

ANALIZA NISKOTEMPERATUROWEGO POTENCJAŁU ENERGETYCZNEGO OBSZARÓW MŁODOGLACJALNYCH NA PRZYKŁADZIE POJEZIERZA KASZUBSKIEGO. PODEJŚCIE METODOLOGICZNE

STRESZCZENIE

Na wstępie przypomniana została specyfika geotermii i termogeologii ze szczególnym zwróceniem uwagi na wskaźnik mocy cieplnej i wskaźnik efektywności energetycznej jako podstawowych narzędzi stosowanych w tych domenach geoinżynierii cieplnej.

Następnie zaprezentowano Pojezierze Kaszubskie jako obszar o wysokich walorach przyrodniczo-krajobrazowych. Obszar ten posiada również potencjał dla powstania ośrodków typu spa, które mogłyby się stać główną osią zrównoważonego rozwoju turystyki w tym regionie. W perspektywie ewentualnej specjalizacji lokalnej w zakresie tej branży oceniono przydatność geotermiczną i hydrogeotermiczną zasobów rozpatrywanego terenu.

Stwierdziwszy słabą dostępność głębokich zasobów hydrogeotermalnych w rozpatrywanym regionie Niziu Polskiego, na przykładzie gminy Chmielno rozważono możliwości wykorzystania przypowierzchniowego, niskotemperaturowego potencjału energetycznego. Dla tego regionu zaprezentowano główne wyniki analizy uwarunkowań wykorzystania energii cieplnej płytkich warstw wodonośnych.

Przeprowadzono także wstępną ocenę możliwości magazynowania ciepła w płytkich warstwach wodonośnych na skalę Pojezierza Kaszubskiego.

SŁOWA KLUCZOWE

Termogeologia, wody w utworach czwartorzędowych, gruntowe pompy ciepła, spa i rekreacja, ATES, Pojezierze Kaszubskie, Chmielno

* * *

WPROWADZENIE

Potencjałem geotermicznym określa się głębokie zasoby kopalne ciepłe dyspozycyjne, pochodzące z ciepła pierwotnego i ciepła radiogenicznego Ziemi. Zasoby te, które uznano za odnawialne na skalę naszej planety, są jednak nierównomiernie rozłożone w płytkich poziomach skorupy ziemskiej. Dla obszarów zbudowanych z miększych utworów czwartorzędowych zasobnych w wody podziemne, ten głęboki potencjał stanowi mało znaczącą, składową część geosolarnego potencjału energetycznego. Dominującą częścią tego potencjału jest przenoszona wodami infiltracyjnymi energia z promieniowania słonecznego.

Różne sprawdzone metody pozwalają obliczyć przypowierzchniowy, geosolarny potencjał termiczny. Problematyczną okazuje się jednak ocena wartości ekonomicznej tego potencjału. Niniejsza praca odnosi się do tej problematyki z punktu widzenia termogeologii, jako jednej z dziedzin nauk o Ziemi (Banks 2012). Ocena potencjału będzie tu analizowana w odniesieniu do Gruntowych Pomp Ciepła (GPC) w układzie hydraulicznym otwartym zwanym dalej GPC typu *open loop*, ze szczególną uwagą zwróconą na specyfikę właściwości termicznych geotypów występujących na obszarach młodoglacjalnych.

1. TERMOGEOLOGIA W KILKU SŁOWACH

Termogeologia wykorzystuje w swych badaniach metody geomorfologii, hydrogeologii, inżynierii ciepłowniczej i klimatyzacji oraz inne specjalizacje m.in. architekturę (Banks 2012). Jako nauka o Ziemi jest domeną płytkich gruntów i wód podziemnych niskiej entalpii; $T < 20^{\circ}\text{C}$ do głębokości 50–250 m. Pod kątem energetyki cieplnej jest określana jako Odnawialne Źródło Energii (OŹE), z uwagi na znaczącą rolę energii słonecznej w kształtowaniu strumieni ciepła w płytkich poziomach Ziemi.

Główna zaleta termogeologii polega na możliwości jej stosowania na wszystkich obszarach zasobnych w wody podziemne. Główną jej wadą jest jednak ogólnie niski poziom temperatury warstw przypowierzchniowych. Według atlasu zasobów geotermalnych na Niżu Polskim (Górecki i in. 2006a), temperatura tych warstw na Niżu Polskim waha się w przedziale $8\text{--}9,5^{\circ}\text{C}$ na głębokości 0,5–100 m p.p.t. Poziom energetyczny, który jest reprezentatywny dla płytkich wód podziemnych w Polsce, można uznać jako podstawowy poziom referencyjny w zastosowaniach termogeologii do ogrzewania powierzchniowego na skalę krajową. Niska wartość tego parametru nie pozwala na eksploatację dolnych źródeł ciepła w ogrzewnictwie bez udziału urządzeń pomocniczych, takich jak sprężarkowe pompy ciepła. Sprawność tych maszyn termodynamicznych zależy głównie od różnicy temperatury między dolnym i górnym źródłem ciepła (ΔT). Zgodnie z zasadą pracy lewobieżnego obiegu Carnota sprawność tych urządzeń rośnie przy mniejszych ΔT . Biorąc za przykład instalację PC o współczynniku doskonałości 0,5 w stosunku do idealnego obiegu Carnot'a, wartość współczynnika efektywności COP wynosi 3,8 przy ΔT 40 K, 4,5 przy ΔT 35 K, 5,1 przy ΔT 30 K, 5,8 przy ΔT 25 K, 7,4 przy ΔT 20 K (Lachman 2012). Stosując tę zasadę

w praktyce projektowania systemów ogrzewania opartych na GPC, obniża się w miarę możliwości poziom temperatury górnego źródła ciepła, co prowadzi do wykorzystania technologii ogrzewania podłogowego jako rozwiązania najbardziej optymalnego. Odnośnie do ww. temperatur dolnych źródeł ciepła wykorzystanych w termogeologii na Niżu Polskim, można oszacować optymalną temperaturę górnych źródeł ciepła w granicach 38–39,5°C przy COP 5,1 jako wskaźnik potencjału termogeologicznego.

W krajach zachodnich Europy termogeologia zaczęła się rozwijać już w latach 1970–1980. We Francji, technika ta znalazła szerokie zastosowania w ogrzewaniu indywidualnym szczególnie w Alzacji, gdzie powszechnie występująca bardzo płytka warstwa wodonośna w aluwiach doliny Renu tworzy idealne podłoże i warunki do instalacji GPC typu *open loop*. Technologia ta znalazła również zastosowania w instalacji GPC o średniej i dużej mocy. Gourmez i Lemale (2008) podkreślili nieporównywalnie niższe koszty robót geologicznych potrzebnych do montażu tych instalacji w porównaniu z innego rodzaju instalacjami GPC – typu *closed loop*, opartymi na zamkniętych wymiennikach ciepła. Z upływem czasu, instalacje pierwszego typu okazały się jednak często zawodne. Problemy pojawiały się najczęściej ze strony otworów zrzutowych, które były coraz mniej wydajne na skutek kolmatacji, zamulenia lub/i strącania związków chemicznych w urządzeniach filtracyjnych. W Polsce Kapuściński i Rodzoch (2010) zwrócili również uwagę na utrudnienia administracyjne, które mogą napotkać inwestorzy skłonni wybrać tę opcję, z uwagi na restrykcyjne przepisy prawa wodnego. Z tych dwóch głównych powodów wcześniej wspomniany, alternatywny typ instalacji GPC *closed loop* stał się coraz bardziej konkurencyjny, a opcja GPC obiegu otwartego straciła na popularności. Na Niżu Polskim, gdzie tło hydrochemiczne płytkich wód podziemnych cechuje się wysokimi stężeniami związków żelaza i manganu, instalatorzy zalecają montaż GPC obiegu zamkniętego. Biorąc pod uwagę dużą różnicę kosztów między tymi dwoma metodami na etapie inwestycji i późniejszej eksploatacji oraz zdecydowanie wyższą efektywność energetyczną obiegu GPC *open loop* w porównaniu z obiegiem *closed loop* (Gourmez i Lemale 2008), systematyczne wykorzystanie drugiej metody w Polsce znacząco wpływa na strukturę rynku branży na niekorzyść instalacji GPC średniej i dużej mocy, co z pewnością hamuje rozwój termogeologii.

2. ASPEKTY METODOLOGICZNE OBLICZENIA TERMICZNEGO POTENCJAŁU ZIEMI

W geotermii *sensu stricto* istnieją metodyki obliczenia zasobów energii eksploatacyjnych na skalę regionalną, jak na przykład metodyka wskaźnikowa zaproponowana przez Katedrę Surowców Energetycznych AGH (Hajto 2014). Zastosowano w niej bezwymiarowy współczynnik zwany współczynnikiem mocy F, który można rozumieć jako wskaźnik efektywności ekonomicznej ujęcia geotermalnego. Główna zaleta tej metodyki polega na uwzględnieniu nie tylko kosztów eksploatacji instalacji geotermalnych, ale również niezbędnych nakładów kapitałowych związanych z udostępnieniem zbiorników hydrotermalnych. Stosowany w tym celu średni roczny współczynnik obciążenia ujęcia LF daje pod tym ką-

tem cenną informację. Wykorzystując ten wskaźnik przy obliczaniu współczynnika F, można ocenić dosyć precyzyjnie ryzyko ekonomiczne każdej inwestycji geotermalnej. Metodyka nie była dotychczas powszechnie stosowana. Z tego powodu, metody pozyskiwania ciepła Ziemi i metody oceny potencjału energetycznego na danym obszarze są nadal rozpatrywane oddzielnie.

Stosowane w termogeologii metody oceny potencjału danego obszaru opierają się na tzw. geotypach termicznych w rozumieniu sukcesji w profilu pionowym gruntów o kreślonych, typowych właściwościach termicznych. W ten sposób oceniono przypowierzchniowy potencjał termiczny wielu regionów w Europie, m.in. w Szwajcarii, na przykładzie kantonu de Vaud (Wilhelm i in. 2003). W Polsce testowano metodę geotypów przy ocenie potencjału termicznego fragmentu Pojezierza Kaszubskiego (Kubski i Lemoine 2011), gdzie zinventaryzowano kilkanaście profili, w oparciu o pięć głównych kategorii skał spotykanych w profilach geologicznych do głębokości około 100 m p.p.t. W ramach pilotażowego projektu badawczego TransGeoTherm (www.transgeoterm.eu) opracowano również pierwszą serię dwunastu map potencjału termicznego dla płytkiej geotermii niskotemperaturowej. W tym transgranicznym projekcie dotyczącym regionu Nysy Łużyckiej, zrealizowanym w ramach Programu Operacyjnego Współpracy Transgranicznej Polska – Saksonia 2007–2013, wykonano trójwymiarowy model podłoża skalnego opierając się na wydzielonych jednostkach hydrogeologiczno-geotermicznych HGE występujących w podłożu do głębokości około 340 m p.p.t. (Podręcznik 2014).

Przedstawione wyżej metody nie pozwalają jednak automatycznie ocenić wydajności ekonomicznej pozyskiwania ciepła z Ziemi w stosunku do kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych różnych rodzajów instalacji GPC. Z tego powodu rynek termogeologii i GPC jest w tej chwili w Polsce mało rozwinięty. Obejmuje przede wszystkim instalacje GPC małej mocy grzewczej, dla których ryzyko ekonomiczne jest niewielkie i raczej znane – oparte na doświadczeniach kilku tysięcy nowych instalacji rocznie. Są to przeważnie przydomowe instalacje GPC typu *closed loop* (solanka-woda). Korzystanie z podręczników specjalistycznych poświęconych tej tematyce pod hasłem „geotermia niskotemperaturowa” (Kapuściński i Rodzoch 2010; Kłonowski i Kozdrój 2014) pozwala projektantom i instalatorom ocenić to ryzyko i zapewnić użytkownikom optymalne rozwiązania techniczne w danych warunkach naturalnych.

3. UWARUNKOWANIA WYKORZYSTANIA CIEPŁA ZIEMI NA POJEZIERZU KASZUBSKIM

3.1. Potencjalna specjalizacja turystyczna w perspektywie najbliższych dziesięcioleci

Zmiany gospodarcze wynikające z wejścia Polski do Unii Europejskiej zachęcają gminy wiejskie położone na obszarach pojezierzy do dywersyfikacji ich gospodarki, zważywszy na to, że obszary te wykazują warunki niezbyt korzystne dla rolnictwa. Wśród działań gospo-

darczych na wsi turystyka jest bardzo zalecana z uwagi na wysoką wartość krajobrazową, różnorodność biologiczną i zasoby dziedzictwa kulturowego. W przypadku Pojezierza Kaszubskiego, utworzony w roku 1983 Kaszubski Park Krajobrazowy wzmocnił rozwój turystyki wykorzystującej wyżej wspomniane atuty.

Turystyka krajoznawcza, bazująca na ośrodkach typu spa, byłaby jeszcze najbardziej pożądana z uwagi na to, że pozwalałby na przedłużenie działalności poza sezon letni. Powiązane z taką dywersyfikacją gospodarczą potrzeby energetyczne mogą być wstępnie szacowane zgodnie z sugerowanym tu rozproszonym wzorem rozwoju turystyki krajoznawczej, zdrowotnej i rekreacyjno-wodnej. Projektowane w tym kontekście nowe instalacje grzewcze byłyby instalacjami o średniej wielkości z maksymalną znamionową mocą około 1 MWth.

3.2. Uwarunkowania geotermiczne

Pojezierze Kaszubskie jako teren o głębokim podłożu zbudowanym ze skał platformy prekambryjskiej należy do stref chłodnych (Szewczyk 2010). Według map zasobów geotermalnych Niżu Polskiego średnie temperatury panujące na głębokościach 1000, 2000, 3000, 4000 i 5000 m p.p.t. wynoszą kolejno 23–25°C (Górecki i in. 2006a), 43–50°C (Górecki i in. 2006a; Szewczyk 2010), 75–79°C (Górecki i in. 2006a), 98–102°C i 123–127°C (Górecki i in. 2006b). Gradient geotermiczny odpowiadający temu rozkładowi temperatur wynosi średnio 24 K/km. Będący wyraźnie poniżej średniej wartości w Europie – tj. około 30 K/km – gradient odzwierciedla umiarkowaną gęstość ziemskiego strumienia ciepłego (HFD): $58,5 \pm 1,5$ mW/m² (Szewczyk i Gientka 2009). Należy tu doprecyzować, że modelowane tu wartości HFD dla rejonu Pojezierza Kaszubskiego nie są wysokie i mieszczą się w górnych wartościach w skali makroregionalnej pojezierzy Polski północnej (Pojezierza Pomorskie i Mazurskie razem), gdzie HFD waha się w granicach ok. 40–65 W/m² (Szewczyk i Gientka 2009).

Pojezierze Kaszubskie nie jest więc strefą ogólnie korzystną dla zastosowań głębokiej geotermii, co można wytłumaczyć m.in.:

- powolnym procesem wypełnienia Syneklizy Perybaltyckiej mięszymi formacjami osadowymi i brakiem konsekwentnego zaangażowania tektonicznego,
- osadzeniem pokrywy czwartorzędowej o ponadstumetrowej miąższości (Szewczyk 2005).

Pierwszy proces skutkował obniżeniem i zanurzeniem się ku południowemu zachodowi paleo- i proterozoicznego podłoża krystalicznego, które sięga około 4250 ± 250 m p.p.t. na terenie Pojezierza Kaszubskiego (3485 m p.p.t. w otworze Gdańsk IG-1, 4499 m p.p.t. w otw. Kościerzyna IG-1, Witkowski 1989). Proces ten uniemożliwił wystąpienie anomalii termicznych, będących w stanie zasilać głębokie krążenie wód termalnych. Drugi proces spowodował zagłębienie izoterm 10°C i 20°C o co najmniej 100 m w porównaniu do otaczających terenów.

3.3. Warunki hydrogeotermalne

Przedstawione wyżej warunki geologiczne i geotermiczne – szczególnie brak możliwości wystąpienia anomalii termicznych – sprawiają, że w profilach analizowanego terenu zmiany temperatury wraz z głębokością są ukształtowane prawie wyłącznie przez pionowe gradienty termiczne. Gradienty te są wywołane przez:

- wspomniany wyżej ziemski strumień ciepły, który kształtuje temperaturę skał podłoża aż do spągu strefy zaburzeń paleoklimatycznych – spąg ten sięga głębokości 2000–3000 m p.p.t. na Niżu Polskim (Szewczyk 2005),
- sumaryczny wpływ zmian klimatu na powierzchni Ziemi w czasie geologicznym, a szczególnie:
 - wychłodzenie terenu wywołane przez zlodowacenia plejstoceny, które trwały około 1,5 mln lat,
 - ocieplenie holoceny, które trwało około 14 300 lat (w tym tzw. antropocen, który rozpoczął się 200 lat temu: Crutzen i Stoermer 2000),

Wymienione warunki paleoklimatyczne miały największy wpływ na termostruktury Ziemi w tym regionie Europy aż do czasów współczesnych. Według Szewczyka (2005, 2002), ślady plejstoceny zaburzenia paleoklimatycznego są nadal wyraźne lub nawet nienaruszone od epoki zlodowacenia Wisły poniżej głębokości od 2000 do 3000 m, a wpływ ocieplenia holoceny sięga obecnie do głębokości 1500–2000 m.

Z powyższych uwarunkowań wynika również, że dla miejscowości Pojezierza Kaszubskiego temperatura wód podziemnych i temperatura skał osadowych występujących na tych samych głębokościach są bardzo zbliżone.

3.4. Perspektywy wykorzystania ciepła z wód podziemnych metodami konwencjonalnymi

Bujakowski (2005) odróżnia dwie konwencjonalne użytkowe kategorie geotermiczne w zależności od zakresu temperatury wykorzystanych nośników ciepła. Od najwyższego do najniższego poziomu temperatury są to:

- > 100°C, nośniki wykorzystane pośrednio do produkcji energii elektrycznej,
- < 100°C, nośniki wykorzystane bezpośrednio do produkcji energii cieplnej.

Z zaprezentowanych wcześniej warunków geotermicznych wynika, że w obrębie Pojezierza Kaszubskiego geotermalne nośniki ciepła należące do pierwszej kategorii użytkowej występują na głębokości co najmniej 4000 m p.p.t. Według atlasu zasobów geotermalnych formacji paleozoicznych na Niżu Polskim (Górecki i in. 2006b) jedynym zbiornikiem hydrogeotermalnym rozpoznanym w tym terenie poniżej tej głębokości jest kambryjski kompleks piaskowo-mułkowcowo-ilasty. W rejonie Chmielna strop tego kompleksu o miąższości około 600 m zalega na głębokości około 4170±10 m p.p.t. Mimo odpowiednich parametrów termicznych – temperatura od 110°C na stropie do 135°C w spągu – ta formacja nie jest perspektywiczna ani dla głębokiej geotermii konwencjonalnej, ani dla głębokiej geotermii

niekonwencjonalnej – *Enhanced Geothermal System* (EGS) lub *Hot Dry Rock* (HDR), z trzech powodów. Po pierwsze, poziomy piaskowcowe formacji ulegały już zaawansowanej silifikacji pod wpływem wysokich temperatur, co skutkowało drastycznym zredukowaniem ich właściwości zbiornikowych (Sikorska, Paczeńska 1997; w Górecki 2006b). Po drugie, wysoka mineralizacja solanek prawie uniemożliwia wydobycie tych nośników ciepła w warunkach ekonomicznie opłacalnych. Po trzecie, poprawienie właściwości zbiornikowych rozpatrywanej formacji niekonwencjonalnymi metodami typu szczelinowania hydraulicznego nie może znaleźć tu uzasadnienia ekonomicznego, ze względu na gigantyczne koszty tych zabiegów w stosunku do poziomu energetycznego nośników ciepła.

Wśród geotermalnych nośników ciepła należących do drugiej kategorii użytkowej, Bujakowski (op.cit) wyróżnił trzy użytkowe poziomy energetyczne. Od najwyższego do najniższego są to:

- 60–100°C – płyny średnotemperaturowe (wykorzystywane bezpośrednio u odbiorcy),
- 25–60°C – płyny niskotemperaturowe (wykorzystywane w absorpcyjnych pompach ciepła AHP),
- < 25°C płyny zimne (wykorzystywane jako woda lub ciecze specjalne w sprężarkowych pompach ciepła CHP).

W wodach podziemnych występujących na terenie Pojezierza Kaszubskiego spotyka się tylko ostatni z wymienionych poziomów energetycznych obejmujący płyny zimne. Hydrogeotermalne nośniki ciepła należące do tego poziomu opisano w tabeli 1, na podstawie danych z atlasu zasobów geotermalnych (Górecki i in 2006a) i danych dwóch innych autorów (Jaworska-Szulc 2006; Gancarz 2015) oraz danych dostępnych w geoportalu Państwowej Służby Hydrogeologicznej (PSH). Orientacyjną głębokość i temperaturę tych zbiorników oszacowano odnosząc się do obszaru gminy Chmielno i wysokości bezwzględnej 170±10 m. Z analizy tabeli 1 można wyciągnąć następujące wnioski:

Zbiornik triasu dolnego jest przeważnie zbudowany z mało przepuszczalnych mułowców i mułowców iłowcowych z formacji bałtyckiej (Szyperko-Śliwczyńska 1979), cechuje się niską wodonością i ograniczoną przewodnością hydrauliczną. W poziomach wodonośnych skupionych w górnej części profilu występują solanki hipotermalne o temperaturze około 23,5°C i umiarkowanej mineralizacji – około 50 g/dm³. Mimo dopuszczalnej potencjalnej wydajności studni – około 50 m³/h w układzie dubletowym geotermalnym, rozpatrywana północna facja zbiornikowa triasu dolnego nie kwalifikuje się do eksploatacji geotermalnej z uwagi na współczynnik mocy poniżej 0,25 przy współczynniku obciążenia 1. Wyżej wspomniane solanki jako złoża mogą ewentualnie znaleźć zastosowanie w branży spa. Należy tu zwrócić uwagę, że facja bromowa tych wód jest ogólnie mało korzystna, nawet dla ewentualnego wykorzystania wód w balneorekreacji.

Zbiornik triasu środkowego wykazuje tu cechy litologiczne północnej facji brzeżnej wapienia muszlowego. Oprócz stosunkowo niedużej miąższości serii tego wieku – zaledwie 30 m, facja ta wyraża się znacznym udziałem materiału klastycznego z obecnością po-

ziomów wapienno-piaskowcowych w formacjach dolomitowych, marglisto-dolomitowych. Z uwagi na niskie właściwości zbiornikowe i temperaturę wód poniżej 25°C warstwa wodonośna tego systemu nie jest zaliczona do geotermalnych zasobów eksploatacyjnych. Nie wyklucza się jednak wykorzystania tych wód do celów rekreacyjnych i balneologicznych w przyszłości.

Zbiornik jury środkowej w rozpatrywanej północnej strefie brzegowej basenu wykazuje typowe facje płytkomorskie zdominowane przez piaskowce mułowce z heterolitami, z łupkowatymi ilowcami na spągu. Brak zaangażowania tektonicznego wynikający z oddalenia strefy TTZ drastycznie ogranicza przepuszczalność hydrauliczną tych skał, która średnio wynosi około 0,1–0,3 mD. W sumie potencjalna wydajność studni w układzie typu dubletu hydrogeotermalnego jest tu za niska – według wyżej wspomnianego atlasu wynosi zaledwie 12–13 m³/h. W tych warunkach wykorzystanie zbiornika w celach ciepłowniczych nie byłoby ekonomicznie uzasadnione. Potwierdza to wartość współczynnika mocy poniżej 0,25 przy współczynniku obciążenia 1. Profil chlorkowy solanki tej formacji, jak również jej temperatura lekko powyżej 20°C, mogą stanowić zachętę do jej zastosowania w balneologii rekreacyjnej.

Zbiornik jury górnej budują margle, ilowce, mułowce i piaskowce oraz występujące tylko w oksfordzie utwory węglanowe. Skały te należą do epikontynentalnych środowisk facjalnych stref brzeżnych i są zdominowane przez materiał klastyczny, podobnie jak utwory spotykane w basenie jury środkowej. Oba zbiorniki jurajskie są też podobne pod względem geometrii i właściwości hydraulicznych. Jak podano wcześniej, właściwości te oraz stosunkowo niska temperatura występujących w nich solanek (ok. 15°C), uniemożliwiają opłacalne zagospodarowanie zbiornika w celach ciepłowniczych.

Zbiornik górnokredowy w analizowanej strefie Wysoczyzny Kaszubskiej wykazuje przejściową fację od zachodnich formacji węglanowych do wschodnich formacji piaszczysto-glaukonitowych. Występujące w nim wody integrują cechy hydrochemiczne z V-Pomorskiego i IV-Kredowego gdańskich regionów hydrogeologicznych (Paczyński, w: Malinowski red. 1976), które należą do hydrogeologicznego regionu wschodniopomorskiego (Paczyński, Sadurski 2007). Osiągają temperaturę zaledwie 12°C na stropie, który zalega na głębokości około 350 metrów. Warstwa wodonośna jest napięta, na wysokości piezometrycznej 20 m poniżej poziomu tafli jezior. Jej parametry hydrauliczne są mało korzystne, szczególnie w stosunku do subniecki gdańskiej (Główny Zbiornik Wód Podziemnych nr 111), która rozciąga się na zachód m.in. pod Trójmiastem. Aby to sprecyzować oszacowano parametry pojedynczej studni niepełnej. Wydajność teoretyczną i zasięg promienia leja depresji studni pełnej obliczono kolejno według wzór Dupuita i wzór Sichardta w przypadku wód napiętych. Jako podstawę obliczenia przyjęto :

— trzy poziomy użytkowej mocy grzewczej: 250, 500 i 750 kW, teoretycznie osiągalne instalacjami GPC typu *open loop* przy wydajności studni kolejno 35, 70 i 105 m³/h,

- najniższą, najwyższą i pośrednią wartość współczynników filtracji – są to $5 \cdot 10^{-6}$, $5 \cdot 10^{-5}$, i $2,75 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; odpowiadające kolejno formacjom węglanowym, piaszczysto-glaukonitowym i heterolitom,
- trzy stopnie zafiltrowania warstwy wodonośnej: 25, 50 i 75%, odpowiadające długości zafiltrowanego odcinka studni: 17,5, 35,0 i 52,5 m.

Z obliczeń wynika m.in. że:

- przy minimalnych współczynnikach filtracji, nawet przy depresji lustra wody o wartości do 25 m, wydajność ujęcia sięgałaby tylko około $30 \text{ m}^3/\text{h}$, tzn. $5 \text{ m}^3/\text{h}$ poniżej progu wydajności potrzebnej do instalacji GPC o mocy grzewczej około 250 kW;
- przy maksymalnych wartościach spodziewanych współczynników filtracji i stopnia zafiltrowania warstwy wodonośnej 25% ($L = 17,5 \text{ m}$) można teoretycznie utrzymać wydajność w zakresie $35\text{--}70 \text{ m}^3/\text{h}$. W tym trybie ujmowania warstwy wodonośnej, depresja lustra wody mieści się w granicach 4–10 m, a jej promień w zakresie około 84–212 m. Uzyskana wydajność uzyskana pozwalałaby zasilać instalacje GPC o mocy grzewczej rzędu od 250 do 500 kW;
- przy pośrednich wartościach spodziewanych współczynników filtracji i stopniu zafiltrowania warstwy wodonośnej 50% ($L = 35 \text{ m}$) można teoretycznie utrzymać wydajność w zakresie $35\text{--}70 \text{ m}^3$. W tym trybie ujmowania warstwy wodonośnej, depresja mieści się w granicach 6–14 m, a jej promień w zakresie około 85–200 m. Otrzymana wydajność pozwalałaby zasilać instalacje GPC o mocy grzewczej rzędu od 250 do 500 kW.

Ze wstępnej oceny wyników można wnioskować, że klasyczne studzienne instalacje GPC typu *open loop* nie znajdują tu ekonomicznie opłacalnych zastosowań. O tym decyduje nie tyle poziom temperatury wód, ale przede wszystkim słabe współczynniki filtracji spotykanych formacji kredowych. Z tego ostatniego powodu, magazynowanie ciepła Ziemi – *Aquifer Thermal Energy Storage* (ATES) jest tu również perspektywą mało realną.

Zbiornik oligoceńsko-eoceński analizowanego terenu jest zbudowany z piasków glaukonitowych należących przeważnie do kategorii średnio przepuszczalnych. W porównaniu z górnokredowym piętrzem wodonośnym zbiornik ten wykazuje lepsze parametry filtracyjne, jest ponadto bardziej subartezyjski. Nie wykazuje jednak znaczącego potencjału energetycznego, biorąc pod uwagę następujące parametry:

- temperaturę wód występujących w zbiorniku, która jest zbliżona do temperatury płytkich wód podziemnych,
- wydajność eksploatacyjną, która jest prawdopodobnie zbyt niska zważywszy na to, że kilkudziesięciometrowa miąższość warstwy wodonośnej jest raczej mała w stosunku do ponad dwustumetrowej głębokości zalegania miąższości nadkładu.

Wstępne obliczenie potencjału wskazuje, że można teoretycznie utrzymać średnią wydajność w zakresie $17,5\text{--}30 \text{ m}^3/\text{h}$ przy stopniu zafiltrowania warstwy wodonośnej 50% ($L = 10 \text{ m}$) W tym trybie ujmowania warstwy wodonośnej, depresja lustra wody mieści się w granicach 3,5–8,25 m, a jej promień w zakresie około 100–190 m. Wydajność uzyska-

na nie pozwalałyby zasilać instalacji GPC o mocy grzewczej wyższej niż 250 kW. W tych warunkach, wykorzystanie wód tego zbiornika wyłącznie w celach grzewczych za pomocą instalacji GPC nie byłoby opłacalne, również z wykorzystaniem metody ATES.

Mioceński poziom wodonośny cechuje się wysokim zróżnicowaniem strukturalnym. Charakterystyka ta jest skutkiem skomplikowanej glacitektoniki i plejstoceńskiej hydrodynamiki subglacialnej, co objawia się wysokim stopniem nierówności stropu neogenu w tym Pojezierzu (Petelski, Prussac 2001). Ponadto poziom ten jest hydraulicznie silnie powiązany z dolnoczwartorzędowym poziomem, tworząc z nim jednolitą warstwę wodonośną (Bralczyk, Jankowski, Kwaternikiewicz 1997; w: Jaworska-Szulc 2006). Kontakt pomiędzy wodami podziemnymi w utworach mioceńskich i dolnoczwartorzędowych zachodzi w pobliżu stref drenażu, będących liniowymi obniżeniami stropu neogenu o osi od NNE-SSE do ENE-WSW, które utworowały rynny strukturalne (w rozumieniu Jańczaka i Gołębiowskiego 2007), w tym rynnę jezior Raduńskich, jako największą formę analizowanego terenu. Z powyższego wynika, że miąższość poziomu jest bardzo zmienna. Wynosząca średnio 20 m w obrębie stref wysoczyzno-morenowych, ulega wysokiej zmienności w pobliżu wyżej wspomnianych stref drenażu, gdzie gradienty hydrauliczne są prawdopodobnie stosunkowo wysokie. Poza strefami kontaktu z wodami czwartorzędowego piętra wodonośnego, mioceński poziom wodonośny wykazuje parametry zbliżone do tych spotykanych w zbiorniku oligoceńsko-eoceńskim. Dotyczy to miąższości, typu matrycy skalnej, współczynników filtracji i nawet poziomu temperatury. W odróżnieniu od zbiornika oligoceńsko-eoceńskiego, który zalega na głębokości ponad 200 m p.p.t., mioceński poziom wodonośny przy głębokości stropu około 150 m p.p.t. jest wyraźnie płytszy, a więc – bardziej dostępny. Z uwagi na potencjalną wydajność pojedynczej studni rzędu kilkudziesięciu m³/h, ewentualne wykorzystanie tego poziomu wodonośnego w celu energetycznym za pomocą konwencjonalnych instalacji GPC nie może znaleźć uzasadnienia ekonomicznego. Nie można jednak w tym przypadku wykluczyć opcji niekonwencjonalizowanych metod wykorzystania energii Ziemi typu ATES, szczególnie dla produkcji chłodu przemysłowego z uwagi na bardzo niski wejściowy poziom temperatury.

Czwartorzędowe piętro wodonośne wykazuje najwyższą przydatność do komercyjnej eksploatacji energetycznej, szczególnie z uwagi na dostępność, dobre parametry geometryczne jak również hydrauliczne jego poziomów wodonośnych. W przypadku gminy Chmielno potencjał energetyczny wód tego piętra został wstępnie obliczony przez autora niniejszej publikacji (Lemoine 2014) – na bazie analizy arkuszy Kartuzy (0025) i Egiertowo (0053) Mapy hydrogeologicznej Polski w skali 1:50 000 (Kozerski i in. 2000; Lidzbarski i in. 2000). Jako wskaźnik potencjału energetycznego autor odnosił się do mocy grzewczej pojedynczej instalacji wyżej wspomnianego typu *open loop* w konfiguracji dolnego i górnego źródła ciepła W10/W45 przy umiarkowanym współczynniku efektywności 4. Obliczony w ten sposób potencjał energetyczny mieści się w granicach 200–475 kW_{th} i może pokryć np. zapotrzebowanie na ciepło dużych obiektów hotelarskich wyposażonych w baseny

kąpielowe. Należy tu zwrócić uwagę, że termy uzdrowiska Cieplice Śląskie wykorzystują wody homeotermalne o temperaturze w zakresie 36–39°C przy wydajności ujęć 27 m³/h, mające średnią moc geotermalną znamionową około 300 kWth. (Kępińska 2011). Wykorzystanie zimnych wód czwartorzędowych analizowanego pojezierza jako nośników ciepła na potrzeby zakładów spa jest więc technicznie możliwe pod warunkiem odpowiedniej lokalizacji tych inwestycji.

Z kompleksowej genezy plejstocenijskiej Pojezierza Kaszubskiego wynika wysoka zmienność i nierównomierne rozmieszczenie potencjału energetycznego rozpatrywanych tu płytkich wód w utworach czwartorzędowych. W przypadku gminy Chmielno, potencjał jest skoncentrowany w tarasach nadjeziornych, na głębokości ujmowania wód podziemnych w zakresie 5–30 m p.p.t.. Obszary spełniające te warunki to:

- Obniżenie Chmielińskie jako hipotetyczne zapadlisko głacitektoniczne zajęte przez zespół jezior Rekowo-Białe-Kłodno, a szczególnie zachodni brzeg ostatniego jeziora pod południową strefą krawędziową Wysoczyzny Chmielińskiej.
- Okolice jezior Łączyńskiego i Nierzostowo, przy wschodniej strefie krawędziowej Wysoczyzny Reskowsko-Borzestowskiej nad Rynną jeziora Raduńskiego Dolnego.
- Okolice jeziora Reskowskiego .

4. PERSPEKTYWY ENERGETYCZNEGO ZAGOSPODAROWANIA WÓD PODZIEMNYCH METODĄ UTES

4.1. Zakres temperatury pracy instalacji w analizowanym mezoregionie

Jak podano wcześniej, metody EGS lub HDR głębokiej geotermii niekonwencjonalnej nie mogą znaleźć ekonomicznego zastosowania w analizowanej strefie Niżu Polskiego. Warte rozważenia są natomiast inne niekonwencjonalne technologie, jak metody UTES (*Underground Thermal Energy Storage*) lub podziemne magazynowanie ciepła, które rozwijają się w szybkim tempie w Europie Północno-Zachodniej, zwłaszcza w Niemczech, Holandii i Szwecji. Do tej grupy zaliczone są dwie kategorie instalacji:

- ATES (*Aquifer Thermal Energy Storage*), pracujące w układzie hydraulicznym otwartym,
- BTES (*Borehole Thermal Energy Storage*), pracujące w układzie zamkniętym poprzez gruntowe wymienniki ciepła.

Z uwagi na wysokie koszty inwestycyjne, rynek technologii UTES jest skupiony na instalacjach o średniej lub dużej mocy grzewczej. Zakładając, że w regionach zasobnych w wody podziemne technologia ATES jest bardziej konkurencyjna niż technologia BTES, właśnie w odniesieniu do wyżej wspomnianych mocy cieplnych można uznać tereny pojezierzy jako szczególnie perspektywiczne do magazynowania ciepła w Ziemi metodą ATES. Zatem podatność terenów Pojezierza Kaszubskiego do inwestycji UTES będzie tu oszacowana w odniesieniu do kategorii ATES.

Tabela 1

Podziemne zbiornikowe nośniki ciepła rozpoznane na Pojezierzu Kaszubskim na przykładzie gminy Chmielno

Table 1

Underground low enthalpy and thermal reservoirs recognized in the Kashubian Lake District on the example of the Chmielno commune

Referencyjny poziom wodonośny	Litologia matrycy skalnej	↓ p.p.t. [m] (□) (●)	THK [m]	k_f [m/s]	T_{st} [°C]
1	2	3	4	5	6
1 Górný poziom czwartorzędowego piętra wodonośnego	1 Piaski i żwiry sandrowe lub między-morenowe	10±2 (●)	25–35 (maks. 40) (◆)	1.4·10 ⁻⁴ (■)	8,00±0,25 (●)
2 Dolny poziom czwartorzędowego piętra wodonośnego	2 Piaski i żwiry między-morenowe	70±5 (●)	35–45 (maks. 80) (◆)	1.4·10 ⁻⁴ –4,2·10 ⁻⁴ (■)	8,50±0,25 (□)
3 Mioceniński poziom wodonośny	3 Piaski drobnoziarniste	150±5 (●)	15–25 (◆)	1·10 ⁻⁵ –1·10 ⁻⁴ (■)	9,25±0,25 (□)
4 Oligo-eoceński poziom wodonośny	4 Drobno- i średnioziarniste piaski glaukonitowe	230±10 (●)	15–25 (◆)	8·10 ⁻⁶ –1,5·10 ⁻⁴ (■)	10,25±0,25 (□)
5 Górný-kredowe piętro wodonośne	5 Drobne piaski glaukonitowe, gezy piaszczyste, gezy wapniste	350±10 (●)	65–75 (◆)(□)	5·10 ⁻⁶ –5·10 ⁻⁵ (■)(□)	11,75±0,25 (□)
6 Zbiornik jury górnej	6 Łupki ilaste, mulowce margliste, piaskowce	710±20 (●)	50 (/50) (●)	1·10 ⁻⁶ –2·10 ⁻⁶ (●)	15,00 (●)
7 Zbiornik jury środkowej	7 Osady piaskowcowe, heterolity, mulkowce	760±20 (●)	40 (/40) (●)	1·10 ⁻⁶ –3·10 ⁻⁶ (●)(□)	21,00 (●)
8 Zbiornik triasu środkowego (wapień muszlowy)	8 Utwory piaskowcowe, ilowcowe dolomitowe i margliste z wapienia muszlowego	800±30 (●)	20 (/50) (●)	średnio ok. 1·10 ⁻⁶ (przepuszcz. 0.1 mD : ▲)	22,00 (●)
9 Zbiornik triasu dolnego (pszy piaskowce)	9 Piaskowce w obrębie kompleksu piaskowcowo-mulkowcowo-łowcowym	850±30 (●)	120 (/400) (●)	1·10 ⁻⁶ –3·10 ⁻⁶ (●)	23,50 (●)

↓ p.p.t. – głębokość stropu [m p.p.t.]; k_f – współczynnik filtracji; THK – miąższość średnia (maks.), ●–◆ (**): miąższość sumaryczna warstw wodonośnych (całkowita miąższość formacji np. 20 (/50); T_{st} – temperatura w stropie.

Źródła danych: □ Obliczenia lub szacunki własne, m.in. na podstawie danych z Atlasu Zasobów Geotermalnych Formacji Mezozoicznej na Niziu Polskim, pod redakcją Wojciecha Góreckiego, Kraków 2006; ▲ Gancarz 2015; ■ Jaworska-Szulc 2006; ● Górecki 2006a; ◆ PSH - JCWPd: 13.

- W odniesieniu do poziomu energetycznego magazynowanej energii wyróżnia się (Lee 2013):
- LT-ATES (*Low Temperature Aquifer Thermal Energy Storage*) do magazynowania wody o temperaturze w przedziale $0-45\pm 15^{\circ}\text{C}$ – zastosowania tej podkategorii obejmują nie tylko ogrzewanie, ale również chłodzenie pomieszczeń z możliwością zmiany trybu chłodzenia-ogrzewania za pomocą pomp ciepła w zależności od sezonowych zapotrzebowań na energię cieplną.
 - HT-ATES (*High Temperature Aquifer Thermal Energy Storage*) do magazynowania wody o temperaturze powyżej około 60°C – zastosowania tej podkategorii obejmują tylko ogrzewanie.

Niska przepuszczalność formacji wodonośnych występujących poniżej spągu miocenu (współczynniki filtracji poniżej 10^{-5} m/s, zob. tab. 1) wyraźnie utrudnia magazynowanie wody. Ponadto, warstwy wodonośne mioceńskie i czwartorzędowe należą do strefy wód użytkowych, w której temperatura stymulacji cieplnej warstwy nie powinna ogólnie przekraczać 30°C lub nawet 25°C według wielu autorów. Wysokotemperaturowa technologia UTES nie może więc być zastosowana w rejonie Pojezierza Kaszubskiego. Z tego względu potencjał energetyczny związany technologią ATES w tym terenie został analizowany tylko w kategorii niskotemperaturowej (LT-ATES).

Wielowarstwowe piętra wodonośne z obszarów młodoglacjalnych cechują się wysoką zmiennością litofacjalną, jak również wysoką złożonością systemu krążenia wód podziemnych. W płytkich partiach wodonośnych tych systemów prędkość i kierunek wód podziemnych kształtują się w obrębie lokalnych reżimów hydrogeologicznych. Odbiegają przy tym od regionalnej zmienności właściwości hydrodynamicznych: prędkości i kierunku przepływu wód ku głównym strefom drenażu – Zatoce Gdańskiej i Morzu Bałtyckiemu. W tych warunkach parametry zbiornikowe płytkich poziomów wodonośnych i prędkość przepływających w nich wód podziemnych charakteryzują się wysoką zmiennością przestrzenną. Nawet wewnątrz granic poszczególnych jednostek geomorfologicznych występujących na skalę obrębu geodezyjnego zmienność może być bardzo wysoka. Dotyczy to szczególnie stref krawędziowych wysoczyzn morenowych.

Podsumowując, szczegółowa analiza przydatności danego obszaru do lokalizacji inwestycji typu LT-ATES na terenie Pojezierza Kaszubskiego może być ekonomicznie uzasadniona tylko na skalę miejscowości w strefach potencjalnie perspektywicznych.

4.2. Metoda stosowana przy ocenie potencjału energetycznego

Przy wstępnej ocenie potencjału energetycznego LT-ATES płytkich warstw wodonośnych analizowanego Pojezierza posłużono się metodyką opartą na tłokowym modelu stymulacji termicznej (pole 2 w arkuszu 1), opracowaną przez Ausseur'a i Sauty'ego z francuskiej służby geologicznej – Bureau de Recherches Géologiques et Minières, BRGM (Ausseur, Sauty 1982). Zakładając jako wyjściową hipotezę hydrogeologiczną o możliwości wystąpienia stref o płytkich wodach podziemnych prawie stagnujących lub mało mobilnych w analizowanym terenie wybrano do niniejszej symulacji systemu LT-ATES wzór „studnia

ciepła–studnia zimna” zgodnie z zaleceniami tych autorów. W tej konfiguracji każda studnia ma stałe pole cieplne (ciepłe lub zimne) i pracuje w trybie okresowego przepływu przemien- nego. W odróżnieniu od układu typu dublet geotermalny, rozważany tu system sprawia, że oba podziemne magazyny są oddzielnie zagospodarowane energetycznie. Zasilanie takiego systemu w trybie letnim opiera się na energii słonecznej jako głównym źródle odnawialnym energii cieplnej (plansza 1, pole 2). Wykonana za pomocą arkusza kalkulacyjnego symulacja funkcjonowania systemu obejmuje siedem pierwszych lat eksploatacji, a więc siedem rocz- nych cykli hydraulicznych podzielonych każdy na dwie półroczne fazy: iniekcji i pompo- wania eksploatacyjnego. W hipotezie nieprzerwanej pracy instalacji urządzenia hydrauliczne powinny być zaprojektowane w układach wielootworowych.

Przy ustalaniu podatności strefy do lokalizowania magazynów LT-ATES, oprócz wyżej wspomnianej niskiej prędkości wód podziemnych jako podstawy, założono, że muszą być spełnione wymagania środowiskowe i techniczne (Ausseur, Sauty 1982):

- warstwa wodonośna charakteryzuje się zwierciadłem napiętym i miąższością efek- tywną $m_{\text{aqu}} \geq 12$ m;
- miąższość pokrywy warstwy wodonośnej półprzepuszczalnej lub słabo przepuszczal- nej wynosi $m_{\text{cap}} \geq 16$ m ;
- promień cieplny magazynu wody podgrzewanej lub chłodzonej $r_{\text{th}} \geq 55$ m ;
- objętość minimalna zbiorników cieplnych $\bar{Q} \geq 68.000$ m³ ;
- odległość minimalna między otworami $L \geq 140$ m, dla $m_{\text{aqu}} = 12$ m.

Symulacja rocznych cykli została przeprowadzona dla trzech poziomów wodono- śnych: Q1 Q2 i M (tab. 2). Odnośnie do tych poziomów wyznaczono w pierwszej kolejno- ści reprezentatywną miąższość górnych formacji wielowarstwowego systemu wodonośnego Pojezierza Kaszubskiego. Odnosząc się do parametrów termicznych – często określaných w literaturze dla rodzajów analizowanych ośrodków podziemnych – przyjęto orientacyjną przewodność i pojemność cieplną dla rozpatrywanych poziomów wodonośnych oraz otacza- jących ich warstw utworów słabo przepuszczalnych.

Następny etap oceny polegał na oszacowaniu podatności termodynamicznej poziomów wodonośnych do magazynowania podgrzewanej (lub chłodzonej) wody. Oszacowanie to zo- stało przeprowadzone metodą prób i błędów. Posługując się bezwymiarowymi liczbami ter- modynamicznymi Péclet’a i Λ (tab. 2), wyznaczono dwie klasy podatności termodynamicznej:

- podatność średnią: $Pe \approx 100$ i $\Lambda > 10$;
- podatność wysoką: $Pe \approx 100$ i $\Lambda > 100$;

Na tej podstawie, przy czasie iniekcji 6 miesięcy, oszacowano potencjał zbiornikowy ATES na 71 000 m³ dla poziomów Q1 i M oraz 190 000 m³ dla Q2 (Plansza 1, pole 3).

Ostatnim etapem zastosowanej metody było prognozowanie temperatury osiągniętej w zbiorniku ATES w trakcie fazy końcowej iniekcji z upływem czasu jako efekt kumu- lacyjny w zależności od temperatury tłoczzonej wody. Przy tej prognozie wykorzystano krzywe kalibracyjne typu $T_D = f(t_D)$ i wymienione tu na $T_D = f(n\text{-cykli})$, opisujące zmiany bezwymiarowej temperatury w zależności od bezwymiarowego czasu (Plansza 1, pole 1: wykres Gringarten i in. 1980, zmodyfikowany). Jak podano wcześniej, zakres tem-

Tabela 2

Obliczenie dopuszczalnych wartości bezwymiarowych liczb termodynamicznych

Table 2

The calculation of the limit values of dimensionless thermodynamic numbers

Poziom wodonośny	Miąższość [m]	Typ cieplny ośrodka	Właściwości termiczne		Bezwymiarowe liczby termodynamiczne	
			λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	C [MJ·m ⁻³ ·K ⁻¹]	Pe [-]	Λ [-]
Q1 i M	12,5	Piasek zawodniony	2,4	2,55	100	16
Q2	30	Piasek zawodniony	2,4	2,55	96	126
e	> 16	Gлина piaszczysta	2,0	2	–	–

Wyjaśnienie/explanations:

Q1 – górny poziom czwartorzędowego piętra wodonośnego,

Q2 – dolny poziom czwartorzędowego piętra wodonośnego,

M – mioceńska warstwa wodonośna,

e – poziom półprzepuszczalny,

 λ – przewodność cieplna,C – objętościowa pojemność cieplna (C wody = 4,19 MJ·m⁻³·K⁻¹),Péclet : $Pe = (C_{wat}/\lambda_{aqu}) (\dot{Q}/2\pi \cdot m_{aqu})$ and $\Lambda = (C_{aqu}^2) / (\lambda_{cap} \cdot C_{cap}) (m_{aqu}^2/t_i)$.gdzie: \dot{Q} – średnia wydajność iniekcji [m³/s], t_i – czas iniekcji [s], wat – wody, aqu – warstwy wodonośnej,cap – poziom półprzepuszczalny, m_{aqu} – miąższość poziomu wodonośnego [m].

peratury stymulacji cieplnej płytkich warstw wodonośnych jest ograniczony przepisami wodnoprawnymi uwzględniającymi charakter użytkowy tych wód. Trzy poziomy temperatury podgrzewanej wody tłoczony zostały tu testowane w ramach niniejszej symulacji LT-ATES: 25°C, 30°C, i 35°C, tak aby ocenić wstępnie przydatność systemu do produkcji wody zbliżonej do hipotermalnej. Za wody zbliżone do hipotermalnych rozumie się nie będące kopalinami podgrzewane wody podziemne o temperaturze wyższej niż 20°C i równej lub niższej od 35°C.

4.3. Wyniki symulacji pracy systemu LT-ATES w trybie zimowym

Na planszy 1 zaprezentowano w sposób syntetyczny uwarunkowania techniczne i hydrogeologiczne zagospodarowania energetycznego płytkich wód podziemnych Pojezierza Kaszubskiego metodą LT-ATES, mianowicie:

- schemat uproszczony układu hydraulicznego w letnim trybie iniekcji (Plansza 1, pole 2);
- wymiarowanie instalacji w zależności od objętości magazynu podgrzewanej lub chłodzonej wody, w tym minimalne promienie cieplne (r_{th}) i minimalne odległości między studniami (L), dla każdego rozpatrywanego poziomu wodonośnego, zgodnie z zaleceniami Ausseur'a i Sauty'ego (1982) (Plansza 1, pole 3);
- krzywe $T_D = f(t_D) = f(n\text{-cyklów})$ odniesienia dla obliczenia temperatury (Plansza 1, pole 1, źródło: Gringarten i in. 1980, zmodyfikowane);

Plansza 1 :Przydatność hydrogeologiczna Pojezierza Kaszubskiego do inwestycji typu LT-ATES /
Hydrogeological suitability of Kashubian Lakes District with regard to LT-ATES development

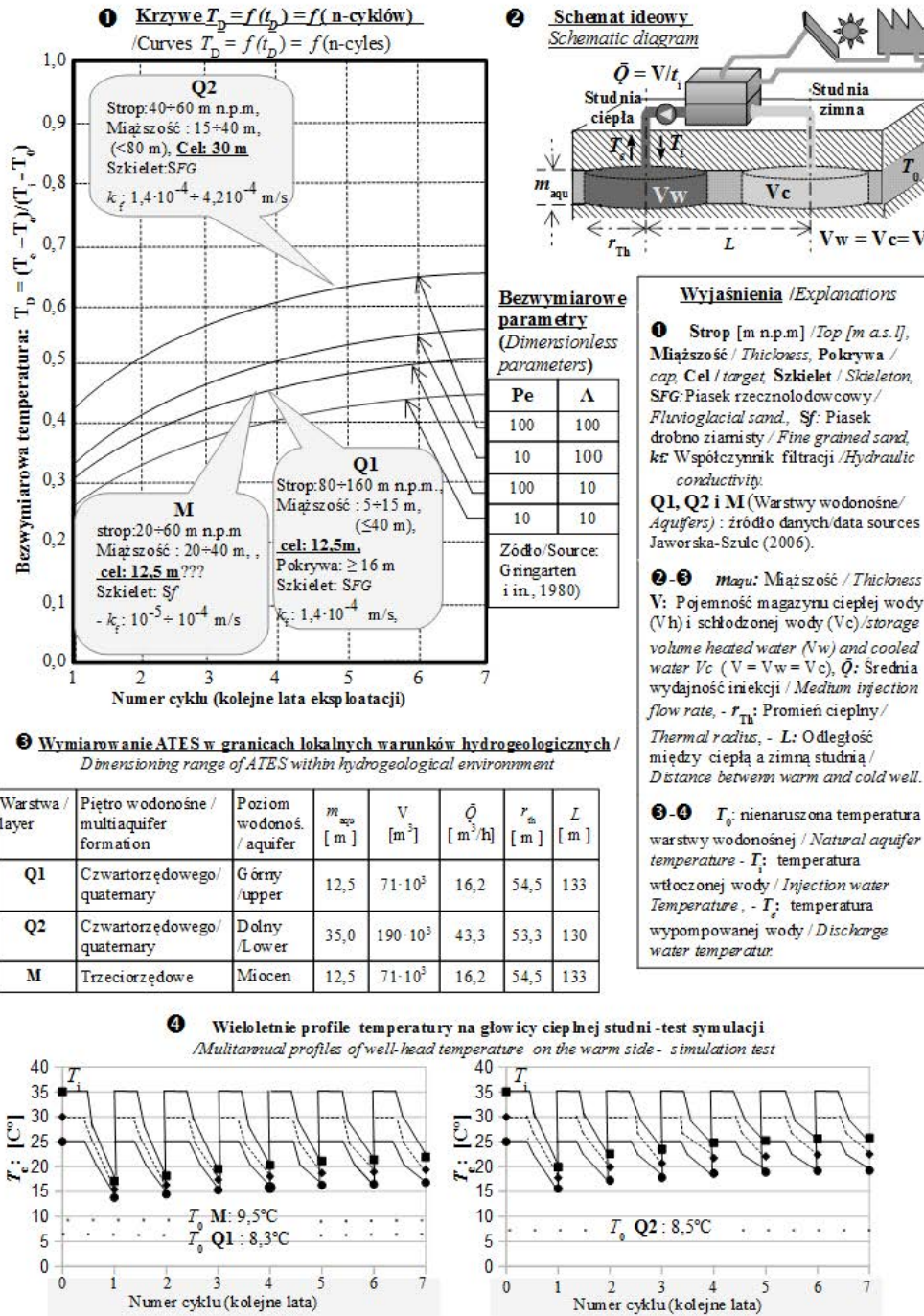


Tabela 3

Zmniejszość temperatury cieplnej strefy LT-ATES – Siedmioletnia symulacja wykorzystania płytkich wód podziemnych Pojezierza Kaszubskiego

Table 3

Temperature development on the warm side ATES system – Computer simulation covering 7 years utilization of shallow ground waters Kaszubian lakes district

Poziom wodonośny	m_{aqu}	T_0 [°C]	T_1 [°C]	$T_{\text{cykl 1}}$	$T_{\text{cykl 2}}$	$T_{\text{cykl 3}}$	$T_{\text{cykl 4}}$	$T_{\text{cykl 5}}$	$T_{\text{cykl 6}}$	$T_{\text{cykl 7}}$
Q1 : górny poziom czwartorzędowego piętra wodonośnego	12,5	8,3	25,0	13,8	14,5	15,3	15,8	16,3	16,5	16,8
			30,0	15,5	16,3	17,4	18,1	18,7	18,9	19,4
			35,0	17,1	18,2	19,5	20,3	21,1	21,4	21,9
Q2 : dolny poziom czwartorzędowego piętra wodonośnego	35	8,5	25,0	15,6	17,2	17,8	18,6	18,9	19,1	19,2
			30,0	17,7	19,9	20,6	21,7	22,0	22,4	22,5
			35,0	19,9	22,5	23,5	24,8	25,2	25,6	25,7
M: Mioceńska warstwa wodonośna	12,5	9,5	25,0	14,6	15,2	16,0	16,5	16,9	17,1	17,4
			30,0	16,3	17,1	18,1	18,7	19,3	19,5	20,0
			35,0	17,9	18,9	20,2	21,0	21,7	22,0	22,5

m_{aqu} – testowana miąższość poziomu wodonośnego,
 T_0 – początkowa temperatura poziomu wodonośnego,
 T_1 – temperatura tłocznej wody,
 T_e – temperatura wody na końcu każdego okresu pompowania [°C].

— wieloletnie profile temperatury na głowicy cieplnej studni (Plansza 1, pole 4), otrzymanych z symulacji za pomocą arkusza kalkulacyjnego (tab. 3) na podstawie wyżej wspomnianych krzywych $T_D = f(t_D) = f(n\text{-cykli})$.

Te wyniki umożliwiają wstępnie ocenić przydatność hydrogeologiczną rozpatrywanych warstw wodonośnych do magazynowania ciepła metodą LT-ATES.

Wstępnie można sformułować trzy następujące spostrzeżenia:

- aby temperatura wody na głowicy osiągała co najmniej 20°C w fazie końcowej kolejnych półrocznych okresów produkcji w trybie zimowym eksploatacja układu LT-ATES powinna trwać co najmniej:
 - 4 lata w przypadku wykorzystania wód górnoczwartorzędowych przy temperaturze iniekcji 35°C,
 - 3 lata w przypadku wykorzystania wód dolnoczwartorzędowych przy temperaturze iniekcji 30°C;
- po siedmiu latach pracy systemu temperatura wody na głowicy cieplnej studni podczas fazy końcowej produkcji w trybie zimowym może sięgać 25°C w przypadku wykorzystania wód utworów dolnego czwartorzędu, około 22°C w przypadku wykorzystania wód mioceńskich;
- przy próbnej miąższości warstwy wodonośnej 12,5 m, zagospodarowanie wód w utworach dolnego czwartorzędu zamiast wód mioceńskich nieznacznie obniży poziom temperatury wody magazynowanej (plansza 1, pole 4).

W związku z powyższym można sformułować następujące wnioski:

- wyprodukowanie metodą LT-ATES wód zbliżonych do hipotermalnych ze zwykłych wód podziemnych występujących w Pojezierzu Kaszubskim jest możliwe;
- najbardziej perspektywicznym poziomem wodonośnym do tej produkcji jest dolny poziom czwartorzędowego piętra wodonośnego. Wynika to z następujących czynników:
 - poziom o charakterze ciągłym, wszędzie napięty, dobrze ekranowany od powierzchni,
 - wysoka zdolność magazynowania ciepłej wody przy dopuszczalnej prędkości filtracji,
 - mniejsza prędkość przepływu wód w porównaniu z górnym poziomem tego samego piętra, gdzie gradienty hydrauliczne są silnie zróżnicowane;
- ocena ryzyka inwestycyjnego i wydajności ekonomicznej inwestycji o których mowa powyżej powinna być rozpatrywana na skalę obrębu geodezyjnego z uwagi na wysoką zmienność przestrzenną współczynników filtracji i gradientów ciśnień w systemie wodonośnym. Wstępnie można jednak stwierdzić, że obszary wysoczyzno-morenowe powinny być bardziej korzystne dla lokalizacji inwestycji, ponieważ oddalenie od stref drenażu znacznie ogranicza prędkość wód podziemnych do wartości składowej regionalnej.

WNIOSKI

Pojezierze Kaszubskie nie posiada perspektywicznego potencjału geotermicznego *sensu stricto*. Jest domeną wód podziemnych niskiej entalpii. Brak zaangażowania tektonicznego podłoża paleozoicznego i pokrywy mezozoicznej uniemożliwia wypływ na powierzchnię wód hipotermalnych na wzór wód termalnych czerpanych z nawodnionych stref szczelinowych w Sudetach. Czwartorzędowe piętro wodonośne na terenie Pojezierza Kaszubskiego jest silnie rozbudowane, cechuje się skomplikowaną budową i dużą zmiennością przestrzenną parametrów hydrogeologicznych. Jest typową domeną termogeologii, zważywszy że to energia słoneczna, a nie głębna energia geotermalna stanowi tu podstawowe źródło energii udostępnionej w płytkich poziomach Ziemi.

Na obszarach wiejskich, termogeologia może znaleźć liczne zastosowania m.in. w rekreacji i spa, w rolnictwie oraz w sektorze rolno-spożywczym. W odróżnieniu od geotermii, termogeologia nie posiada jednak szeroko uznanych metod do automatycznego obliczania wydajności ekonomicznej inwestycji. Zastosowania tej dziedziny geologii inżynierskiej do oceny inwestycji systemów Gruntowych Pomp Ciepła o średniej lub dużej mocy cieplnej są więc nadal obciążone wysokim ryzykiem ekonomicznym. W celu ograniczenia ryzyka w ww. klasach mocy cieplnej, trzy wytyczne mogą być uwzględnione na etapie projektowania instalacji:

- optymalne wykorzystanie odnawialnych źródeł energii na miejscu,
- ulepszenie poziomu energetycznego podstawowego źródła ciepła,
- optymalne wykorzystanie odpadów źródła energii.

Pierwsza wytyczna wiąże się z zastosowaniem technologii GPC typu otwartego (*open loop*) do stref, gdzie wody gruntowe występują wysoko w miąższych warstwach wodonośnych zbudowanych z utworów piaszczysto-żwirowych o wysokich współczynnikach filtracji. Na Pojezierzu Kaszubskim, bardzo korzystne warunki wykazują pod tym kątem utwory wodno-lodowcowe górnego czwartorzędu, występujące w obniżeniach rynnowych, gdzie znaczna prędkość przepływu wód gruntowych może sprzyjać regeneracji termicznej stref wpływu instalacji GPC. Utwory tego typu są szczególnie dobrze reprezentowane w terenie gminy Chmielno, gdzie – odnośnie do wyżej wspomnianego typu instalacji GPC – punktowy potencjał energetyczny wód gruntowych mieści się w rzędzie wielkości mocy cieplnej, porównywalnej z mocą cieplną wielu hotelarskich ośrodków balneo-rekreacyjnych, tj. kilkaset kWth. Specjalizacja gospodarki lokalnej w rozproszonym hotelarstwie spa byłaby więc technicznie możliwa na Pojezierzu Kaszubskim.

Druga wytyczna prowadzi do technologii UTES, a szczególnie sezonowego LT-ATES, jako najbardziej efektywnego sposobu magazynowania ciepła w Ziemi w strefach zasobnych w płytkie wody podziemne. W przypadku Pojezierza Kaszubskiego wyniki symulacji pracy systemu LT-ATES pozwalają wytypować dolny poziom czwartorzędowego piętra wodonośnego jako perspektywiczny do produkcji wód zbliżonych do hipotermalnych o temperaturze w granicach 20–30°C przy rocznej ilości około 130 000±60 000 m³ w zależności od lokalnej miąższości poziomu. W przeciwieństwie do wspomnianej wyżej kategorii, niekonwencjonalna kategoria instalacji tu rozpatrywana ma zastosowania przed wszystkim w terenach oddalonych od osi drenażu. Ma więc stosunkowo więcej zastosowań na Pojezierzu Kaszubskim, gdzie wysoczyzny morenowe dominują obszarowo.

Trzecia wytyczna znajduje uzasadnienie w obliczu globalnej zmiany klimatu, gdzie przeznaczone do ogrzewania jak również i klimatyzacji systemy GPC najbardziej dostosują się do recyklingu ciepła odpadowego, co z kolei poprawia ich efektywność ekonomiczną. W przypadku Pojezierza Kaszubskiego przydatność płytkich wód warstw wodonośnych do magazynowania energii cieplnej może znaleźć liczne zastosowania technologią LT-ATES nie tylko do ogrzewania pomieszczeń lub basenów spa, ale również do produkcji wody lodowej i lodu dla przemysłu rolno-spożywczego np. zamrażalni, a także dla turystyki rekreacyjnej np. lodowisk. Dotyczy to również innych regionów położonych na obszarach młodoglacialnych.

LITERATURA

- AUSSEUR J.Y., SAUTY J.P., 1982 — Exploitation thermique des aquifères peu profonds- Manuel de préparation des pré-études de faisabilité technique. Rap. B.R.G.M. 82 SGN 023 EAU.
- BANKS D., 2012 — An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling, 2nd Edition. ISBN: 978-0-470-67034-7.
- BRALCZYK M., JANKOWSKI M., KWATERKIEWICZ A., 1997 — Dokumentacja Hydrogeologiczna zasobów wód podziemnych z utworów czwartorzędowych i miocenkich strefy krawędziowej Pojezierza Kaszubskiego. Przedsiębiorstwo Geologiczne POLGEOL, Zakład w Gdańsku.

- BUJAKOWSKI W., 2005 — A review of Polish experiences in the use of geothermal water. Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, paper no 142.
- CRUTZEN P.J., STOEMER E.F., 2000 — The Anthropocene. *Global Change News* 41, s. 17–18
- GANCARZ M., 2015 — Właściwości zbiornikowe utworów wapienia muszlowego na Niżu Polskim. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 31 (1), s. 65–80.
- GÓRCEKI W. (red. nauk.) i in., 2006a — Atlas zasobów geotermalnych formacji mezozoicznej na Niżu Polskim. ZSE AGH, Kraków.
- GÓRCEKI W. (red. nauk.) i in., 2006b — Atlas zasobów geotermalnych formacji paleozoicznej na Niżu Polskim. ZSE AGH, Kraków.
- GOURMEZ D., LEMALE J., 2008 — Guide technique pompe à chaleur géothermique sur aquifère : Conception et mise en œuvre, Collection Scientifique et Technique, ADEME, ARENE et BRGM Editions.
- GRINGARTEN A.C., LANDEL P.A., MENJOZ A., SAUTY J.P., 1980 — Stockage longue durée en nappe phréatique de calories à basse température pour l'habitat. Rap. BRGM n°79 SGN 683 HYD.–1979 Paris, Plan Construction, F.
- HAJTO M., 2014 — Modelowanie parametrów hydrogeologicznych i geotermicznych oraz automatyzacja obliczeń zasobów geotermalnych w skali regionalnej na przykładzie konstrukcji współczynnika mocy. *Przegląd Geologiczny* 62 (12), s. 852–855.
- JANCZAK J., GOŁĘBIEWSKI R., 2007 — Typy morfogenetyczne jezior na tle kształtowania się rzeźby czwartorzędowej. [W:] Borowiak [Red.] Jeziora Kaszubskiego Parku Krajobrazowego. Ser. Bad.Limn. 5, Wyd. KLUG, Gdańsk, s. 53–68.
- JAWORSKA-SZULC B., 2006 — Problem zasobów odnawialnych wód podziemnych w wielowarstwowych systemach wodonośnych na przykładzie Regionu Gdańskiego. *Geologos* 10, s. 91–99.
- Państwowa Służba Hydrogeologiczna (PSH)–Jednolite części wód podziemnych (JCWPd), charakterystyka geologiczna i hydrogeologiczna – Nr JCWPd: 13. <http://www.psh.gov.pl>.
- KAPUŚCIŃSKI J., RODZIOCH A., 2010 — Geotermia niskotemperaturowa w Polsce i na świecie – Stan aktualny i perspektywy rozwoju, uwarunkowania techniczne, środowiskowe i ekonomiczne. Wyd. Borgis. Warszawa.
- KEPIŃSKA B., 2011 — Energia geotermalna w Polsce – stan wykorzystania, perspektywy rozwoju. *Technika Poszukiwań Geologicznych, Geotermia, Zrównoważony Rozwój* 50 (1–2), s. 7–18.
- KŁONOWSKI M., KOZDRÓJ W., 2014 — Broszura informacyjna na temat stosowania płytkiej geotermii PIG-PIB OD we Wrocławiu.
- (Link: http://www.transgeotherm.eu/graf/pobierz/broszura_2014/123737004-Geothermie)
- KOZERSKI B., KRECKO M., PŁOCHNIEWSKI Z., 2000 — Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz Egiertowo (0053). PIG, Warszawa.
- KUBSKI P., LEMOINE G., 2011 — Typologia gruntów jako pierwszy etap oceny lokalnego potencjału geotermii niskiej entalpii – Na przykładzie regionu Kościerskiego (Polska). *Technika Poszukiwań Geologicznych Geotermia, Zrównoważony Rozwój* 50 (1–2), s. 295–308.
- LACHMAN P., 2012 — COP dla pomp ciepła – wartości realne i ... te „niezwykłe” prospektów reklamowych. *InstalReporter*, lipiec 2012 (07) [http://instalreporter.pl/wp-content/uploads/2012/07/IR_2012_07_COP_dla-pomp_ciepła.pdf].
- LEE K.S., 2013 — *Underground Thermal Energy Storage*. London: Springer London. Doi:10.1007/978-1-4471-4273-7.

- LEMOINE G., 2014 — Uwarunkowania wykorzystania wód podziemnych do celów energetycznych, leczniczych i rekreacyjnych w centralnej części Pojezierza Kaszubskiego, na terenie gminy Chmielno, Część I: Wody czwartorzędowe. Opracowanie dobrowolne, arch. PSG. Niepublikowane.
- LIDZBARSKI M., PŁOCHNIEWSKI Z. PRUSSAK W., 2000 — Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz Kartuzy (0025). PIG, Warszawa.
- MALINOWSKI J. (red.), 1976 — Atlas zasobów zwykłych wód podziemnych i ich wykorzystania w Polsce. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- PACZYŃSKI B., SADURSKI A. (red.), 2007 — Hydrogeologia regionalna Polski. Tom I Wody słodkie. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- PETELSKI K., PRUSSAK W., 2001 — Wpływ rzeźby podłoża osadów czwartorzędowych na morfologię Pojezierza Kaszubskiego. Geneza Litologia i Stratygrafia Utworów Czwartorzędowych, Tom IV, seria geograficzna 64, UAM, Poznań.
- SIKORSKA M., PACZEŚNA J., 1997 — Quartz cementation in Cambrian sandstones on the background of their burial history (Polish part of the East European Craton). *Geological Quarterly* 41 (3), s. 265–272.
- SZEWCZYK J., 2002 — Ślady zmian klimatycznych plejstocenu oraz holocenu w profilach temperatury w głębokich otworach wiertniczych na Niżu Polskim. *Przegląd Geologiczny* 50 (11), s. 1109–1114.
- SZEWCZYK J., 2005 — Wpływ zmian klimatycznych na temperaturę podpowierzchniową Ziemi. *Przegląd geologiczny* 53 (1), s. 77–86.
- SZEWCZYK J., GIENKA D., 2009 — Terrestrial heat flow density in Poland – a new approach. *Geological Quarterly* 53 (1), s. 125–140.
- SZEWCZYK J., 2010 — Geofizyczne oraz hydrogeologiczne warunki pozyskiwania energii geotermicznej w Polsce. *Przegląd Geologiczny* 58 (7), s. 566–573.
- SZYPERKO -ŚLICZYŃSKA A., 1979 — Trias dolny w północno-wschodniej Polsce. *Prace Inst. Geol.* T. 91.
- WILHELM J., BIANCHETTI G., VUATAZ F.D., 2003 — Evaluation du potentiel géothermique du canton de Vaud. Groupement PGV – Service Cantonal de l'Environnement et de l'Energie (SEVEN).
- WITKOWSKI A., 1989 — Ewolucja i tektonika staropaleozoicznego kompleksu strukturalnego południowego Bałtyku. *Kwartalnik Geologiczny*, 34 (1), s. 51–66.

METHODOLOGICAL APPROACH ANALYSIS OF LOW-TEMPERATURE ENERGY POTENTIAL FOR LATE-GLACIAL AREAS ON THE EXAMPLE OF THE KASHUBIAN LAKE DISTRICT

ABSTRACT

Firstly, the specific application domains of geothermal and thermogeological disciplines are reminded with particular attention to the significance of the Power Factor and Coefficient of Performance.

Secondly, a briefly overview is given of the Kashubian Lake District with regard to the high landscape value and the natural beauty of this site with a view of introducing a scenario of the sustainable development of tourism focused on spa activities. In this hypothesis, a brief assessment of the geothermal and hydrogeothermal suitability of this lake district is carried out.

Thirdly, an assessment of subsurface low temperature potential is proposed, because of the very poor availability of deep geothermal resources in the considered region of the Polish Lowland. This analysis is expanded to include the low enthalpy potential of the shallow aquifer with a focus on the territory of the Chmielno municipality.

Finally, a preliminary analysis of the shallow ground waters suitability for the Aquifere Thermal Energy Storage is conducted on the scale of the lake district referred to in this paper.

KEYWORDS

Thermogeology, groundwater in Quaternary sediments, Ground Source Heat Pumps, spa and thermoludism, ATES, Kashubian Lake District, Chmielno.