. Heanel R. eds., 2002 – Atlas of geothermal resources in Europe. Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Hurter S., Schellschmidt R., 2003 – Atlas of Geothermal Resources in Europe. *Geothermics* t. 32, v. 4–6, s. 779–787.
- Kapuściński J., Nagy S., Długosz P., Biernat H., Bentkowski A., Zawisza L., Macuda J., Bujakowska K., 1997 – Zasady i metodyka dokumentowania zasobów wód termalnych i energii geotermalnej oraz sposoby odprowadzania wód zużytych. Poradnik metodyczny. MOŚZNiL, Warszawa.
- Karwasiecka M., 1996 – Atlas Geotermiczny Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Wyd. Kartograficzne Polskiej Agencji Ekologicznej SA. Warszawa.
- Kępińska B., 1997 – Model geologiczno-geotermalny niecki podhalańskiej. *Studia, Rozprawy, Monografie*, 48. Wyd. CPPGSMiE PAN, Kraków.
- Kępińska B., 2003 – Current geothermal activities and prospects in Poland an overview. *Geothermics*, 32.
- Kępińska B., 2015. Geothermal Energy Country Update Report from Poland, 2010–2014. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*. Melbourne.
- Kępińska B., Bujakowski W., red. 2011 – Wytyczne projektowe poprawy chłonności skał zbiornikowych w związku z zatlaczaniem wód termalnych w polskich zakładach geotermalnych. Wyd. EJB. Kraków, 234 s.
- Kępińska B., Bujakowski W., Ney R., 1999 – Present situation of geothermal energy development in Poland. Międzynarodowa Konferencja Geotermalna, 27.09–01.10.1999, Bazylea, *Bulletin d’Hydrogeologie*, No 17.
- Kępińska B., Bujakowski W., Ney R., 2000 – Geothermal energy report. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, Japan.
- Kępińska B., Łowczowska A., 2002 – Wody geotermalne w lecznictwie, rekreacji i turystyce. *Studia, Rozprawy, Monografie*, 113. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- Kępińska B., Tomaszewska B., 2010 – Główne bariery rozwoju wykorzystania energii geotermalnej w Polsce. *Propozycje zmian. Przegląd Geologiczny* 58(7), s. 594–598.
- Kjarn S.P., Eliasson J., 1983 – Geothermal reservoir engineering lecture notes. UNU Geothermal Training Programme, Iceland.
- Lindal B., 1973 – Industrial and Rother applications of geothermal energy, except power production and district heating. [W:] *Geothermal energy, Earth Sciences* (ed. By H.C.H. Amstead). V. 12, UNESCO).
- Lisik R., Szczepański A., 2014 – Siarczkowe wody lecznicze w części zapadliska przedkarpackiego. Wyd. Posteris. Kielce.

- Lund J., Boyd T., 2015 – Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review. Proceedings World Geothermal, 1 Melbourne, Australia, 19–25 April 2015.
- Majorowicz J., 1976 – Mapa strumienia ciepłego Polski na tle pola geotermicznego Europy oraz niektóre aspekty interpretacji. *Acta Geophys. Polon.* 24, (2), s. 146–156.
- Majorowicz J., 1977 – Analiza pola geotermicznego Polski na tle Europy ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień tektonicznych i hydrogeotermalnych. *Przegląd Geologiczny* 25, 3, s. 135–143.
- Nagy S., Such J., Szott W., 1999 – Weryfikacja hydrodynamicznego modelu złożowego podfliszowych wód termalnych niecki podhalańskiej na podstawie testów hydrodynamicznych [W:] Nowe metody i technologii w geologii naftowej, wiertnictwie eksploatacji otworowej i gazownictwie, t. II. AGH, Kraków.
- Ney R., 1992 – Wyniki badań nad możliwościami wykorzystania energii geotermalnej w Polsce. *Nauka Polska*, 4, s. 37–49.
- Ney R., 1997 – Zasoby energii geotermalnej w Polsce i możliwe kierunki jej wykorzystania. *Seminarium naukowe*. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków–Zakopane.
- Ney R., Sokołowski J., 1987 – Wody geotermalne Polski i możliwości ich wykorzystania, *Nauka Polska* nr 6.
- Nowak W., Borsukiewicz-Goźdzur A., Klonowicz P., Stachel A., Hanausek P., Klonowicz W., 2010 – Wstępne wyniki badań prototypowego układu mini siłowni z ORC zasilanej wodą o temperaturze 100°C, *Przegląd Geologiczny*, 58, s. 622–625.
- Paczyński B., 1993 – Atlas hydrogeologiczny Polski 1:500 000. Cz. I Systemy zwykłych wód podziemnych. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- Paczyński B., 1995 – Atlas hydrogeologiczny Polski 1:500 000. Cz. II Zasoby, jakość i ochrona zwykłych wód podziemnych. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- Pająk L., Bujakowski W., 2000 – Efektywność wykorzystania istniejących głębokich odwiertów wiertniczych jako wymienników ciepła wykorzystujących energię geotermiczną. *Studia, Rozprawy, Monografie* nr 76. IGSMiE PAN. Kraków. s. 5–62.
- Pająk L., Bujakowski W., 2005 – Problematyka wykorzystania wód geotermalnych w odkrytych kąpieliiskach całorocznych w warunkach polskich. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, miesięcznik Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych, Wyd. SIGMA-NOT. XXXVI Nr 11 (428) s. 10–15.
- Pająk L., Bujakowski W., 2007 – Analiza cen energii cieplnej pochodzącej z działających w Polsce ciepłowni geotermalnych, *Technika Poszukiwań Geologicznych Geotermia, Zrównoważony Rozwój* nr 1, s. 9–16.
- Pająk L., Bujakowski W., 2011 – Porównanie cen zakupu energii pochodzącej z polskich ciepłowni geotermalnych z energią innych dostawców w świetle obowiązujących taryf rozliczeniowych. *Technika Poszukiwań Geologicznych Geotermia, Zrównoważony Rozwój* nr 1–2, s. 237–244.
- Pająk L., Bujakowski W., 2013 – Energia geotermalna w systemach binarnych. *Przegląd Geologiczny* vol .61, nr 11/2, s. 699–705.
- Pająk L., Bujakowski W., 2015 – The costs of obtaining geothermal energy in the municipal sector in relation to the purchasing power of money under polish conditions. *Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia, 19–25 April 2015.*

- Pawlikowski M., Mazurek J., Bujakowski W., Graczyk S., Kępińska B., Nagel J., 1998 – Dokumentacja wynikowa z realizacji Grantu Celowego 9 T12B 009 96 „Zintegrowany system monitoringu wód i instalacji geotermalnych”. Arch. IGSMiE PAN, Kraków.
- Plewa S., 1966 – Regionalny obraz parametrów geotermicznych obszaru Polski. Wyd. Geofizyki i Geologii Naftowej, Kraków.
- Plewa S., 1994a – Parametry geotermalne na obszarze Polski. Wyd. CPPGSMiE PAN, Kraków.
- Plewa S., 1994b – Rozkład parametrów geotermalnych na obszarze Polski. Wyd. CPPGSMiE PAN, Kraków.
- Płochniewski Z., 1985 – Występowanie i możliwości wykorzystania wód geotermalnych w niecce mogileńsko-łódzkiej. [W:] Stan rozpoznania wód termalnych. Mat. Sympozjum 24–25.10. Kraków .
- Porwisz B., 2013 – Szlakiem wód leczniczych i termalnych w Małopolsce. Wyd. Departament Środowiska Urzędu Marszałkowskiego Województwa Małopolskiego, 96 s.
- Pussak M., Bauer K., Stiller M., Bujakowski W., 2014 – Improved 3D seismic attribute mapping by CRS stacking instead of NMO stacking: Application to a geothermal reservoir in the Polish Basin. *Journal of Applied Geophysics* 103, s. 186–198.
- Sekioka M., 1995 – Geothermal energy in history, the case of Japan. *Proceedings of the World Geothermal Congress 1995*. Italy.
- Shook G.M., 1995 – Development of a vapor-dominated reservoir with a “High-Temperature” component. *Geothermics* V. 24, No. 4, s. 489–505.
- Sigfússon B., Uihlein A., 2015 – 2014 JRC Geothermal Energy Status Report. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015.
- Śliwa T., Gonet A., Złotkowski A., Pająk L., Sapińska-Śliwa A., Jezuit Z., 2012 – Zintegrowany system otworowych wymienników ciepła i kolektorów słonecznych. Wyd. AGH. Kraków.
- Sobański R., Nowak W., 1994 – Ciepłownie geotermalne. [W:] II Konf. „Racjonalizacja użytkowania energii i środowiska. Szczyrk.
- Sokołowski J., 1987 – Możliwości wykorzystania wód geotermalnych dla uzupełnienia bilansu energetycznego Polski. *Mat. Konf. Wołomin*.
- Sokołowski J., 1996 – Definicje pojęć określających warunki występowania zasobów energii geotermicznej i geotermalnej. *Mat. Kursu „Polska Szkoła Geotermalna”*. Kraków.
- Sokołowski J., 1998 – Racjonalne zagospodarowanie wód geotermalnych, mineralnych i innych zasobów naturalnych w Małopolsce. *Technika Poszukiwań Geologicznych* 4, s. 3–12.
- Sokołowski J., 1999 – Możliwości zagospodarowania wód geotermalnych w trzech prowincjach Europy północno-zachodniej i centralnej stykających się w rejonie Krakowa. *Technika Poszukiwań Geologicznych*, 4–5, s. 77–120.
- Sokołowski J., Długosz P., Bujakowski W. 1994 – Stan obecny i program wykorzystania energii geotermalnej na Podhalu. *Mat. Konferencyjne pn. „Obecny stan środowiska i program ekorozwoju Tatr, Podhala, Spisza, Orawy, Pienin i Gorców”*. Wyd. CPPGSMiE PAN, Kraków.
- Sonik-Heliasz E., red. 2009 – Atlas zasobów energii geotermalnej w regionie górnośląskim. Wyd. GIG Katowice.
- Stachel A.A., 2013 – Wykorzystanie energii ziemi. Wydawnictwo Uczelniane ZUT.
- Szczepeński A., Porwisz B., 2007 – Lecznicze wody siarczkowe z miejscowości Las Winiarski koło Buska-Zdroju. [W:] III Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna. *Geologia stosowana i ochrona środowiska*. Wyd. PG Sp. z o.o. w Kielcach, s. 97–112.

- Szczepański A., Szklarczyk., 2005 – Zagrożenia w gospodarowaniu zasobami wód leczniczych na przykładzie rejonu Krynicy i Muszyny. [W:] Współczesne problemy hydrogeologii T. XII. Toruń, s. 695–700.
- Szewczyk J., 2010 – Geofizyczne oraz hydrogeologiczne warunki pozyskiwania energii geotermicznej w Polsce. *Przegląd Geologiczny* 57, 7, s. 566–573.
- Tomaszewska B., 2011a – Utylizacja wód termalnych, korozja i skaling. Wstępne wyniki realizacji projektu badawczo-rozwojowego. *Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia. Zrównoważony Rozwój* nr 1–2. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- Tomaszewska B., 2011b – Koncepcja odsalania wód termalnych w kontekście poprawy bilansu wodnego. Cz. II – Wstępne wyniki badań. *Biuletyn PIG, Hydrogeologia*, 445, XII/2, s. 693–700.
- Tomaszewska B., 2011c – The use of ultrafiltration and reverse osmosis in the desalination of low mineralized geothermal waters. *Archives of Environmental Protection*, 37, 3, s. 63–77.
- Tomaszewska B., 2012 – Efektywność odsalania wód termalnych w zintegrowanym procesie ultrafiltracji i odwróconej osmozy. *Membrany i procesy membranowe w ochronie środowiska* (red.: Krystyna Konieczny, Irena Korus). *Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk*, Vol. 95, t. 1, Gliwice, s. 247–255.
- Tomaszewska B., 2014 – Ocena możliwości efektywnego wykorzystania schłodzonych wód termalnych. *Studia Rozprawy Monografie* Nr 190, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- Tomaszewska B., Bodzek M., 2013a – Desalination of geothermal waters using a hybrid UF-RO process. Part I: Boron removal in pilot-scale tests. *Desalination* 319, s. 99–106.
- Tomaszewska B., Bodzek M., 2013b – Desalination of geothermal waters using a hybrid UF-RO process. Part II: Membrane scaling after pilot-scale tests. *Desalination* 319, s. 107–114.
- Tomaszewska B., Pająk L., 2010 – Analysis of treatment possibilities of high-mineralized geothermal water (Central Poland – Gostynin region). *Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Indonesia*. Paper No. 3305 (CD).
- Tomaszewska B., Pająk L., 2012 – Dynamics of clogging processes in injection wells used to pump highly mineralized thermal waters into the sandstone structures lying under the Polish Lowland. *Archives of Environmental Protection* 38(3), s. 105–117.
- Ungemach P., 2001 – Insight into geothermal reservoir management. *Text-book of the European Summer School on Geothermal Energy Applications*. Ordea, Romania.

Strony internetowe:

- www.acidizing.com.pl/pl/.
- www.baza-oze.pl.
- www.egec.info/publications.
- www.geotermia.inet.pl/ochrona_srodowiska.php.
- www.geotermia.pl/ekologia/ochrona-srodowiska.html.
- www.krakowskialarmsmogowy.pl.
- www.mg.gov.pl.
- www.mineralne.pgi.gov.pl.

Dodatek
Wybrane niepublikowane prace wykonane pod kierunkiem autora

- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 1995 – Projekt prac geologicznych dla ustalenia zasobów eksploatacyjnych wód termalnych z utworów podfliszowych Niecki Podhalańskiej w rejonie Bańskiej i Białego Dunajca. Arch. Geotermia Podhalańska SA i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 1996a – Ocena możliwości zagospodarowania ciepła naturalnego wód występujących na obszarze Gminy Ciepłowody. Arch. UG Ciepłowody i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 1996b – Studium występowania wód geotermalnych w wybranych regionach Polski południowej – województwo krośnieńskie i krakowskie. Arch. WFOŚiGW w Krakowie i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 1997a – Ocena możliwości wykorzystania energii geotermalnej w województwie kieleckim. Arch. Wojewoda Kielecki i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 1997b – Studium zagospodarowania wód geotermalnych w województwie krakowskim. Wojewoda Krakowski i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 1998 – Dokumentacja hydrogeologiczna dla ustalenia zasobów wód termalnych: otwory Biały Dunajec PAN-1 i Bańska PGP-1. Arch. Geotermia Podhalańska SA i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 1999 – Studium możliwości wykorzystania energii geotermalnej w województwie świętokrzyskim. Arch. Urząd Wojewódzki w Kielcach i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2000 – Projekt prac geologicznych na wykonanie otworu hydrotermalnego Słomniki GT-1 dla ujęcia wód wglębnych z utworów kredowych na terenie miasta Słomniki. Arch. UMiG Słomniki i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2001a – Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby eksploatacyjne wód i energii cieplnej z utworów kredowych na terenie miasta Słomniki. Arch. UM Słomnik i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2001b – Koncepcja programowa zaopatrzenia w energię ciepłą projektowanych obiektów ośrodka „Orle Gniazdo” w Szczyrku. Arch. EXPOL SA i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2002 – Projekt zagospodarowania złoża wód termalnych „Mszczonów” z utworów dolno kredowych Niecki warszawskiej. Arch. Geotermia Mszczonów SA i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2003a – Prognoza możliwości pozyskania energii geotermalnej w rejonie Sulejówka. Arch. UM Sulejówek i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2003b – Studium występowania wód geotermalnych na obszarze powiatu zamojskiego dla potrzeb PW ATEX. Arch. PW ATEX i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2004a – Ocena warunków hydrogeotermalnych dla obszaru powiatu nyskiego ze szczególnym uwzględnieniem gminy Nysa. Arch. UG Nysa i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2004b – Studium możliwości wykorzystania energii geotermalnej w paśmie gubałowskim. Arch. Salamandra Sp. z o.o. i IGSMiE PAN.

- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2004c – Studium pozyskania i zagospodarowania energii wód geotermalnych do celów balneologicznych i ciepłowniczych w mieście Gostynin. Arch. UM Gostynin i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2005a – Ocena możliwości pozyskania energii cieplnej z wód geotermalnych na terenie gminy miejskiej Kraków oraz wstępna analiza ekonomiczna dla przedsięwzięcia pod nazwą „Budowa miejskiego zakładu geotermalnego”. Arch. Gmina Miejska Kraków i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2005b – Ocena potencjału geotermalnego rejonu brzegu nasunięcia Karpat w strefie gdowskiej. Arch. UG Gdów i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2005c – Program działań wraz z oceną możliwości uruchomienia eksploatacji energii geotermalnej z dubletu odwiertów Skierniewice GT-1 i GT-2 – Wstępne Studium Celowości. Arch. UM Skierniewice i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2005d – Projekt prac geologicznych na wykonanie otworu Szymoszkowa GT-1 w Zakopanem w celu poszukiwania i rozpoznania wód termalnych. Arch. Dorado Sp. z o.o., IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2005e – Studium celowości dla Kąpieliska Olsztyn w województwie śląskim z wykorzystaniem ciepła geotermalnego i źródeł skojarzonych. Arch. UMiG Olsztyn i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2005f – Studium Celowości pozyskania i zagospodarowania energii z wód termalnych do celów rekreacyjnych i ciepłowniczych dla Zespołu Pałacowo-Hotelowego w Sobieniach. Arch. Włodarzewska SA i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2005g – Studium pozyskania i zagospodarowania energii wód geotermalnych do celów rekreacyjnych i ciepłowniczych w gminie Niedźwiedź. Arch. UG Niedźwiedź i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2005h – Wstępne studium możliwości pozyskania i wykorzystania energii geotermalnej z wód kopalnianych LGOM. Arch. KGHM Cuprum Sp. z o.o. i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2005i – Wstępne studium wykonalności zagospodarowania wód termalnych dla celów rekreacyjno-leczniczych w rejonie Kraków – Wschód wraz z biznesplanem ośrodka rekreacyjno-leczniczego. Arch. Gmina Miejska Kraków i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2007a – Analiza rynku energii cieplnej w Sochaczewie i możliwości jego rozwoju. Arch. Geotermia Mazowiecka SA i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2007b – Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby eksploatacyjne ujęcia wód termalnych Szymoszkowa GT-1 w miejscowości Zakopane. Arch. Dorado Sp. z o.o. i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2007c – Geologiczna ocena możliwości występowania i wykorzystania wód geotermalnych w rejonie Głuchołaz. Arch. Bryksy Hotele Sp. z o.o. i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2007d – Opracowanie wytycznych do projektu utylizacji zasolonych wód termalnych w warunkach hydrogeologicznych Gostynina. Arch. UM Gostynin i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2007e – Projekt prac geologicznych w celu rozpoznania występowania wody termalnej w Głuchołazach oraz oceny jej zasobów. Arch. Bryksy Hotele Sp. z o.o. i IGSMiE PAN.

- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2007f – Projekt prac geologicznych w celu wykonania otworów poszukiwawczo-rozpoznawczych za wodami termalnymi w Krakowie. Arch. Krakowski Zarząd Komunalny (ZIKiT) i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2008a – Projekt prac geologicznych w celu wykonania otworów poszukiwawczo-rozpoznawczych za wodami termalnymi w Kleszczowie. Arch. UG Kleszczów i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2008b – Warunki występowania oraz możliwości zagospodarowania wód termalnych w m. Niepołomice okolica ul. Świerczewskiego i Grunwaldzkiej (dawne koszary). Arch. UG Niepołomice i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2008c – Wniosek o koncesje na rozpoznanie i poszukiwanie wód leczniczych i termalnych w rejonie Korbielowa wraz z wszystkimi dokumentacjami wymaganymi przez prawo, tj. Projektem prac geologicznych na wykonanie otworu geotermalnego w miejscowości Korbielów oraz Ocenę oddziaływania na środowisko wykonani otworu. Arch. UG Jeleśnia i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2008d – Zasoby geotermalne i ocena możliwości ich pozyskania na obszarze woj. Podkarpackiego. Arch. Centrum Doradztwa Gospodarczego Sp. z o.o. i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2009a – Rozpoznanie warunków hydrogeotermalnych rejonu sołectwa Międzybrodzie Żywieckie. Arch. OW Niagara Sp. z o.o. i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2009b – Ocena warunków geologicznych Kielc pod kątem energetycznych i leczniczych zasobów wód podziemnych (termalnych i leczniczych) niezbędnych dla podjęcia decyzji o ewentualnym ich wykorzystaniu i uwzględnieniu w bilansie energetycznym oraz dokumentach rozwoju Miasta. Arch. UM Kielce i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2009c – Opracowanie założeń techniczno-ekonomicznych wstępnego podgrzewania powietrza w szybie R-IX z wykorzystaniem energii wód kopalnianych. Arch. KGHM Polska Miedź SA i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2009d – Projekt prac geologicznych w celu opracowania wytycznych projektowych poprawy chłonności skał zbiornikowych w związku z zatłaczaniem wód termalnych. Arch. Geotermia Mazowiecka SA i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2009e – Projekt prac geologicznych w celu poszukiwania i rozpoznania zasobów wód termalnych w Gminie Wierchosławice. Arch. UG Wierchosławice i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2009f – Projekt prac geologicznych w celu poszukiwania i rozpoznania zasobów wód termalnych w rejonie Łowicza. Arch. Real Estate Kaźmiersey Sp. J. i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2009g – Projekt prac geologicznych w celu poszukiwania i rozpoznania zasobów wód termalnych w gminie Wierchosławice. Arch. Energia Wierchosławice Sp. z o.o. i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2009h – Studium możliwości występowania i zagospodarowania energii wód geotermalnych w kontekście ochrony powietrza i klimatu w Warszawie. Arch. UM Warszawa i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2009i – Wstępna ocena występowania i możliwości zagospodarowania energii geotermalnej we wskazanej lokalizacji Warszawy. Arch. Platan Group Sp. z o.o. i IGSMiE PAN.

- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2009j – Wstępna ocena występowania i możliwości zagospodarowania energii geotermalnej we wskazanej lokalizacji miejscowości Tymawa gm. Grunwald. Arch. Platan Group Sp. z o.o. i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2009k – Wstępna ocena zabezpieczenia potrzeb energetycznych wskazanych obiektów z uwzględnieniem energii geotermicznej w Konstancin Jeziorna. Arch. Platan Group Sp. z o.o. i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2009l – Wstępna ocena zabezpieczenia potrzeb energetycznych wskazanych obiektów z uwzględnieniem energii geotermicznej w Szczyrku. Arch. Platan Group Sp. z o.o. i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2009m – Wstępne Studium Wykonalności systemu wykorzystania potencjału hydrodynamicznego wody dołowej dopływającej do kopalni ZG Polkowice-Sieroszowice dla pozyskiwania energii elektrycznej. Arch. KGHM Polska Miedź SA i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2010a – Energetyczne wykorzystanie zasobów wód termalnych ujmowanych otworem Poręba Wielka IG-1 – Studium wykonalności. Arch. Gorczańskie Wody Termalne Sp. z o.o. i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2010b – Ocena warunków geotermalnych na podstawie badań geofizycznych – magnetotellurycznych oraz termiki podłoża w wyznaczonym rejonie badań na terenie miasta Nysa. Arch. UG Nysa i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2010c – Projekt prac geologicznych w celu aktualizacji zasobów eksploatacyjnych wód termalnych dla otworu Poręba Wielka IG-1. Arch. Gorczańskie Wody Termalne Sp. z o.o. i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2011a – Model numeryczny złoża wód termalnych objętego obszarem górniczym „Podhale 1”. Arch. PEC Geotermia Podhalańska SA i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2011b – Nadzór merytoryczny nad opracowaniem dokumentacji wynikowej z wykonania prac geologicznych w celu poszukiwania i rozpoznania złoża wód termalnych otworem Czarny Potok GT-1. Arch. Geokrak Sp. z o.o. i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2011c – Projekt prac geologicznych w celu poszukiwania i rozpoznania wody termalnej w Nysie. Arch. Nyska Energetyka Ciepła – Nysa Sp. z o.o. i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2011d – Raport oddziaływania na środowisko projektowanego przedsięwzięcia „Poszukiwanie i rozpoznanie zasobów wód termalnych w Nysie”. Arch. Nyska Energetyka Ciepła – Nysa Sp. z o.o. i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2012 – Studium możliwości wykorzystania wód geotermalnych w związku z planowaną inwestycją – Beskidzki Park Integracyjny. Arch. Berleđa Poland Sp. z o.o. i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2013a – Dokumentacja hydrogeologiczna aktualizująca zasoby eksploatacyjne wód termalnych ujętych otworem Poręba Wielka IG-1. Arch. Gorczańskie Wody Termalne Sp. z o.o. i IGSMiE PAN.
- Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2013b – Opracowanie modelu technologicznego wykorzystania energii geotermalnej ujętej otworowym wymiennikiem ciepła w otworze Czarny Potok GT-1. Arch. Kolej Gondolowa Jaworzyna Krynicka SA i IGSMiE PAN.

Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2013c – Projekt zagospodarowania złoża wód termalnych w miejscowości Poręba Wielka w granicach projektowanego obszaru górnictwa „Poręba Wielka”. Arch. Gorczańskie Wody Termalne Sp. z o.o. i IGSMiE PAN.

Praca zbiorowa pod kierunkiem Bujakowskiego, 2014 – Projekt Robót Geologicznych na wykonanie dodatkowego pogłębienia otworu chłonnego Biały Dunajec PAN-1. Arch. PEC Geotermia Podhalańska SA i IGSMiE PAN.

Geologiczne, środowiskowe i techniczne uwarunkowania projektowania i funkcjonowania zakładów geotermalnych

Streszczenie

Wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych jest jednym z priorytetów rozwoju naszego kraju i Unii Europejskiej. Racjonalne wykorzystanie energii i wód geotermalnych ściśle wiąże się ze stopniem rozpoznania ich zasobów. Decyzje inwestorów, mające zwykle podłoże ekonomiczne, wymagają określenia poziomu ryzyka geologicznego osiągnięcia zakładanych wartości głównych parametrów wód geotermalnych tj. wydajności, temperatury oraz jakości wód wyrażanego składem chemicznym. Do lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku rozpoznanie w tym zakresie było niepełne, a w wielu regionach kraju niedoskonałe. Istniejące profile otworów i dokumentacje zawierające wyniki badań geologicznych, geofizycznych i hydrogeologicznych opracowywane były głównie dla celów poznania budowy geologicznej danego rejonu naszego kraju lub dla potrzeb przemysłu naftowego. Obecność wód geotermalnych stwierdzonych badaniami w odwiertach poszukiwawczych (niehydrogeologicznych) traktowana była jako zjawisko negatywne. Z tych powodów nie podejmowano szczegółowych badań parametrów wód i skał, w których te wody występują. Pozyskane dane mają charakter informacji ogólnej, zdecydowanie uniemożliwiającej podjęcie decyzji o realizacji przedsięwzięcia inwestycyjnego, ale pozwalały jedynie na wskazanie lokalizacji zbiorników wód geotermalnych.

Na przestrzeni ostatnich trzydziestu lat środowisko naukowe zajmujące się problematyką geotermalną pozyskało znaczną wiedzę i doświadczenie w umiejętnym korzystaniu z istniejących danych oraz ich prezentowaniu środowisku gospodarczemu.

W niniejszej pracy dokonano syntezy szerokiego zakresu prac badawczych, zrealizowanych od końca lat osiemdziesiątych XX wieku. Synteza została skonstruowana na podstawie wyników badań związanych z wydzielonymi głównymi fazami rozwoju przedsięwzięć geotermalnych i stanowiących interdyscyplinarne zadania badawcze.

W sferze zagadnień związanych z wykorzystaniem energii geotermalnej można wyróżnić następujące etapy badawcze:

- I. Etap rozpoznawczy obejmujący ogólne zestawienia, badania i analizy warunków geotermalnych o różnej szczegółowości rozpoznania, w którym wydzielono:

1. Rozpoznanie w skali makroregionalnej.
 2. Rozpoznanie w skali krajowej.
 3. Rozpoznanie w skali regionalnej.
 4. Rozpoznanie w skali lokalnej.
- II. Etap projektowania oraz wykonania ujęcia wód geotermalnych, a także przeprowadzenia testów złożowych, zawierający analizy i oceny technologii udostępniania złoża wód geotermalnych.
- III. Etap projektowania i wykonania części powierzchniowej instalacji geotermalnej, obejmujący synchronizację parametrów geotermalnego źródła energii i potencjalnego odbiorcy.
- IV. Etap funkcjonowania całego systemu geotermalnego.

Etapy te stanowią główne rozdziały pracy uzupełnione o rozdział wprowadzający zestawiający ogólną charakterystykę wykorzystania energii geotermalnej.

Etap I obejmuje 4 rozdziały odpowiadające skali rozpoznania warunków geologiczno-geotermalnych, od rozpoznania w skali makroregionalnej aż do rozpoznania w skali miejscowej, dotyczącego konkretnego obiektu objętego inwestycją, którym jest np. odwiert geotermalny.

W kolejnych rozdziałach opisano badania związane z II i III etapem, tj.: z pracami projektowymi, wykonaniem prac geologicznych oraz przeprowadzeniem testów hydrodynamicznych, wnoszących informacje niezbędne do prawidłowego zaprojektowania powierzchniowych elementów instalacji geotermalnych.

W ostatnim rozdziale przedstawiono wyniki badań dotyczących funkcjonowania systemu geotermalnego warunkujące wieloletnią, efektywną pracę instalacji, przekładającą się na sukces finansowy przedsięwzięcia.

W podsumowaniu przedstawiono aktualny stan rozpoznania warunków hydrogeotermalnych oraz stan zagospodarowania potencjału geotermalnego w naszym kraju.

W uzupełnieniu ukazano walory wód i energii geotermalnej wyróżniające je również wśród innych OZE tj.:

- własności fizykochemicznych wód możliwych do wykorzystania w lecznictwie i rekreacji,
- powszechność i dyspozycyjność występowania co powoduje, że jest to zasób krajowy niezależny m.in. od warunków atmosferycznych i sytuacji politycznej,
- wyjątkowo pozytywny wpływ na lokalny stan środowiska co bezpośrednio wpływa na stan zdrowia,
- duża stabilność kosztów wytwarzania energii w czasie na co minimalnie wpływają wahania cen energii elektrycznej, gazu itp.

Monografia niniejsza stanowi przegląd i podsumowanie prac badawczych autora, które zostały przedstawione w odniesieniu do głównych etapów tworzenia projektu geotermalnego.

Głównym wynikiem naukowym związanym z realizacją przedstawionych badań jest szczegółowe rozpoznanie warunków hydrogeotermalnych wybranych stref na terenie Polski.

Szczegółowa analiza lokalnych warunków hydrogeotermalnych i geotermicznych w aspekcie możliwości ich zagospodarowania dotyczyła:

- na terenie Niżu Polskiego m.in. stref rejonu: Łowicza, Inowrocławia, Mszczonowa, Skierniewic, Piotrkowa Trybunalskiego, Gostynina, Sulejówka, Warszawy, Kielc, Zamościa, Bełchatowa,
- Karpat m.in. stref rejonu: podhalańskiego, śląskiego, Poręby Wielkiej, Międzybrodzia Żywieckiego, Szczyrku, Krynicy, Jasła,
- Zapadliska przedkarpackiego m.in. stref rejonu: Krakowa, Słomnik, Tarnowa, Bochni i Brzeska, Gdowa, Niepołomic, Wierzchosławic,
- Sudetów m.in. stref rejonu: Nysy, Ciepłowód, Głuchołaz.

Uzyskane wyniki badań były i są podstawą racjonalnego planowania i projektowania przyszłych systemów geotermalnych.

Geological, Environmental and Technical Factors Affecting the Design and Operation of Geothermal Plants

Abstract

The use of energy from renewable sources is among the development priorities of both Poland and the European Union. Rational use of energy and geothermal waters is closely related to the degree to which such resources are identified. The investors' decisions, which are usually based on economic considerations, require the determination of the level of geological risk associated with the achievement of the assumed major geothermal water parameters, i.e. the amount extracted, temperature and water quality expressed as its chemical composition. Until the 1990s, our understanding of these was incomplete and also imperfect in many regions of the country. Existing well logging profiles and documentation containing the results of geological, geophysical and hydrogeological studies were developed primarily to research the geological structure of the area in question or for the purposes of the oil industry. The presence of geothermal water found in exploratory wells during geological (not hydrological) research was treated as a negative phenomenon. For these reasons, no detailed studies of parameters of the waters and of the rocks in which these waters were present were undertaken. The data obtained were of a general nature and definitely did not enable any decisions on the implementation of an investment project, only allowing locations of geothermal aquifers to be pinpointed.

Over the last thirty years, the scientific community specialising in geothermal resources acquired considerable knowledge and experience in the skilful use of existing data and presenting them to business circles.

This paper presents a synthesis of the broad range of research work carried out since the late 1980s. This synthesis has been developed on the basis of the results of studies that were related to main geothermal project development stages and constituted interdisciplinary research tasks.

With respect to the issues related to the use of geothermal energy, the following research stages can be distinguished:

- I. The exploratory stage covering the general compilation, studies and analyses of geothermal conditions at varying levels of detail, which included:

1. Exploration on the macro-regional scale.
 2. Exploration on the national scale.
 3. Exploration on the regional scale.
 4. Exploration on the local scale.
- II. The design and execution of geothermal wells and reservoir testing, including the analysis and assessment of geothermal water reservoir extraction technology.
- III. The design and construction of the surface part of the geothermal installation, including the synchronisation of parameters between the geothermal energy source and its potential user.
- IV. The operation of the entire geothermal system.

These stages form the main chapters of the work; additionally, there is an introductory chapter that summarises the general characteristics of geothermal energy utilisation.

Stage I is described in four chapters, which concern the exploration of geological and geothermal conditions on subsequent levels – from the macro-regional scale down to the local one, i.e. the specific site selected for the project, e.g. a geothermal well.

The following chapters describe the studies conducted in connection with the second and third stages, i.e. design work, the execution of geological work and hydrodynamic tests, which provide the information necessary for the proper design of surface geothermal plant elements.

The final chapter presents the results of studies on the functioning of geothermal systems that condition the long-term efficient operation of such installations, translating into the project's financial success.

In the conclusion, a diagnosis of our current knowledge of hydrogeothermal conditions is presented alongside the current state of development of geothermal potential in Poland.

In the supplement, the advantages of geothermal waters and energy that set them apart from other renewable energy sources are described, i.e.:

- the physical and chemical properties of waters that can be used in medicine and recreation,
- their universal presence and availability, making them a national resource independent from weather conditions and the political situation,
- extremely positive impact on the local environment, which directly affects human health,
- highly stable power generation costs over time, which are only minimally affected by fluctuations in electricity and gas prices, etc.

This monograph provides an overview and summary of the author's research work, which concerns major stages of geothermal project development.

The main research result related to the implementation of the studies presented is a detailed diagnosis of hydrogeothermal conditions in selected zones in the territory of Poland.

A detailed analysis of local hydrogeothermal and geothermal conditions in terms of development potential concerned:

- in the Polish Lowland: among others the vicinity of Łowicz, Inowrocław, Mszczonów, Skierniewice, Piotrków Trybunalski, Gostynin, Sulejówek, Warsaw, Kielce, Zamość, Bełchatów,
- in the Carpathians: among others the Tatra and Silesia regions, Poręba Wielka, Międzybrodzie Żywieckie, Szczyrk, Krynica, Jasło,
- in the Carpathian Foredeep: among others the vicinity of Kraków, Słomniki, Tarnów, Bochnia and Brzesko, Gdów, Niepołomice, Wierzchosławice,
- in the Sudetes: among others the vicinity of Nysa, Ciepłowody, Głucholazy.

The results obtained have been the basis for the rational planning and design of future geothermal systems.

