



Wiesław BUJAKOWSKI*, Bogusław BIELEC*, Robert SKRZYPCZAK**

Technologia ATES i możliwość jej zastosowania w rejonie piotrkowskim

Streszczenie: Artykuł wprowadza w zagadnienie zastosowania systemów ATES, tj. magazynowania energii cieplnej w warstwach wodonośnych. Korzystając m.in. z doświadczeń holenderskich, światowego potentata w stosowaniu rozwiązań ATES, przybliżono wyniki badań modelowych oddziaływania na środowisko dużych systemów oraz problem skali instalacji w kontekście ich mocy i potrzebnych środków inwestycyjnych dla realizacji takich obiektów. Przedstawiono najciekawsze europejskie rozwiązania dla systemów ATES wykorzystujących poziomy wodonośne w różnych warunkach geologicznych. Scharakteryzowano położenie geograficzne rejonu piotrkowskiego oraz występujące tam użytkowe piętra wodonośne (czwartorzędowe i górnokredowe) a także zbiorniki geotermalne (dolnokredowe, jurajski i triasowy). W przypadku piętra czwartorzędowego wskazano dodatkowo na związane z nim uwarunkowania geomorfologiczne, przyrodnicze oraz aerosanitarnie.

Słowa kluczowe: systemy ATES, oddziaływanie na środowisko, skala instalacji, specyfika warunków geologicznych, podziemne użytkowe i geotermalne poziomy wód rejonu piotrkowskiego

ATES Technology and the possibility of its application in the Piotrków region

Abstract: The article introduces the issue of the use of ATES systems – technology of thermal energy storage in water aquifers. Based on Dutch experience, a world leader in the application of ATES solutions, model results of the environmental impact of large systems and the problem of scale installations in the context of their power and the necessary investment resources for the implementation of such facilities are brought closer. The most interesting European solutions for ATES systems using aquifers in various geological conditions are presented. The geographic location of the Piotrków region is characterized along with the usable water-bearing horizons (Quaternary and Upper Cretaceous) and geothermal reservoirs (Lower Cretaceous, Jurassic and Triassic) occurring there. In the case of the Quaternary horizon, additionally geomorphological, natural and aero sanitary conditions are also generally described.

Keywords: ATES systems, impact on the environment, scale installations, the specifics of geological conditions, usable and geothermal aquifers in the Piotrków region

* Dr inż., ** Dr, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków;
e-mail: w.bujakowski@min-pan.krakow.pl; bielec@min-pan.krakow.pl; robskrzy@min-pan.krakow.pl

1. Systemy ATES – wprowadzenie

Systemy magazynowania energii cieplnej w warstwach wodonośnych (ang. ATES – *Aquifer Thermal Energy Storage*) w Szanghaju funkcjonowały już w 1960 r. (Luxiang i Manfang 1984). Pierwsze badanie modelowania takich systemów przeprowadzili 10 lat później Kazmann i Rabbimow z zespołem (Kazmann 1971; Rabbimow i in. 1971). Przypuszczalnie pierwszą syntetyczną publikacją na ten temat była praca Schaetzla i in. (1980), w której obok opisu możliwych zastosowań systemu ATES i proponowanego zakresu związanych z tym badań, przedstawiono podstawowe dla niego modele statyczne i tzw. czas kroku (termicznego). Od tej pory wiele takich systemów pomyślnie zainstalowano głównie w Ameryce Północnej, a potem w Europie.

Fundamentalne stwierdzenia dotyczące teorii systemów ATES sprowadzają się do trzech punktów (Dickinson i in. 2008):

- W systemach ATES energia cieplna przechowywana jest zarówno w wodzie podziemnej, jak i w materiale skalnym warstwy wodonośnej, a tym samym cieplna wydajność objętościowa zależy od porowatości i właściwości termicznych tych ciekłych i stałych materiałów. Według Schaetzla i in. (1980) pojemność cieplna warstwy wodonośnej może być zdefiniowana jako:

$$Q = [(\rho_s c_s)(1-n)] + (\rho_w c_w)^n$$

gdzie:

- Q – energia termalna,
- ρ_s – gęstość materiału stałego,
- c_s – pojemność cieplna materiału stałego,
- ρ_w – gęstość wody podziemnej,
- c_w – pojemność cieplna wody podziemnej.

- Zrzut ciepła, jak i jego pobór są w systemach ATES procesami dynamicznymi w ciągu całego roku. Zatem przy zastosowaniu odpowiedniego pakietu oprogramowania analizy powinny dać odpowiedź co do wymaganego czasu (kroku) inicjowania obu procesów. Z tego powodu trzeba uwzględnić: istniejącą sytuację hydrogeologiczną, strumień energii w danym kroku i wielkość naturalnego przepływu przez warstwę wodonośną; przy czym pojemność cieplna substancji stałej w warstwie wodonośnej powoduje, że przy magazynowaniu energii prędkość cieplna w obrębie frakcji stałej jest mniejsza niż w naturalnych wodach tej warstwy. Prędkość frontu i czas termiczny jego przepływu są według Schaetzla i in. (1980) następujące:

$$v_{th} = \left[\frac{\rho_w c_w n}{\rho_w c_w n + \rho_s c_s (1-n)} \right] v_w \quad t_{th} = \left[\frac{\rho_w c_w n + \rho_s c_s (1-n)}{\rho_w c_w n} \right] t_w$$

gdzie:

- v_{th} – prędkość frontu termalnego w warstwie wodonośnej,

- v_w – prędkość wód podziemnych,
- t_{th} – czas przepływu frontu termalnego w warstwie wodonośnej,
- t_w – czas przepływu wód podziemnych.

- W przypadku systemów ATES można teoretycznie przyjąć, że przy odwróceniu kierunku przepływu, przepływ termiczny jest równy przepływowi podczas zrzutu wód – bez wahania temperatury. W praktyce występuje jednak pewne rozproszenie ciepła z warstwy wodonośnej do ograniczających ją nieprzepuszczalnych warstw powyżej i poniżej, jak i w poziomie.

Według *EU Commission SAVE Programme i Nordic Energy Research* (2004), dla akumulacji ciepła w systemach ATES typowe są:

- wydajność studni (pobór z warstwy wodonośnej) 10–100 m³/h,
- wielkość ponownego zatłaczania wody 10–75 m³/h,
- średnica odwiertu 200–600 mm,
- głębokość otworu studziennego 10–300 m,
- min./max. temperatura przy ponownym zatłaczaniu wody 3°C/80°C,
- przepuszczalność warstwy wodonośnej od 10⁻³ do 10⁻⁴ m²/s.

Typowe koszty magazynowania energii w systemie ATES w 2004 r. 100–200 €/kW.

W tabeli 1 wskazano podstawowe informacje o stosowaniu systemów ATES w głównych obszarach Europy. Pominięto w niej informacje o pojedynczych dużych instalacjach w Norwegii (Lotnisko Gardermoen-Oslo) i w Niemczech (Gmach Reichstagu w Berlinie wraz z sąsiadującymi budynkami) oraz o kilku instalacjach powstających i projektowanych w Wielkiej Brytanii od 2006 r., szczególnie dla dużych kompleksów mieszkalnych w Londynie.

TABELA 1. Główne obszary stosowania technologii ATES w Europie (IFTech 2012; Godschalk i Bakema 2009; Desmedt i in. 2007)

TABLE 1. Main areas of ATES application in Europe (IFTech 2012; Godschalk and Bakema 2009; Desmedt et al. 2007)

Kraj	Liczba instalacji ATES (przybliżona)	Rodzaj warstwy wodonośnej	Główne zastosowania
Belgia	>15	piasek/kreda	szpitale
Dania	10	piasek/żwir, kreda	przemysł
Holandia	>1 000	piasek	duże budynki
Szwecja	70	kreda, piasek/żwir	duże budynki

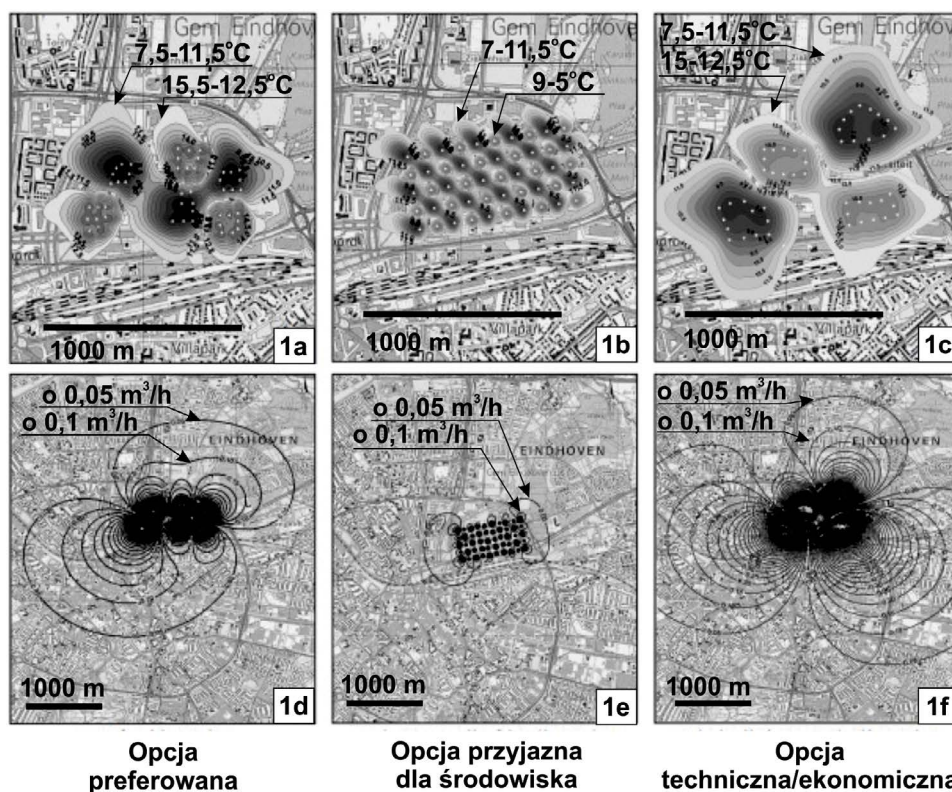
2. Oddziaływania środowiskowe dużych systemów ATES i problem skali instalacji (na podstawie: Snijders, van Aarssen 2003)

Na Uniwersytecie Technologicznym Eindhoven (Eindhoven University of Technology) w Holandii, założonym w 1956 r., oddano do użytku w 2002 r. największy wówczas w Europie zbiorowy system ATES. Kompletny proces badań konfiguracji jego studni trwał prawie rok i objął trzy opcje:

- **opcja preferowana**: trzy skupiska ciepłych i trzy zimnych zintegrowanych otworów studziennych o dopuszczalnym poziomie efektywności energetycznej i wpływie na otoczenie,
- **opcja przyjazna dla środowiska**: otwory studzienne umieszczone w strukturze macierzowej i powodujące minimalne oddziaływanie na środowisko hydrogeologiczne i termiczne (droższa o ok. 20% od opcji 1),
- **opcja techniczna, jako rozwiązanie ekonomicznie optymalne**: dwa skupiska ciepłych i dwa zimnych otworów studziennych z krótką siecią dystrybucyjną, z głównym naciskiem na efektywność energetyczną i niski koszt inwestycji (tańsza o ok. 10% od opcji 1).

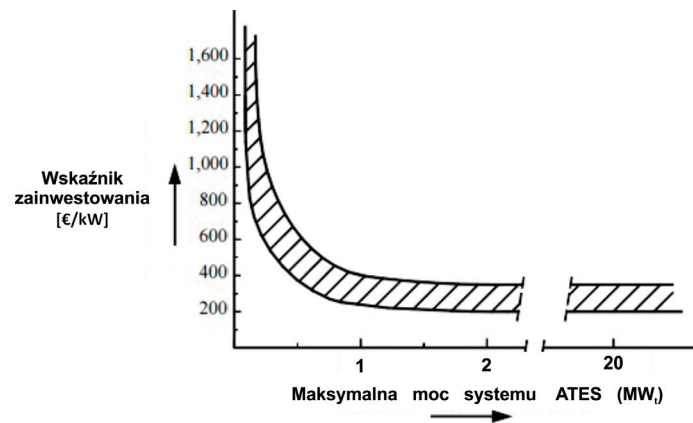
Przewidywane skutki oddziaływania powyższych trzech opcji po 20 latach eksploatacji systemu ATES przedstawiono na rysunku 1 (termiczne – rys. 1. a–c, hydrogeologiczne – rys. 1. d–f).

Badania przeprowadzone w Holandii, w kraju wiodącym na świecie w wykorzystywaniu systemów ATES, pozwoliły stwierdzić w jaki sposób poziom potrzeb inwestycyjnych zależy od mocy energetycznej takich systemów (rys. 2). Specyfikę inwestycyjną oparto na holen-



Rys. 1. Oddziaływanie eksploatacji systemu ATES przewidywane po 20 latach (trzy opcje); a–c – skutki termiczne, d–f – skutki hydrogeologiczne (izolinie wzrostu przepływu; Snijders i van Aarssen 2003)

Fig. 1. The projected impact of 20 years of operation of the ATES system (three options); a–c – thermal effects, d–f – hydrogeological effects (isolines of flow rate; Snijders and van Aarssen 2003)



Rys. 2. Potrzeby inwestycyjne systemów ATES (Snijders i van Aarssen 2003)

Fig. 2. Investment needs of the ATES systems (Snijders and van Aarssen 2003)

derskim poziomie cen z końca 2002 r. Objęła ona koszty kompletnych systemów ATES, w tym wbudowanych wymienników ciepła, systemów sterowania, procedury wydawania zezwoleń oraz prac inżynierskich. Z przedstawionego wykresu wynika, że w odniesieniu do zdolności chłodzenia systemu o mocach wyższych od około 1,5 MW, brak tzw. efektu skali dla potrzeb inwestycyjnych.

3. Systemy ATES dla różnych warunków geologicznych – przykłady

Systemy ATES intensywnie rozwijano w Europie, jak już wspomniano wcześniej, szczególnie intensywnie w Holandii. Zainteresowanie nimi zaczęło wzrastać także w innych krajach europejskich, również w odniesieniu do miejsc o odmiennej niż w Holandii budowie geologicznej, czy też w związku z określonymi oczekiwaniami inwestorów (np. w Niemczech). Najciekawsze rozwiązania przedstawiono poniżej.

3.1. System ATES dla tzw. typowego budynku biurowego wykorzystujący porowe utwory deltowe z napiętym zwierciadłem wody (Dickinson i in. 2008)

Budowa geologiczna rejonu Dordrecht w Holandii wykazuje zmienną sekwencję piasków i ilów holocenu, plejstocenu i pliocenu, tworzących system wielu warstw wodonośnych. Osady holocenu obejmują utwory rzeczne, utwory płaskich pływów morskich oraz osady ujścia rzek, nagromadzone pod wpływem rosnącego poziomu morza, związanego z szeregiem przybrzeżnych barier. Utwory te osiągają maksymalną miąższość około 25 m i są zdominowane przez osady rzeczne, głównie rzeki Ren. Natomiast osady plejstocenu i pliocenu, to na ogół średnio- i gruboziarniste piaski rzeczne o miąższości około 150 m i średniej przewodności hydraulicznej od 20 do 50 m²/d. Ze względu na zmienne reżimy wodne rzek, występujące w tym kompleksie warstwy glin nie są ciągłe. Dotyczy to zarówno

glin holoceńskich, jak i plejstocześskich a także utworów pliocenu. Stąd izolacja pomiędzy poszczególnymi poziomami wodonośnymi nie jest całkowita, przez co może dochodzić do kontaktów hydraulicznych.

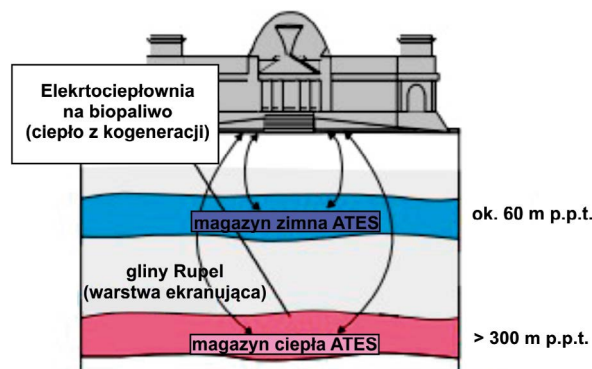
Za najdogodniejszy dla pracy systemu ATES uznano dolny poziom wodonośny na głębokości od około 90 do 115 m p.p.t. Przepływ wód podziemnych jest w nim grawitacyjny, a ich dopływ wiąże się z infiltracją wód opadowych. Teren wokół miejsc lokalizacji otworów studziennych jest niemal płaski i stąd gradienty hydrauliczne są niewielkie, a co za tym idzie bardzo niskie są także prędkości przepływu wód podziemnych.

W sezonie grzewczym z ciepłego otworu studziennego podbierana jest woda o temp. około 14°C, a po odebraniu ciepła za pośrednictwem wymiennika ciepła, odprowadzana do zimnego otworu studziennego jako woda zimna o temp. około 6°C. W okresie letnim cykl ten jest odwrócony. W każdym otworze studziennym zainstalowano pompę głębinową o mocy 7 kW i maksymalnej wydajności 21 m³/h. Pompa ciepła systemu, o znamionowej mocy cieplnej 245 kW, służy do wytwarzania wody o temp. 45°C. W trybie chłodzenia, temperatury panujące po stronie wtórnej wymiennika ciepła mogą być stosowane bezpośrednio do chłodzenia budynku.

3.2. System ATES dla jednego zespołu obiektów wykorzystujący dwie porowe warstwy wodonośne: czwartorzędową i dolnojurańską (Sanner i in. 2005)

Pierwotnie według koncepcji z 1992 r., dla magazynowania zimna na potrzeby chłodzenia odbudowanego w Berlinie gmachu Reichstagu, w ramach systemu ATES chłód miał być przechowywany w warstwie wodonośnej występującej tu piasków czwartorzędowych. W 1995 r. zaproponowano, aby system ATES mógł magazynować również ciepło na większej głębokości, w nawiązaniu do planowanej budowy elektrociepłowni i możliwości wykorzystania ciepła odpadowego powstającego w trakcie produkcji w niej energii elektrycznej w okresie letnim. Ponadto, cały system ATES miał być rozszerzony i objąć nie tylko Reichstag, ale także planowaną w sąsiedztwie budowę biurowców dla władz państwowych.

Warstwa wodonośna w piaskach czwartorzędowych położona na głębokości około 60 m (rys. 3), udostępniana przez 2 zestawy po 5 otworów studziennych, wykorzystywana jest



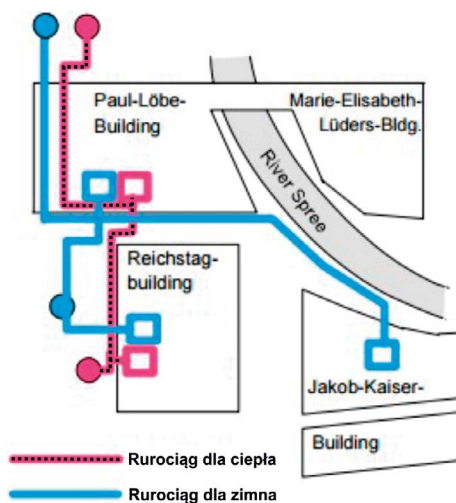
Rys. 3. Schemat warstw wodonośnych w systemie ATES pod budynkiem Reichstagu (Sanner i in. 2005)

Fig. 3. Diagram of ATES system aquifers under the Reichstag building (Sanner et al. 2005)

do przechowywania zimna i na pokrycie potrzeb chłodzenia latem. Soczewki gliny w utworach leżących wyżej chronią ją przed dopływem ciepła z powierzchni terenu. Kolejna warstwa wodonośna, w osadach dolnej jury (hetangu i dolnego synemuru) na głębokości około 320 m (rys. 3), służy do magazynowania nadmiaru ciepła z kogeneracji w okresie letnim i wspomaga ogrzewanie w okresie zimowym. Wymagane tam były tylko 2 otwory studzienne, a temperatura w tej warstwie może osiągnąć nawet do 70°C. Leżące powyżej iłowce/mułowce górnego synemuru (70 m miąższości) i oligoceńskie gliny Rupel (także miąższości około 70 m), zapobiegają konwekcyjnym ucieczkom ciepła do osadów nadległych.

Rurociąg dla zasolonej wody ciepłego obwodu systemu (rys. 4) wykonano z żywicy ze wzmocnionych włókien szklanych, a dla magazynu chłodu systemu ATES (rys. 4) – z tworzywa sztucznego. Przewody są pod ciśnieniem, a na głowicy każdego otworu studziennego utrzymywana jest poduszka azotu, aby zapobiec przedostawaniu się tlenu do wód podziemnych i w efekcie uniknięcia korozji otworów studziennych.

Początkowo wystąpiły problemy z efektywną pracą systemu, związane z opóźnionym czasem ukończenia budowy m.in. Paul-Löbe-Building (rys. 4), gdzie na szczycie miały być zainstalowane suche chłodnice do przechwytywania w zimie chłodu z otoczenia. Po wybudowaniu tego obiektu, przez jakiś czas nie była odpowiednio wydajna także elektrociepłownia. Również obiekty kogeneracji CHP zaspokajały tylko część całkowitego zapotrzebowania budynku Reichstagu na ciepło. Bilans energetyczny dla przechowywania ciepła poprawił się dopiero po kilku latach funkcjonowania systemu.



Rys. 4. Schemat energetyczny systemu ATES Reichstagu (Sanner i in. 2005)

Fig. 4. Diagram of the Reichstag ATES energy system (Sanner et al. 2005)

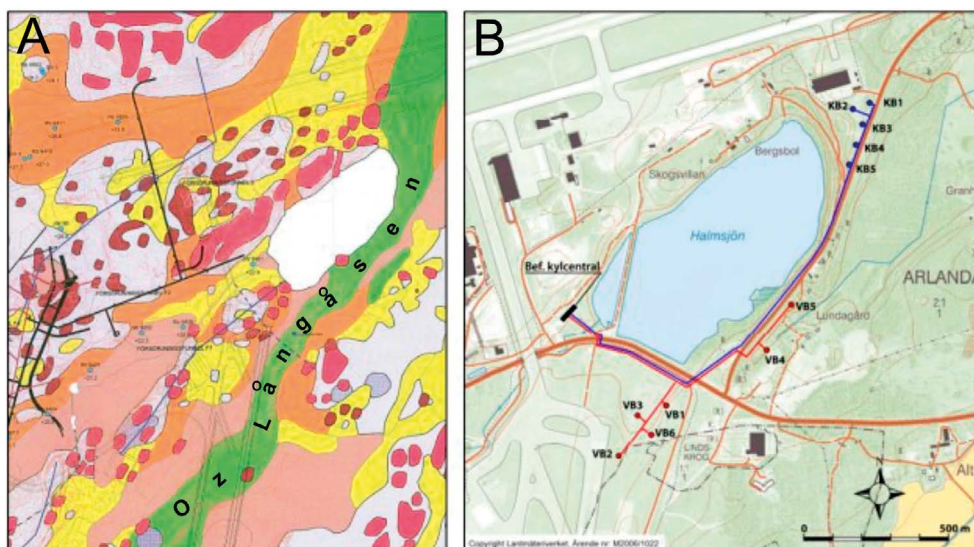
Obecnie możliwe są różne tryby pracy całego systemu, w tym dwa różne sposoby ogrzewania. Sposób bezpośredni to ogrzewanie z magazynu ciepła ATES, o ile temperatura na to pozwala. Drugi sposób, to ogrzewanie z pomocą absorpcyjnej pompy ciepła i z magazynu chłodu ATES jako źródła ciepła. W okresie letnim pompa ciepła może działać jako agregat chłodniczy.

3.3. System ATES wykorzystujący porowe utwory czwartorzędowe polodowcowego ozu wypełniającego granitowy rów (Andersson 2009)

Doskonale warunki dla budowy dużego systemu ATES stwierdzono w Szwecji z Ozie Långåsen z czasu ostatniej epoki lodowcowej (rys. 5.A.), w pobliżu Lotniska Arlanda. Występują tam utwory wodonośne o wysokiej przepuszczalności, ekranowane przez granitowe grzbiety skalne.

Powierzchnia podstawy ozu pocięta jest uskokami schodowymi, poprzecznymi do jego długości (rys. 6), stanowiącymi negatywne granice hydrauliczne, tak jak oba brzegi skalne ozu. Wypiętrzenie podłoża w centralnej części tworzy dogodną naturalną granicę umożliwiającą magazynowanie ciepła i zimna w tej samej warstwie wodonośnej, lecz po dwóch jego stronach. System hydrauliczny związany z największym zrzutem skał podłoża wykorzystano dla budowy ciepłej części magazynu ATES. Układ hydrodynamiczny ozu jest częściowo kontrolowany przez niewielki kontakt hydrauliczny z jeziorem Halmjsjön (na zachodzie), ograniczony jednak prawdopodobnie przez drobnoziarniste osady zdeponowane na jego dnie. Natomiast odprowadzanie wód z ozu w przeciwnym kierunku (na wschód) powoduje wzdłuż niego powstawanie wilgotnych przypowierzchniowych gruntów z glebami organicznymi. Zbocza ozu, często zbudowane z drobnoziarnistych osadów (mułu i gliny) lokalnie z soczewkami torfowymi, ograniczają większe wycieki wód z systemu, a przez to zmniejszają negatywny wpływ na środowisko, zwłaszcza gdy powrót wód podnosi poziom wód gruntowych.

W ramach systemu ATES Lotniska Arlanda (rys. 5.B.) na południu odwiercono dwie grupy „ciepłych” otworów studziennych (2 + 4) w celu rozłożenia na większej powierzchni



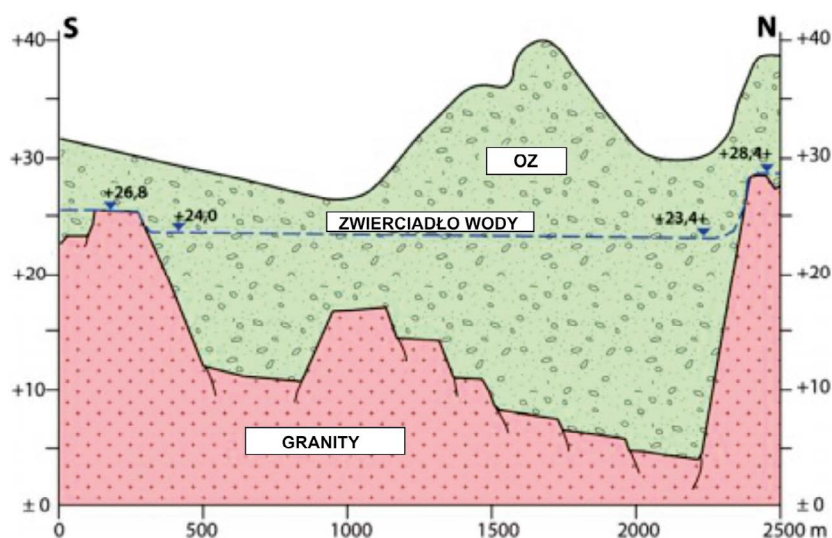
Rys. 5. Oz Långåsen (A) oraz lokalizacja systemu ATES (B – otwory studzienne i rurociągi), według SWECO 2007

Fig. 5. Oz Långåsen (A) and the ATES system location (B – boreholes and pipelines), by SWECO 2007

punktów podnoszenia poziomu zwierciadła wód gruntowych podczas jego zasilania, gdyż naturalne zwierciadło wody występuje tam płycej, tj. około 4–5 m p.p.t. W części północnej system dopełnia grupa pięciu „zimnych” otworów studziennych. W zależności od lokalnych warunków hydrogeologicznych ich średnice wynoszą 270–400 mm, głębokości 15–30 m, a wydajność 100–200 m³/h. Otwory studzienne wyposażone są w dublet: rura zrzutowa i w pompa głębinowa. Ich pracą sterują i monitorują czujniki temperatury i ciśnienia. Zawory zwrotne rur wydobywczych i zawory regulujące rur powrotnych w sposób ciągły utrzymują wodę pod ciśnieniem hydraulicznym. Otwory studzienne wyposażone są również w szczelne pokrywy chroniące przed dostępem powietrza, dla zminimalizowania ewentualnej kolmatacji przez tlenki żelaza i/lub manganu, albo przez kamień kotłowy i zminimalizowania ewentualnych problemów z korozją (mogą pojawić się w dłuższym okresie funkcjonowania instalacji).

Otwory studzienne połączone są systemem rurociągów kończących się w centrum dystrybucji, z którego ciepło i/lub chłód są przesyłane do rurociągu rozdzielczego (rys. 5, prawa część), wyposażonego w duży płytowy wymiennik ciepła. Sieci (φ 350–450 mm) i przewody łączące (φ 150–250 mm) wykonano z tworzywa sztucznego (PE). Nie są izolowane, lecz umieszczone na głębokości około 1,5 m, bezpiecznej dla przemarzania.

Centrum dystrybucji zaspakaja szczytowe zapotrzebowanie na zimno. W razie potrzeby można w nim uruchomić kilka pozostawionych tam agregatów chłodniczych (dawnego systemu chłodzenia zastąpionego systemem ATEs). Układ energetyczny jest także połączony z jeziorem Halmsjön, do którego w pobliżu ciepłej części warstwy wodonośnej mogą być zrzucane nadmiarowe ilości ciepła (rys. 5, prawa część), tj. zbędne zimą, gdyż ograniczałyby przechowywanie zimna. Jezioro już wcześniej wykorzystywano do utylizacji dużej ilości ciepła ze skraplacza wspomnianych agregatów chłodniczych.



Rys. 6. Przekrój podłużny i zwierciadło wody w Ozie Långåsen – podziemnym magazynie energii (SWECO 2007)

Fig. 6. Longitudinal cross-section and the water table in Ozie Långåsen – underground storage of energy (SWECO 2007)

Maksymalny łączny przepływ w jedenastu otworach studziennych systemu wynosi 720 m³/h, umożliwiając zaopatrywanie lotniska w przechowywane tam naturalne ciepło i chłód o mocy co najmniej 10 MW. System oddany do użytku na początku lata 2009 r. wytwarza do 20 GWh energii cieplnej rocznie. Temperatura magazynowania w nim ciepła wynosi około 20°C, a średnia temperatura chłodu osiąga około 5°C. Teoretycznie, system może przechowywać 3,2 mln m³ medium. Z tego w temperaturach aktywnych termicznie (ogrzewanie lub chłodzenie) całkowita dostępna jego objętość będzie wynosiła około 2 mln m³.

W Szwecji, według ustawy o środowisku z 2000 r., obszar wpływu takiego obiektu jak system ATES Lotniska Arlanda definiowany jest jako teren, w obrębie którego zmiana poziomu wód gruntowych jest większa niż 0,3 m. Właściciele gruntów występujących w takim terenie uważani są za zainteresowane strony i mają prawo sprzeciwu wobec potencjalnego wydania pozwolenia na funkcjonowanie obiektu. Sąd decyduje, czy zmiany są, lub nie są istotne, i czy mogą spowodować szkody. Jeżeli tak, właściciel obiektu zmuszony jest do pokrycia kosztów szkód. W przypadku System ATES Lotniska Arlanda sąd nakazał uruchomienie na wiele lat programu jego monitorowania w celu śledzenia m.in. nieprzewidzianych szkód. Program objął pomiary prędkości przepływu, poziomu wód gruntowych, temperatury, skład chemiczny wody i wpływ na florę na wschód od ozu. Wyniki monitoringu przedstawiane są raz w roku lokalnym władzom środowiskowym, które mogą zdecydować o zmianach zakresu monitoringu, a także zdecydować o czasie jego trwania.

3.4. System ATES wykorzystujący szczelinowe utwory kredowe (Law, Nicholson 2009; IFTech 2012; Boid, Dronsfield 2013)

Omawiany przypadek jest szczególnie interesujący w kontekście podobnych warunków hydrogeologicznych występujących w Polsce w rejonie piotrkowskim.

Narodowe Muzeum Morskie wraz z nowym skrzydłem Sammy Ofer w Greenwich w Londynie (Wielka Brytania) od lata 2011 r. wykorzystuje system ATES, tj. pompę ciepła i energię cieplną wody magazynowaną w podziemnych szczelinowych utworach kredowych, występujących głęboko pod muzeum. System dostarcza ogrzewanie, zastępując jego źródło węglowe, oraz chłodzi nowe skrzydło muzeum.

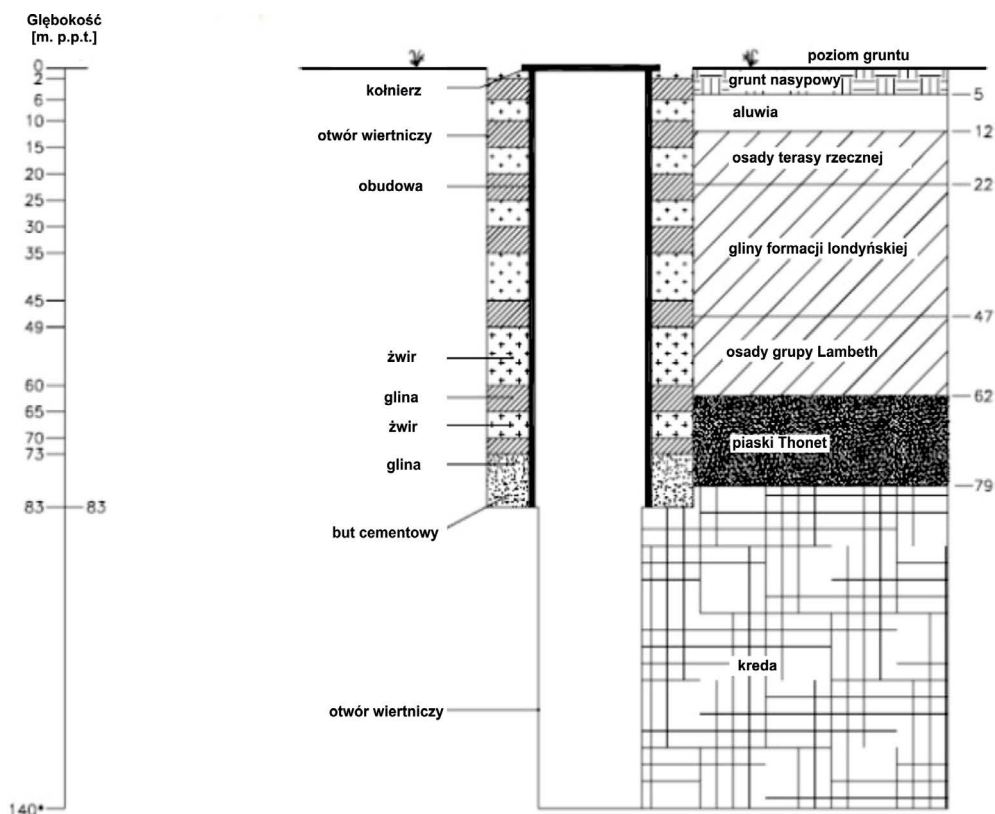
W przypadku kredowych szczelinowych utworów zbiornikowych (rys. 7) kluczowymi czynnikami dla określania ich przydatności dla systemu ATES są prędkość, z jaką woda przepływa przez warstwę wodonośną i tempo, w którym woda może być akumulowana, zwłaszcza w związku ze zmiennością cech tych utworów. Naturę przepływu wód w obrębie kredowej warstwy wodonośnej w centrum Londynu badali Law i Nicholson (2009). Ich wyniki są wykorzystywane w modelach numerycznych dla przewidywania krótko- i długoterminowej stabilności systemu ATES. Jeśli w szczytowych obciążeniach system ATES będzie pracował w sposób ciągły, zmiany termiczne wystąpią w wydobywczym otworze studziennym po około 5 dniach. Model cotygodniowych zmian profilu energii przewiduje jednak korzystne temperatury w takim otworze, tj. ich wzrost nie więcej niż o 0,75°C, zarówno w okresie letnim, jak i w czasie szczytowego chłodzenia. Sugeruje to, iż w okresach szczytów operacyjnych system będzie działać w sposób zrównoważony. Model takiej jego długoterminowej zrównoważonej pracy przewiduje, że system powinien

działać przez co najmniej 50 lat, nie powodując znacznego wzrostu temperatury w warstwie wodonośnej.

W przypadku londyńskiej kredowej warstwy wodonośnej (rys. 7) wydajność 40 m³/h – na otwór studzienny przy stałym poborze wód – jest optymalna. Bardzo pozytywnym wynikiem jest też możliwość poboru wód z wydajnością 50 m³/h przy niewielkiej depresji około 5 m, tj. przy obniżeniu poziomu swobodnego zwierciadła wody z 12,5 do 17,5 m p.p.t.

Dwa otwory studzienne (rys. 7) systemu ATES Narodowego Muzeum Morskiego wyposażone są w pompy głębinowe dla zasilania wodami podziemnymi pompy ciepła w podziemiach nowego skrzydła muzeum. Pracą systemu w sposób optymalny steruje automatyczny system obliczeniowy uwzględniający m.in. model układu termicznego. Wprowadzone są do niego wskazania i pomiary z tych otworów oraz z otworu wykorzystywanego do poboru wód z tej samej warstwy wodonośnej dla potrzeb socjalnych, a także informacje o ustalonym kierunku i prędkości przepływu wody podziemnej i o jej temperaturze. Przewiduje się żywotność systemu co najmniej 30 lat.

System ciepłowniczy składa się z pompy ciepła wyjściowego 350 kW, dwóch wymienników ciepła i dwóch 1000-litrowych zbiorników buforowych: jednego dla obiegu grzewczego i jednego dla chłodzenia. Sterowanie całym systemem jest bardzo proste. Popyt zaspokajany



Rys. 7. Konstrukcja otworu studziennego systemu ATES w warunkach geologicznych Londynu (IFTech 2012)

Fig. 7. The design of the bore well ATES system in geological conditions in London (IFTech 2012)

jest z dwóch zbiorników buforowych. Jeśli budynek potrzebuje ciepła, łączy się go ze zbiornikiem ciepła o temperaturze 45°C. Podczas chłodzenia – z wodą zimną o temperaturze 6°C w drugim zbiorniku.

4. Położenie geograficzne rejonu piotrkowskiego

Rejon piotrkowski leży w centralnej Polsce. Obejmuje miasto Piotrków Trybunalski oraz okalające go gminy: Moszczenica i Czarnocin na północy oraz Będków na wschód od Czarnocina, Wolbórz (na północnym-wschodzie), Sulejów (na wschodzie i południowym-wschodzie), Rozprza (na południu), Wola Krzysztoporska (na południowym-zachodzie i zachodzie) oraz Grabica i Tuszyn (na północnym-zachodzie). Zasadniczo, według Kondrackiego (2002) na zachodzie są to tereny Wysoczyzny Bełchatowskiej, a na wschodzie Równiny Piotrkowskiej. W przygraniczne zachodnie fragmenty gmin Wola Krzysztoporska i Grabica sięga Wysoczyzna Łaska. Północne tereny gminy Czarnocin stanowią Wyniesienia Łódzkie, natomiast wschodnie tereny gmin Wolbórz, Sulejów i Rozprza obejmują Wzgórza Radomszczańskie.

5. Podziemne wody użytkowe

W omawianym rejonie użytkowe piętra wodonośne obejmują część czwartorzędowego poziomu wodonośnego oraz poziom górnokredowy.

5.1. Czwartorzędowe piętro wodonośne

Czwartorzędowe horyzonty wodonośne rejonu piotrkowskiego są silnie związane z procesami geomorfologicznymi, które ostatecznie ukształtowały ten teren. Najpierw i głównie, kształtował go skandynawski lądolód zlodowacenia bałtyckiego sięgający po Karpaty, a następnie procesy związane z jego deglacją. Później obszar ulegał jedynie dalszej niewielkiej przebudowie, zwłaszcza w związku z działalnością polodowcową po ostatnim zlodowaceniu – środkowopolskim. Zaznaczyło się ono tutaj jednak relatywnie słabo, gdyż lądolód zatrzymał się na północy, na wysokości Kujaw. W efekcie pokrycie terenu stanowią głównie młode skały osadowe o miąższości od kilkudziesięciu do stu kilkudziesięciu metrów, okrywające starsze, mezozoiczne formacje geologiczne o litej ilastej strukturze, lub okrywające luźnie wypiętrzone formacje utworów trzeciorzędowych, a lokalnie na NW i N od Piotrkowa Trybunalskiego spoczywające bezpośrednio na węglanowych utworach górnokredowych (Stankiewicz red. 1979).

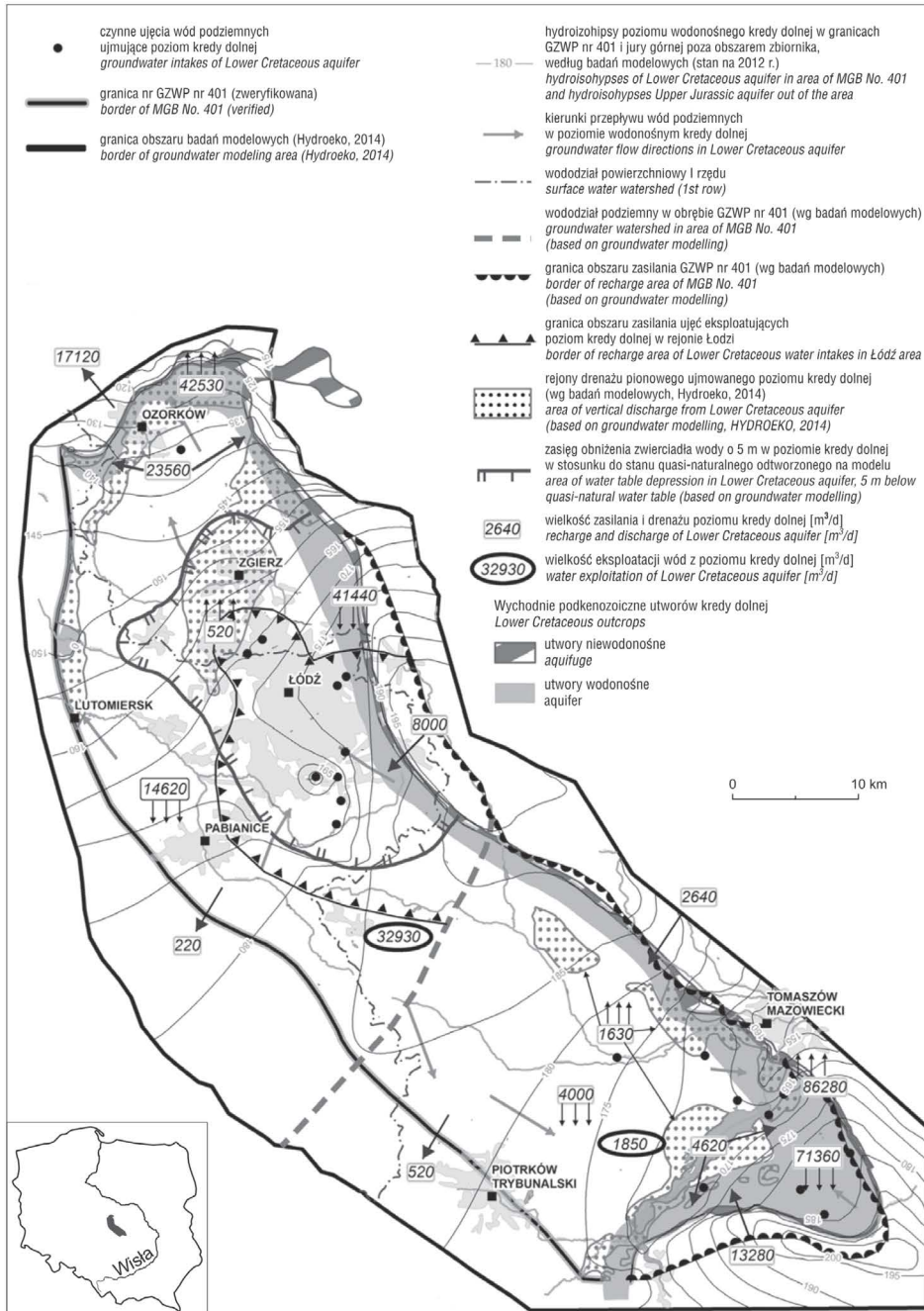
Dzisiejsze wypiętrzenia terenu, sięgające w strefy przygraniczne rejonu piotrkowskiego (wysoczyzna na zachodzie, wzniesienia na północy, wzgórza na południowym-wschodzie), są efektem zlodowacenia bałtyckiego, nakładającym się na starsze procesy tektoniczne, zwłaszcza związane z tektoniką solną. W czasie deglacji (topnienia lodowca), lokalnie – jak np. na terenie dzisiejszej gminy Grabica – gromadziły się utwory morenowe zbudowane z gliniastych powłok oraz żwirowo-piaskowe osady polodowcowe, zwane sandrami. Odry-

wające się pakiety lodowe wywierały nacisk na plastyczne młode osady, tworząc charakterystyczne dla tego terenu oczka bagiennie. Biorą w nich początek niewielkie źródła i ciekły wodne – dopływy Widawki na SW oraz Pilicy na SE. Topniejące lodowe ostańce dały także początek licznym kiedyś na tym terenie małym jeziorkom, które z czasem uległy eutrofizacji (zamuleni i zarośnięciu przez torfowiska). W gminie Grabica, w okolicach Grabicy, Boryszowa (na W od niej), Krzeczowa (na SW) i Ostrowa (na SE), a także w okolicy Borowej Góry (w gminie Wola Krzysztoporska na SW od Piotrkowa Trybunalskiego) występują izolowane żwirowo-piaszczysto-mułkowe polodowcowe pagórki zwane kemami (Stankiewicz red. 1979).

Erozyjne działanie wód polodowcowych (szczególnie po ostatnim zlodowaceniu), ówczesnych zjawisk klimatycznych, a także wiatrów, zwłaszcza w holocenie, wygładziło i spłaszczyło powierzchnię terenu w rejonie piotrkowskim. Wyniesienia uległy obniżeniu, a formy wklęsłe nadal były dogodnymi miejscami akumulacji osadów. Procesy te doprowadziły do ostatecznego ukształtowania powierzchniowego wododziału wiślańsko-odrzańskiego (rys. 8). Rozwój w średniowieczu zwartej roślinności leśnej wokół rejonu piotrkowskiego, zwłaszcza na NE od gmin Czarnocin i Moszczenica, tj. w gminach Będków, Ujazd i Budziszewice oraz na południe od Piotrkowa Trybunalskiego, począwszy od gminy Rozprza, wyraźnie zahamował te procesy. Na zmianę ukształtowania powierzchni terenu istotny wpływ miała następnie działalność gospodarcza człowieka. Początkowo polegała ona na trzebieży lasów dla uzyskania nowych terenów rolnych i osadniczych. Między innymi z tego powodu gminy Czarnocin na północ od Piotrkowa, Grabica na NW od niego i Wola Krzysztoporska na SW od niego, są niemal bezleśne (Stankiewicz red. 1979; Generalna... 2014). Pomimo silnej antropopresji zachowało się kilka fragmentów terenu, relatywnie o małej powierzchni (największe do ok. 500 ha), lecz o bardzo ciekawej strukturze roślinnej i siedliskowej. Niebagatelny wpływ na modyfikację współczesnego klimatu sanitarnego rejonu piotrkowskiego, a pośrednio na jakość najpłytszych horyzontów wód podziemnych, mają Łódzka Aglomeracja Miejska na północy, elektrownia i kopalnia węgla brunatnego w Bełchatowie na zachodzie, Tomaszowskie Zakłady Ceramiki na NE oraz inne obiekty przemysłowe lub tereny zaglomerowane, które emitują duże ilości ciepła, pyłów, zanieczyszczeń stałych i gazowych.

Uwarunkowania środowiskowe i częściowo biologiczne rzutują na jakość wód poziomu czwartorzędowego, natomiast biologiczne i geomorfologiczne także na ich ilość.

Występowanie wód podziemnych powiązane jest ściśle z budową geologiczną. Na omawianym obszarze można wydzielić dwa poziomy czwartorzędowe. Pierwszy poziom występuje na zmiennej głębokości. Najpłycej – w przedziale 0–2 m – zwierciadło tego poziomu występuje w osadach aluwialnych związanych z największymi dolinami rzeczynymi. W sąsiedztwie doliny Strawy poziom ten obserwuje się na głębokości 2–5 m, lokalnie nawet do 10 m. Sytuacja ta związana jest z głębokim rozcięciem dolinym Strawy, co warunkuje nie tylko większe głębokości do wody lecz także znaczne nachylenie zwierciadła wody ku ciekowi powierzchniowemu. Przejawia się to także występowaniem znacznej liczby wycieków i wysięków na styku den dolin z powierzchniami stokowymi. Wody w przewodzie zasilane są na drodze bezpośredniej infiltracji opadów. Natomiast wody podziemne występujące w dolinach, poza wspomnianym wyżej sposobem zasilania, wzbogacane są poprzez wody podziemne odpływające z terenów wysoczyzn. Przejawem takiego sposobu krążenia wód podziemnych jest częste wysychanie studni w centralnych punktach wysoczyzn, natomiast



Rys. 8. Poglądowa mapa hydrogeologiczna obszaru GZWP nr 401 według badań modelowych stanu hydrodynamicznego w 2012 r. (Rodzoch i Pazio-Urbanowicz 2015)

Fig. 8. Hydrogeological map of MGWB No 401 according to the modeling study of hydrodynamic state in 2012. (Rodzoch and Pazio-Urbanowicz 2015)

w obrębie tarasów i dolin rzecznych zjawisko to nie występuje. Na północ od Piotrkowa wody pierwszego poziomu mogą występować w przedziale głębokości 10–20 m.

Wody drugiego czwartorzędowego poziomu wodonośnego występują już na znacznych głębokościach – w przedziale 20–60 m i charakteryzują się znacznym ciśnieniem hydrostatycznym. Poziom ten ujmowany jest przez liczne studnie. Występowanie tego poziomu wiąże się z miąższą serią osadów żwirowo-piaszczystych interglacjału mazowieckiego (osady te mają przeciętnie grubość 30 m). Wydajność poszczególnych studni czerpiących wodę z tego poziomu waha się od 5 do 60 m³/h przy niewielkich depresjach eksploatacyjnych. Można stwierdzić, że poziom ten jest bardzo zasobny w wodę. Jego zasilanie odbywa się drogą filtracji wód z górnego poziomu, poprzez okna sedimentacyjne w glinach morenowych, a także przesączania się przez bardziej zapiaszczone partie glin.

5.2. Górnokredowe piętro wodonośne

Utwory najwyższej części kredy górnej to szare gezy z wkładkami margli piaszczystych z ziarnami glaukonitu i igłami gąbek. W górnej kredzie tworzyły się jednak przede wszystkim osady głębszego morza, wykształcone poniżej nich, głównie w facji marglistej z wkładkami wapieni, opok i czertów. Na NW utwory te mogą osiągać miąższość około 1250 m w interwale głębokości od 50 do 1300 m p.p.t. Poziom wodonośny związany z tymi utworami zalega na głębokości znacznie poniżej 50 m p.p.t. W związku z tym NE część rejonu piotrkowskiego leży nad fragmentem górnokredowego Głównego Zbiornika Wód Podziemnych-Niecka Łódzka nr 401, który stanowi najcenniejszy strategiczny rezerwuuar wód użytkowych w Polsce (Kleczkowski red. 1990). Położenie zbiornika i jego charakterystykę hydrogeologiczną ilustruje rysunek 8. Jedynie na zachodzie, w części leżącej na Wysockoziźnie Bełchatowskiej poza granicami GZWP, zbiornik górnokredowy jest wypiętrzony na głębokość 30–50 m p.p.t. Eksploatowanych jest tam kilka głębinowych ujęć wodnych, m.in.: w Ostrowie i Szydłowie w gminie Grabica.

6. Głębsze zbiorniki wód geotermalnych (Bujakowski red. 2014)

6.1. Zbiornik dolnokredowy

W rejonie piotrkowskim utwory kredy dolnej to seria iłowców i mułowców ciemnoszarych i czarnych z wkładkami syderytów w stropowej części z piaskami i piaskowcami drobno- i średnioziarnistymi, często glaukonitowymi lub z wkładkami piaskowców z oolitami żelazistymi. Występujące w nich wody mają parametry hydrogeotermalne wyróżniające się na całym obszarze Nizy Polskiego możliwością tworzenia się zbiorników wód o dużej wydajności i o dobrych parametrach zbiornikowych. W rejonie piotrkowskim ich strop występuje na głębokościach od około 100 do 1100 m p.p.t. przy średniej miąższości 60 m. Temperatury wód mogą osiągać wartości 20–45°C, a mineralizacja w stropie warstwy nie przekracza 2 g/dm³.

6.2. Zbiornik górnourajski

Utwory jury górnej rejonu piotrkowskiego są dość jednolicie wykształceni litologiczne. Głównie są to wapienie, często margliste lub piaszczyste z liczną fauną, oraz margle, niekiedy z wkładkami gipsów i anhydrytów. Podrzędnie występują piaskowce glaukonitowe. Miąższość tych osadów osiąga do 800 m, a interwał ich występowania to 1200–2000 m p.p.t. Wody zbiornika mogą mieć temperatury 40–60°C, a przy silnej wymianie wód średnio około 50°C.

6.3. Zbiornik środkowourajski

W rejonie piotrkowskim utwory jury środkowej wykształcone są głównie jako osady ilasto-piaszczyste z fauną. Na ogół są to piaskowce jasnoszare, drobnoziarniste, kruche, porowate, łupki, mułowce czarne z syderytami, iłowce beżowoszare i ciemnoszare, mikowe, zawierające zwęglony detrytus roślinny, a w części stropowej (kelowej) – wapienie. Strop występującego w nich zbiornika wodnego zalega na głębokości od 900 do około 2400 m p.p.t., przy średniej miąższości 250 m. Dlatego temperatury jego wód mogą osiągać 35–80°C. Mineralizacja tych wód w stropie warstwy wodonośnej wynosi od 20 do 30 g/dm³. Niższa jest na SW od Piotrkowa Trybunalskiego, a nieco wyższa w centralnej części gminy Moszczenica.

6.4. Zbiornik dolnourajski

Kompleks utworów jury dolnej traktowany jest jako najważniejszy zbiornik wód geotermalnych Nizżu Polskiego. Zwykle rozpoczyna się on brunatnowiśniowymi iłowcami z wkładkami zlepieńców i otoczków skał wapiennych, nad którymi leżą różne odmiany piaskowców. W ich stropie występuje szarozielona ilasta seria esteriowa. W rejonie piotrkowskim utwory jury dolnej reprezentowane są przez piaskowce drobnoziarniste, kruche, mułowce, iłowce ciemnoszare i czarne z wkładkami piaskowców dolomitycznych i gniazdami syderytów ilastych. Strop tego kompleksu o średniej miąższości 180 m zalega tutaj na głębokości od 1000 do około 2650 m p.p.t. Stąd szacuje się, że wody mogą tu osiągać temperatury rzędu 40–80°C. Dominuje w nich mineralizacja powyżej 20 g/dm³, a w gminie Moszczenica i na NW od niej ponad 30 g/dm³. Jedynie na SW gminy Wola Krzysztoporska i na zachodzie gminy Rozprza obniża się ona do wartości mniejszych od 5 g/dm³.

6.5. Zbiornik górnotriasowy

Utwory triasu górnego rejonu piotrkowskiego reprezentowane są przez osady retyku leżące na utworach kajpru. Osady retyku to tutaj iłowce popielato-szare, iłowce pstre (czerwone i zielone), mułowce brunatnoczerwone dolomityczne, piaskowce jasnoszare i zlepieńce. Natomiast utwory kajpru to czerwone iłowce i mułowce, nieco margliste z kalcylem i z warstwami gipsu i anhydrytu. To także piaskowce występujące w obrębie kilkudziesięciometrowej serii piaskowca trzciniowego kajpru górnego i w kajprze dolnym, przy czym za główny poziom wodonośny uznaje się poziom piaskowca trzciniowego kajpru górnego, który zwykle wykazuje nasycenie wodą złożową.

W rejonie piotrkowskim strop utworów triasu górnego występuje w interwale głębokości od około 1100 m p.p.t. w pobliżu Piotrkowa Trybunalskiego do około 2600 m p.p.t. w północnej części gminy Moszczenica i w zachodniej części gminy Czarnocin. Szacuje się, że przy średniej miąższości 900 m temperatury występujących tu wód mogą osiągać wartości rzędu 50–100°C. Orientacyjne wydajności tych wód mogą być rzędu 50 m³/h, przy czym nieco wyższe mogą być w gminie Grabica (ok. 60 m³/h), a obniżać się w SW części rejonu – nawet do 15 m³/h w gminie Rozprza. Jednocześnie są to wody bardzo silnie zmineralizowane – od 30 g/dm³ na SW do 100 g/dm³ na północy.

6.6. Zbiornik środkowotriasowy

Utwory triasu środkowego (wapień muszlowy) w rejonie piotrkowskim wykształcone są w postaci wapieni, margli, iłowców, dolomitów, wapieni z wkładkami anhydrytów i wapieni falistych. Zwykle są to wapień szare i brunatno-szare, twarde i zbite. Na zachód od rejonu piotrkowskiego, w gminie Bełchatów, kompleks tych utworów występuje przypuszczalnie na głębokościach 3300–3500 m. Należy więc oczekiwać, że wody stropowe będą miały w nim temperaturę rzędu 95–100°C. Ich wydajność można oszacować na około 20–40 m³/h, przy właściwym ujęciu warstw wodonośnych.

6.7. Zbiornik dolnotriasowy

W rejonie piotrkowskim utwory triasu dolnego (ret, pstry piaskowiec) wykształcone są jako czerwone iły, piaskowce wiśniowe, margle, wapień i dolomity. Według szacunków o zregionalizowanym charakterze i dotyczących wyidealizowanych warunków ujęcia wód podziemnych (Górecki red. 2006), na tym obszarze jest możliwe uzyskanie wód o temperaturze rzędu 100°C z głębokości 3500 m p.p.t. i o wysokiej mineralizacji dochodzącej do około 200 g/dm³. Uwzględniając występujące często niekorzystne uwarunkowania techniczne oraz opierając się na wartościach wydajności zmierzonych dla tego obszaru w odniesieniu do wód podziemnych z płytszych horyzontów, wydaje się, że dla wód dolnotriasowych należałoby przyjąć wydajności rzędu 40 m³/h.

Podsumowanie

Niniejszy artykuł jest pierwszym z cyklu artykułów, w których autorzy zamierzają przybliżyć tematykę magazynowania ciepła/chłodu w systemach ATES w warunkach polskich. Przedstawiony powyżej opis zagranicznych zastosowań systemów ATES oraz analiza warunków hydrogeologicznych rejonu piotrkowskiego, skłaniają do stwierdzenia, iż pod kątem geologicznym i hydrogeologicznym jest możliwe zastosowanie takich systemów również w naszym kraju. W kolejnych artykułach tematyka ta zostanie poszerzona m.in. o omówienie uwarunkowań prawnych i środowiskowych stosowania systemów ATES w Polsce.

Literatura

- Andersson, O. 2009. The ATES Project at the Stockholm Arlanda Airport – Technical Design and Environmental Assessment. Effstock Conference Proceedings, 14–17.06.2009, Sztokholm. [Online] Dostępne w: http://intraweb.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/effstock09/Session_6_3_ATES_Applications/56.pdf [Dostęp: 10.02.2016].
- Boid, N. i Dronsfield, S. 2013. Storing heat underground. UTES and ATES systems can help developments meet UK government renewable-energy targets. GeoDrilling International, March. [Online] Dostępne w: www.geodrillinginternational.com [Dostęp: 10.02.2016].
- Bujakowski, W. red. 2014. *Studium rozpoznania i zagospodarowania lokalnych zasobów Lokalnej Grupy Działania „BUD-UJ RAZEM”*. Kraków: IGSMiE PAN, s. 102.
- Desmedt, J., Hoes, H. i Lemmens, B. 2007. Shallow geothermal applications in Belgium. Proceedings European Geothermal Congress 2007. Unterhaching, Germany, 30 May–1 June 2007. [Online] Dostępne w: <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/EGC/2007/142.pdf> [Dostęp: 10.02.2016].
- Dickinson i in. 2008 – Dickinson, J., Buik, N., Matthews, M. i Snijders, A. 2008. Aquifer thermal energy storage: theoretical and operational analysis. *Geotechnique* t. 58, z. 00, s. 1–12 [doi: 10.1680/geot.2008.58.00.1].
- EU Commission SAVE Programme i Nordic Energy Research, 2004. Tabl. 4.2. [Online] Dostępne w: <http://www.underground-energy.com/ATES.html> [Dostęp: 10.02.2016].
- Generalna Dyrekcja Lasów Państwowych, 2014. [Online] Dostępne w: <http://www.lasy.gov.pl/nasze-lasy/mapa-lasow> [Dostęp: 10.02.2016].
- Godschalk, M. i Bakema, G. 2009. 20 000 ATES Systems in the Netherlands in 2020 – Major step towards a sustainable energy supply. Proceedings Effstock 2009, Stockholm. [Online] Dostępne w: http://intraweb.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/effstock09/Session_10_3_Overviews/94.pdf [Dostęp: 10.02.2016].
- Górecki, W. red. 2006. *Atlas zasobów geotermalnych na Niżu Polskim*, Zakład Surowców Energetycznych, AGH – WGGiOŚ, Kraków, s. 484.
- HYDROEKO 2014. Rodzoch, A., Muter, K. i Manuszak, M. Dokumentacja hydrogeologiczna określająca warunki hydrogeologiczne w związku z ustanawianiem obszarów ochronnych Głównego Zbiornika Wód Podziemnych nr 401. Warszawa. *Przegląd Geologiczny* t. 63, nr 10/2, s. 1037–1041.
- IFTech, 2012 – An Introduction to Aquifer Thermal Energy Storage (ATES). Rehau Workshop, 31.05.2012. [Online] Dostępne w: http://www.icax.co.uk/pdf/IFTech_Presentation_Rehau_31May2012.pdf [Dostęp: 10.02.2016].
- Kazmann, R.G. 1971. Exotic uses of aquifers. *Journal of Irrigation and Drainage Division (ASCE)*, t. 97, z. IR3, s. 515–522.
- Kleczkowski, A.S. red. 1990. *Mapa obszarów głównych zbiorników wód podziemnych (GZWP) w Polsce wymagających szczególnej ochrony, skala 1:500 000*. Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej AGH, Kraków.
- Kondracki, J. 2002. *Geografia regionalna Polski*. Warszawa: PWN, ISBN 83-01-13897-1.
- Law, R. i Nicholson, D. 2009. ATES in fractured chalk: site investigation techniques to model system sustainability. [Online] Dostępne w: http://intraweb.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/effstock09/Session_6_3_ATES_Applications/54.pdf [Dostęp: 10.02.2016].
- Luxiang, S. i Manfang, B. 1984. Case history, 9.2, Shanghai, China [W:] *Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal* ed. J.F. Poland, Paris: UNESCO. s. 155–160.
- Rabbimov i in. 1971 – Rabbimov R.T., Umarov G.Y., Zakhidov R.A., 1971. Storage of solar energy in sandy-gravel ground. *Geliotekhnika* t. 7, z. 5, s. 57–64.
- Rodzoch, A. i Pazio-Urbanowicz, K. 2015. Zasilanie i drenaż wód podziemnych GZWP nr 401 (Zbiornik Niecka Łódzka) w świetle badań modelowych. *Przegląd Geologiczny* t. 63, nr 10/2, s. 1037–1041.
- Sanner B., Kabus F., Seibt P., Bartels J., 2005 – Underground Thermal Energy Storage for the German Parliament in Berlin – System Concept and Operational Experiences. [Online] Dostępne w: <http://www.sanner-online.de/media/1438.pdf> [Dostęp: 10.02.2016].
- Schaetzle i in. 1980 – Schaetzle, W.J., Brett, C.E., Grubbs, D.M. i Seppanen, M.S. 1980. *Thermal energy storage in aquifers: Design and applications*. New York: Pergamon.
- Snijders, A.L. i Aarssen, M.M. van. 2003. Big is beautiful? Application of large scale energy storage in the Netherlands. Futrestock’ 2003. *The 9th International Conference on Thermal Energy Storage*, Warszawa, s. 83–88.
- Stankiewicz, Z. red. 1979. *Województwo piotrkowskie. Monografia regionalna. Zarys dziejów, obraz współczesny, perspektywy rozwoju*. Uniwersytet Łódzki. Łódź–Piotrków Trybunalski, s. 102.
- SWECO 2007. Aquifer Storage at Långåsen, Arlanda Stockholm Airport. Permit Application. SWECO, Malmö, May 11, 2007 (in Swedish).