

Gérard LEMOINE¹

PERSPEKTYWY MIĘDZYSEZONOWEGO MAGAZYNOWANIA CIEPŁA W PŁYTKICH WARSTWACH WODONOŚNYCH Z OBSZARÓW MŁODOGLACJALNYCH NA PRZYKŁADZIE RYNNY SŁUSZEWSKIEJ WYSOCZYNY ŻARNOWIECKIEJ

STRESZCZENIE

W artykule omówiono moŹliwosci magazynowania ciepła w warstwie wodonoŹnej (ang. ATES) połoŹonej na Wysoczyźnie Źarnowieckiej (Pomorze) Rynny SłuszeWSkiej.

Na wstępie zaproponowano krótkie przypomnienie historycznego kontekstu, który uwarunkował powstanie i rozwój systemów ATES w Źwiecie podczas ubiegłego i początku bieżącego wieku.

Następnie przedstawiono charakterystykę Wysoczyzny Źarnowieckiej jako obszaru młodo-glacialnego mogącego być przydatnym dla niskotemperaturowych zastosowań magazynowania ciepła w warstwie wodonoŹnej (ang. LT-ATES).

ZauwaŹywszy pewne podobieństwa, pod kątem płytkich warunków hydrogeologicznych, między Wysoczyzn  Źarnowieck  a r wnin  morenową regionu Toronto w Kanadzie, podano przykł d zrealizowanego w tym drugim regionie pilotaŹowego projektu LT-ATES w Canada Center Building w Scarborough, tj. podręcznikowy przykł d niepowodzenia inwestycji.

Zakł daj c przydatnoŹć Wysoczyzny Źarnowieckiej do zastosowań LT-ATES, oszacowano potencjał termiczny drugiego poziomu wodonoŹnego występującego w Rynnie SłuszeWSkiej, która została r wnoczeŹnie wskazana jako potencjalna lokalizacja pilotaŹowego projektu.

SŁOWA KLUCZOWE

Magazynowanie ciepła w warstwie wodonoŹnej (ATES), gruntowe pompy ciepła woda-woda, obszary młodo-glacialne, Wysoczyzna Źarnowiecka, Rynna SłuszeWSka, Równina morenowa Toronto, Scarborough

¹ Nietatowy konsultant ds. termogeologii, Członek Polskiego Stowarzyszenia Geotermicznego; e-mail: lemoine.ger@gmail.com

WPROWADZENIE

Niniejszy artykuł przedstawia najważniejsze wnioski autorskiego opracowania – raportu pt. Perspektywy Magazynowania Ciepła Metodą LT-ATES Celem Produkcji Ciepła i Chłodu w Rynnie Słuszewskiej (Lemoine 2017), wysłanego do archiwum Polskiego Stowarzyszenia Geotermicznego pod koniec września 2017 r. W niniejszym opracowaniu, które stanowi studium uwarunkowań magazynowania ciepła metodą niskotemperaturową w podziemnej warstwie wodonośnej (ang. *Low Temperature – Aquifer Thermal Energy Storage*, LT-ATES), wybrana została do analizy rymna marginalna, która przebiega w południowym fragmencie Wysoczyzny Żarnowieckiej (pow. wejherowski, woj. pomorskie). Głównym celem pracy było wskazanie, że poza krajami takimi jak Holandia, które są predestynowane do zastosowań wyżej wspomianej metody, ta technologia może otworzyć nowe perspektywy dla waloryzacji energetycznej wód podziemnych w wielu innych krajach, m.in. w Polsce, nawet na terenach o złożonej budowie geologicznej, która cechuje północne obszary młodogłaciacyjne Europy Środkowej.

W niniejszej pracy w pierwszej części przypominane są główne etapy powstania branży ATES. W drugiej części przedstawione są uwarunkowania wykorzystania tej metody na Wysoczyźnie Żarnowieckiej. Trzecia część jest prezentacją zrealizowanego w latach osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych XX wieku pilotażowego projektu LT-ATES w Canada Center Building w Scarborough blisko Toronto, jako przykładu inwestycji w warunkach środowiskowych zbliżonych do istniejących na obszarach młodogłaciacyjnych Polski północnej. W czwartej części przedstawiono potencjał buforu drugiego poziomu wodonośnego występujący w Rynnie Słuszewskiej, która została wcześniej wskazana jako potencjalne miejsce lokalizacji pilotażowego projektu magazynowania ciepła rozpatrywaną tu metodą LT-ATES.

1. KONTEKST HISTORYCZNY POWSTANIA BRANŻY ATES

Pierwsze systemowe prace geologiczne prowadzące do magazynowania ciepła w warstwach wodonośnych udokumentowano w Chinach w latach sześćdziesiątych XX wieku. Początkowo wykonywano je w celach geotechnicznych – zapobiegania osiadaniu powierzchni terenów pod wpływem nadmiernego ujmowania wód podziemnych. Prace te ujawniły wtedy przypadkowo wysoki potencjał magazynowania energii cieplnej w warstwach wodonośnych (Wu i in. 2000). Pierwsze projekty ATES *sensu stricto* (ang. *Aquifer Thermal Energy Storage*) powstały w Szanghaju w 1965 r. kilka lat po wspomnianym odkryciu (Gautier 1993). Metoda znalazła tam swoje pierwsze przemysłowe zastosowanie w zakładach włókienniczych. W latach siedemdziesiątych nastąpiło jej rozpowszechnienie w innych miastach przemysłowych tego kraju. Należy zwrócić szczególną uwagę, że podczas tej pionierskiej fazy prac inwestorzy byli przede wszystkim zainteresowani magazynowaniem dzięki tej technologii wody dla produkcji wody zimnej na potrzeby procesów przemysłowych (Gautier 1993).

W Europie pierwsze prace badawcze w dziedzinie magazynowanie ciepła w ziemi sięgają lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych XX wieku. W tym okresie francuska służba geologiczna Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) wykonała pierwszą inwentaryzację istniejących w świecie instalacji ATES (Aubertin i in. 1984; Gautier 1993). Wskazano wtedy kilkanaście głównych światowych projektów badawczych. W Stanach Zjednoczonych projekty przeprowadzone pod kierownictwem ekip uniwersyteckich z Mobile w Alabamie i Saint-Paul w Minnesocie pozwoliły zidentyfikować główne czynniki wpływające na efektywność systemów ATES. Z uwagi na niezadowalający odzysk ciepła, otrzymany podczas próbnych badań, prace nad tymi prototypami nie zostały przedłużone po zakończeniu lat dziewięćdziesiątych. W Europie większość projektów zrealizowanych w tym okresie również nie skutkowało inwestycjami komercyjnymi. Należy tu doprecyzować, że większość tych prototypowych instalacji została zaprojektowana na wzór dubletów geotermalnych, z temperaturą zbiorników ponad 50°C. Głównym źródłem magazynowanego ciepła było ciepło odpadowe z przemysłu. Takie projekty nie znalazły jednak powszechniejszego zastosowania w gospodarce, oprócz kilku realizacji na przykładzie flagowego systemu ATES Reichstagu w Berlinie, w Niemczech.

Od dwóch dekad obserwuje się jednak rozbudzenie w branży ATES w Europie, szczególnie w Europie Północnej, gdzie ta metoda jest teraz uznana za najtańszą dla sezonowego magazynowania ciepła (Schmidt i Miedaner 2012). O tym nowym impulsie świadczą liczne instalacje o dużej mocy znamionowej, często ponad 1 MW jak w przypadku Holandii, która posiada ponad 3000 instalacji tego typu (Sommer 2015). W odróżnieniu od dawnych prototypów większość nowych inwestycji jest oparta na niskotemperaturowej metodzie LT-ATES, z zakresem temperatur od 5 do 20°C. Na dodatek inwestycje są również przeznaczone do produkcji wody zimnej oprócz samej produkcji ciepła do ogrzewania. Na ogół prostota strukturalna płytkich utworów geologicznych i rozbudowany system wodonośny Holandii utworzyły tam wyjątkowo korzystne warunki do rozpowszechnienia tej branży płytkiej geoenergetyki. Dynamiczny rozwój holenderskiej branży LT-ATES nie budził dotychczas dużego zainteresowania w Polsce, gdzie nadal brakuje chociażby projektów demonstracyjnych w tym zakresie. Próbuąc to wyjaśnić, eksperci nie zawsze słusznie odwołują się do różnic warunków geologicznych między obydwoma krajami. Pozostaje jednak faktem, że poza regionami świata typowo przydatnymi dla zastosowań metody LT-ATES, może ona lokalnie otworzyć nowe perspektywy w odniesieniu do waloryzacji energetycznej wód podziemnych, nawet na terenach o złożonej budowie geologicznej, która cechuje na przykład obszary młodoglacjalne Pojezierza Kaszubskiego i Wysoczyzny Żarnowieckiej. Zważywszy na wysoką zmienność przestrzenną płytkich utworów geologicznych w podobnych obszarach, można śmiało sformułować hipotezę, iż warunki geologiczne wewnątrz samej jednostki geomorfologicznej mogą być lokalnie korzystne lub niekorzystne dla magazynowania ciepła metodą LT-ATES. Przestrzenna rozdzielczość analizy obszarowej, wykonanej w celu rozpoznania hydrostruktur przydatnych dla takiego magazynowania ciepła, ma pod tym względem duży wpływ na otrzymane wyniki.

2. UWARUNKOWANIE MAGAZYNOWANIA CIEPŁA METODĄ ATES NA WYSOCZYŹNIE ŻARNOWIECKIEJ

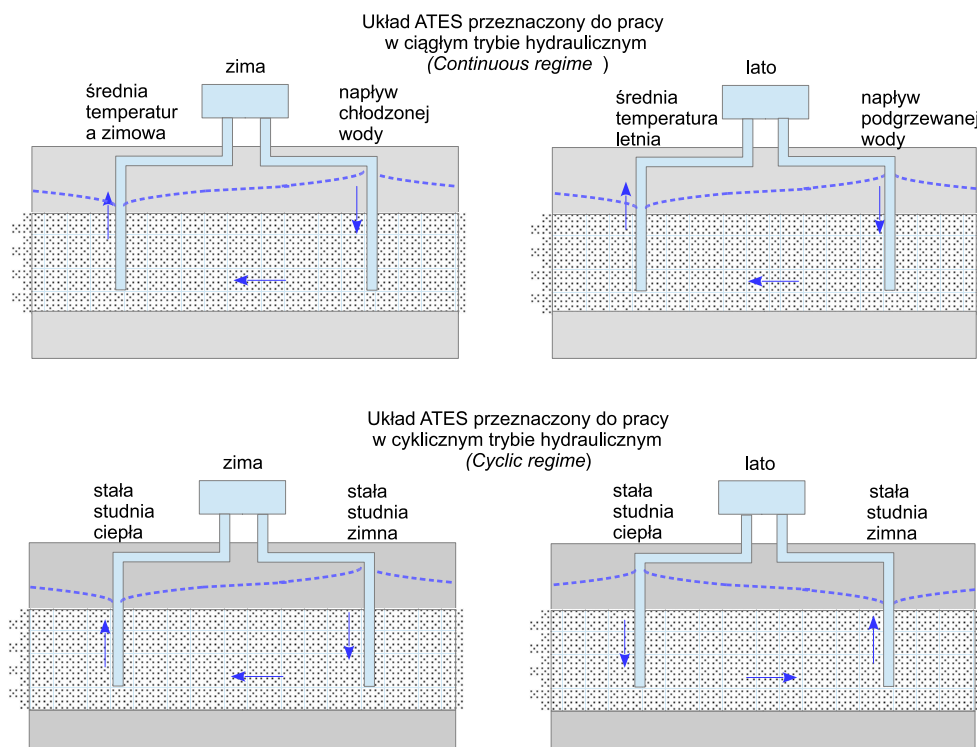
W podstawowej klasyfikacji systemów ATES Nielsen (2003) odróżnia dwie kategorie instalacji (rys. 1) w zależności od trybu hydraulicznego pracy instalacji studziennych:

- instalacje przeznaczone do pracy w cyklicznym trybie,
- instalacje przeznaczone do pracy w ciągłym trybie.

W zależności od poziomu energetycznego magazynowanej energii wyróżniono dwie kategorie termiczne instalacji ATES (Lee 2010; Kranz i in. 2015):

- 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 instalacji obejmują nie tylko ogrzewanie, ale również chłodzenie pomieszczeń z możliwością kombinowania 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 60°C – zastosowania tej podkategorii instalacji obejmują tylko ogrzewanie.

Jako sezonowe magazynowanie ciepła (STES) w pracy rozpatrywano tylko systemy ATES z pierwszej wymienionej przez Nielsena kategorii hydraulicznej. Takie systemy w rzeczywistości, z zastrzeżeniem istnienia odpowiednich warunków hydrogeologicznych na miejscu, wykazują z reguły wyższą wydajność energetyczną niż systemy z drugiej kategorii (Ausseur i Sauty 1982). W odniesieniu do kategorii termicznej, w innej publikacji, autor zwrócił uwagę na specyficzne uwarunkowania magazynowania ciepła metodą ATES na obszarach młodogłacjalnych Polski północnej (Lemoine 2016). Dotyczy to Pojezierza Kaszubskiego, ale również Wysoczyzny Żarnowieckiej. W tych mezoregionach (Kondracki 2002) zagłębienie izotermy 20°C poniżej 800 m p.p.t. jest efektem plejstoceńskich zlodowaceń (Szewczyk 2010) i nie powoduje korzystnych warunków dla wykorzystania ciepła Ziemi klasyczną metodą niskotemperaturową. Konwencjonalne Gruntowe Pompy Ciepła (GPC) w układzie hydraulicznym zamkniętym (GSHPs: *Ground Source Heat Pumps*) są bowiem przeważnie przeznaczone w rzeczywistości do ogrzewania. Natomiast w przypadku priorytetowego zapotrzebowania na wysoką moc chłodniczą obszary młodogłacjalne mogą okazywać się lokalnie szczególnie perspektywiczne dla instalacji GPC pracujących w warstwie wodonośnej (GWHPs: *Ground Water Heat Pumps*), z uwagi na rozbudowane systemy wodonośne już naturalnie chłodzone. W tym ujęciu Wysoczyzna Żarnowiecka jest mezoregionem perspektywicznym dla magazynowania ciepła metodą LT-ATES (*Low Temperature Aquifere Thermal Energy Storage*). Zważywszy, że przypowierzchniowe warstwy wodonośne o zwierciadle swobodnym są na ogół mało przydatne dla magazynowania ciepła – m.in. z uwagi na niską izolację termiczną od powierzchni i stosunkowo wysoką prędkość przepływu wody, wykonano analizę możliwości magazynowania ciepła w odniesieniu do naporowych warstw wodonośnych. W obrębie Wysoczyzny Żarnowieckiej najbardziej dostępną hydrostrukturą spełniającą to podstawowe wymaganie dla cyklicznych systemów LT-ATES jest drugi (głębszy) międzymorenowy poziom wodonośny.



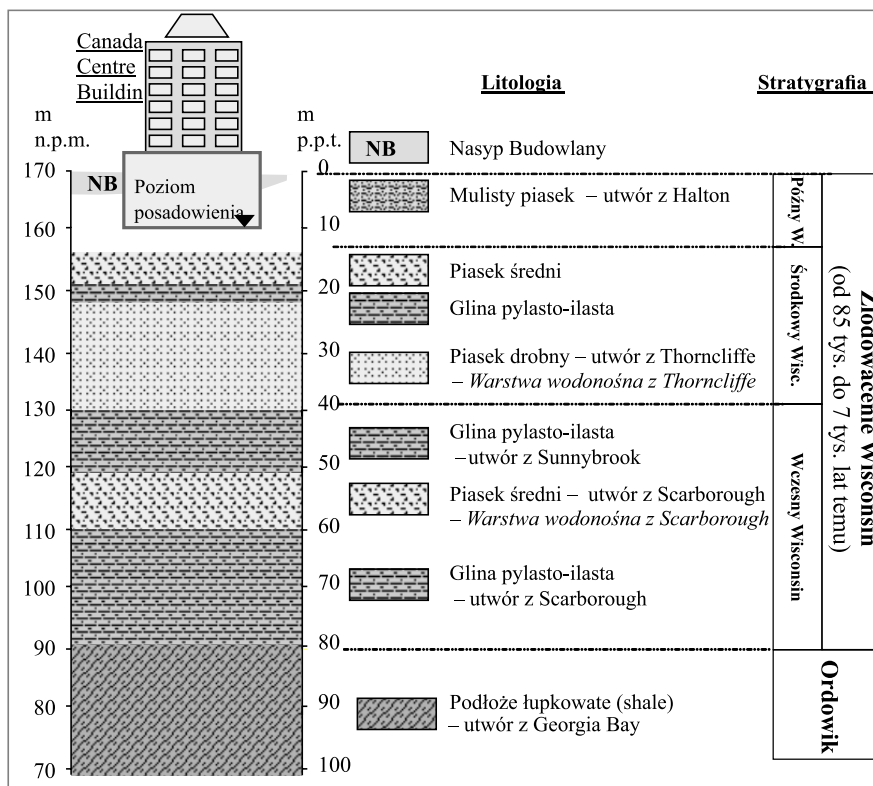
Rys. 1. Podstawowe pojęcia projektowe instalacji ATES (Źródło: Nielsen 2003)

Fig. 1. ATES installatios basic design concepts (Source: Nielsen 2003)

2. SYSTEM LT-ATES CANADA CENTER BUILDING W SCARBOROUGH JAKO PRZYKŁAD INWESTYCJI NA OBSZARACH MŁODOGLACJALNYCH

Projekt ATES powstał w kanadyjskiej gminie Scarborough w pobliżu Toronto w latach osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych XX wieku, w ramach inwestycji wielkiego biurowca Canada Center Building. Będąc pierwszym projektem tego rodzaju w Kanadzie, został wdrożony jako dodatkowy moduł energetycznego bazowego systemu HVAC (ang. *Heating, Ventilation, Air Conditioning*, pol. COWiG – ciepłownictwo ogrzewnictwo wentylacja i gazownictwo). Uwarunkowania klimatyczne dla tej inwestycji były reprezentatywne także dla całego regionu Toronto. Klimat jest kontynentalny i wilgotny, cechuje się łagodzącym wpływem wielkiego jeziora Ontario, ze średnią temperaturą w styczniu i lipcu odpowiednio $-6,3$ i $20,8^{\circ}\text{C}$.

Budowa geologiczna przypowierzchniowych warstw rejonu inwestycji (rys. 2) pod wieloma względami posiada pewne podobieństwa do budowy geologicznej Wysoczyzny Żarnowieckiej. Można wymienić:



Rys. 2. Schematyczny przekrój geologiczny terenu pod inwestycją Canada Center Building w Scarborough blisko Toronto (Źródło: Mirza i in. 1985, zmodyfikowane)

Fig. 2. Schematic Geological cross-section in the area of the Canada Center Building in Scarborough near Toronto (Source: Mirza et al. 1985, modified)

- korelację stratygraficzną między zlodowaczeniem Wisły (115 tys.–11,7 tys. lat BP) i zlodowaczeniem Wisconsin (85 tys.–7 tys. lat BP), tj. w obu przypadkach w górnym plejstocenie, co jest wyrażone młodogłacjalnym charakterem rzeźby z dominującą formą moreny dennej;
- miąższość utworów czwartorzędowych 50–150 m;
- rzędne wysokości względne terenów nad poziomem głównych regionalnych stref drenażu, tj w Polsce ok. 100 m w odniesieniu do poziomu Morza Bałtyckiego, oraz w Kanadzie 75 m w odniesieniu do poziomu Jeziora Ontario;
- podobieństwa litofacjalne zaznaczone w sedymentacji ogniwami typowo glacialnymi, rzecznołodowcymi lub zastoiskowymi, reprezentowanymi odpowiednio przez gliny piaszczyste, piaski o różnych profilach uziarnienia i/lub osady pylaste;
- dwudzielną strukturę systemu czwartorzędowego piętra wodonośnego.

Główna różnica w budowie geologicznej między regionem kanadyjskim a Wysoczyzną Żarnowiecką polega głównie na odmienności budowy podłoża pokrywy czwartorzędowej.

W pierwszym przypadku podłoże jest skaliste i nieprzepuszczalne. Zbudowane jest ono z czarnych łupków gazonośnych (*shale*) należących do ordowiku górnego (Mirza i in. 1985). W drugim przypadku podłoże tworzą utwory luźne i mało lub słabo przepuszczalne oligoceńskie mułki i piaski drobnziarniste glaukonitowe (MHP 2000).

Hydrostruktura wybrana do magazynowania ciepła na potrzeby wspomnianego powyżej systemu HVAC należy do drugiego poziomu wodonośnego w utworach czwartorzędowych. Zbudowana jest z równoziarnistych piasków średnich z formacji deltowej paleo-jeziora Scarborough, która została datowana na ok. 90 tys. lat. BP. Charakterystykę tej warstwy wodonośnej zwanej warstwą Scarborough zestawiono poniżej (tab. 1) na podstawie danych Hickling Management Consultants Limited (1989). Warstwę tę wybrano z uwagi na korzystny w niej współczynnik filtracji. Niska temperatura wody wskazywała, że optymalna wydajność energetyczna systemu LT-ATES, ujmującego wodę z tej warstwy, powinna być osiągnięta w trybie chłodzenia. W tym systemie ciepło do ogrzewania miało pochodzić z odpadowego źródła, tj. z procesu chłodzenia. Niekorzystnymi parametrami dla działania lokalizacji systemu ATES w regionie nadjeziornym były:

Tabela 1

Charakterystyka Warstwy Wodonośnej Scarborough wybranej dla projektu ATES pt Canada Center Building w Scarborough

Table 1

Characteristics of the Scarborough Aquifer targeted for the project of the Canada Center Building in Scarborough (Source: Hicking Management Consultants 1989, modified)

Charakterystyka morfologiczna, właściwości fizyczne i termiczne warstwy piaszczystej, hydrodynamika			
Wysokość bezwzględna [m n.p.m.]	120	Wysokość nad jeziorem Ontario [m]	45
Głębokość [m p.p.t.]	50	Miąszość [m]	8–12
Wysokość piezometryczna (nad warstwą) [m]	30	Temperatura naturalna [°C]	9,1
Przewodność cieplna [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	1,56	Objętoś. pojemność cieplna [$MJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$]	2,41
Gęstość ośrodka skalnego [$10^3 \text{ kg} \cdot m^{-3}$]	2,67	Porowatość [-]	0,28
Współczynnik filtracji [$10^{-4} \cdot m \cdot s^{-1}$]	1,5–2,5	Współczynnik przewodności [$m^2 \cdot d^{-1}$]	127–210
Regionalna prędkość przepływu [$m \cdot rok^{-1}$]	24	Współczynnik zasobności [$\cdot 10^{-4}$]	2·1–7
Stała dyspersji [m]	0,02–0,26	Potencjalna wydajność (2 studni) [m^{-3}/h]	300–360
Parametry fizykochemiczne i hydrochemiczne			
Całkowita zawartość substancji rozpuszczonych [$mg \cdot dm^{-3}$]	300	pH [-]	7,8
		Stężenie rozpuszczonego $CaCO_3$ [$mg \cdot dm^{-3}$]	250
Stężenie rozpuszczonego żelaza [$mg \cdot dm^{-3}$]	>0,5 i < 1	Stężenie rozpuszczonego metanu [$mg \cdot dm^{-3}$]	11 000

Źródło: Hickling Management Consultants Limited 1989, zmodyfikowane.

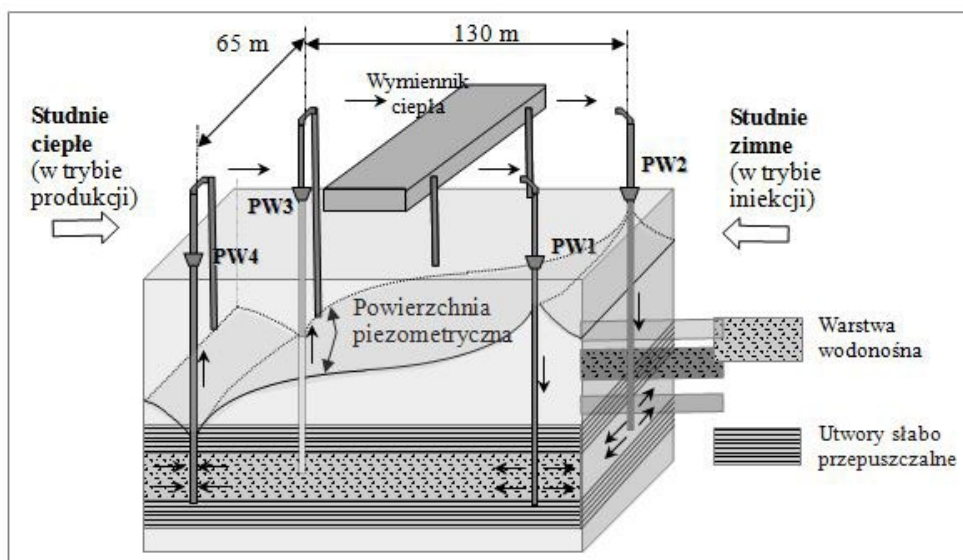
- znaczna prędkość regionalnego przepływu wód podziemnych – rzędu 25 m/rok;
- twardość wody z zawartością CaCO_3 wynoszącą $50 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$;
- bardzo wysokie stężenie metanu, tj. metanu termogenicznego emitowanego z łupkowego podłoża osadów czwartorzędowych i migrującego naturalnie do warstwy wodonośnej.

Bazowy system HVAC miał obsługiwać duży biurowiec o powierzchni użytkowej $30\,000 \text{ m}^2$ i pracujących w nim 1900 osób. Przewidywano wysoki udział dwuszybowej powierzchni oszklonej budynku – ok. 35% elewacji, jako podstawę dla klimatyzacji opartej na pasywnym wykorzystaniu energii słonecznej i na oddzielnym zagospodarowaniu powietrza zewnętrznego. Według tej koncepcji bazowe zapotrzebowania energetyczne cieplne nie byłyby pokrywane w trybie ogrzewania, ale w trybie chłodzenia. Zgodnie z tą koncepcją, biorąc ponadto pod uwagę wysoką gęstość obsady osób na metr kwadratowy w pomieszczeniach podczas godzin pracy, szczytowe zapotrzebowanie na chłodzenie i na ogrzewanie zostało oszacowane odpowiednio na 2560 i 1320 kW (Mirza i in. 1985). Po zrównoważeniu obciążeń energetycznych wewnątrz tego obiektu, roczne zapotrzebowanie miało wynosić ok. 3500 MWh, w tym ok. 1100 MWh na potrzeby ogrzewania i produkcji c.w.u., oraz 2400 MWh na potrzeby chłodzenia (Hickling Management Consultants Limited 1989). Spodziewano się wysokiego zapotrzebowania na chłód nawet w okresach zimowych, kiedy byłaby dalej potrzebna regulacja temperatury urządzeń komputerowych centralnej jednostki. Obliczono je na 6170 kWh na dobę. Zatem zimowe zapotrzebowanie miało pochłaniać prawie połowę przeznaczoną do zużycia energii ($12\,563 \text{ kW/d}$).

Układ hydrauliczny prototypu systemu LT-ATES w Scarborough (rys. 3) zawierał dwie pary studni o średnicach 355 mm. Każda studnia z poszczególnych par miała pracować cyklicznie w trybie iniekcji lub produkcji w zależności od sezonowych zapotrzebowań na chłodzenie.

Po osiągnięciu optymalnego obłożenia budynku Center współpracująca z systemem HVAC woda warstwy wodonośnej miała być zagospodarowana zimą zgodnie z uproszczonym dwufazowo-sezonowym cyklem termodynamicznym. Sezonowe warunki eksploatacyjne instalacji LT-ATES opisano pokrótce w tabeli 2.

Wykonana przez Hickling Management Consultants Limited (1989) symulacja współpracy systemu LT-ATES z systemem HVAC nie będzie tu poruszana. Wiadomo jednak, że przy próbnej eksploatacji systemów od 1985 do 1988 r. symulacja ta nie mogła być sprawdzona. Głównym powodem tego utrudnienia okazał się niski stopień obłożenia obiektu, co wywołało większe zapotrzebowanie na ogrzewanie niż na chłodzenie, tzn. zapotrzebowanie całkowicie odwrotne do wejściowych ustaleń symulacji. Drugim niepożądanym efektem było przyśpieszone starzenie się urządzeń hydraulicznych na skutek dodatkowego obciążenia układu ATES-HVAC w trybie aktywnego ogrzewania przy obniżonej efektywności energetycznej. Spadek jednostkowej wydajności efektywnej studni, szczególnie dla zimnych studni od 1985 do 1992 r., sięgał nawet 72% w przypadku studni PW1. Z tego powodu dalsza eksploatacja prototypu LT-ATES po kilkuletnim okresie próbnym nie była już prowadzona. Ten eksperyment pokazywał jednak, że efektywność energetyczna inwestycji LT-ATES



Rys. 3. Schemat ideowy układu hydraulicznego LT-ATES stosowane Canada Center, Scarborough, Ca, w zimowym trybie działania (Źródło: Mirza 1993, zmodyfikowane)

Fig. 3. Schematic diagram of the LT-ATES hydraulic system used by the Canada Center, Scarborough, Ca, in winter operation mode (Source: Mirza 1993, modified)

Tabela 2

Sezonowe warunki eksploatacyjne instalacji LT-ATES w Canada Center, Scarborough

Table 2

Seasonal operating conditions of the LT-ATES installation at the Canada Center, Scarborough

Segment systemu	Faza zimowa	Faza letnia
Ciepłe studnie PW3 i PW4	Wypompowanie podgrzewanej wody o temperaturze 12°C na głowicy	Iniekcja do warstwy wodonośnej wody podgrzewanej do temperatury w zakresie 12–15°C*
Wymiennik ciepła	Chłodzenia wody w trybie pasywnym lub aktywnym za pomocą GPC woda-woda przy ΔT ok. 9 K	Pasywne ogrzewanie wody w ramach jej wykorzystania do klimatyzacji biurowca przy ΔT 7–10 K
Zimne studnie PW1 i PW2	Iniekcja do warstwy wodonośnej schłodzonej wody do temperatury ok. 3°C	Wypompowanie wcześniej schłodzonej wody o temperaturze 5°C na głowicy

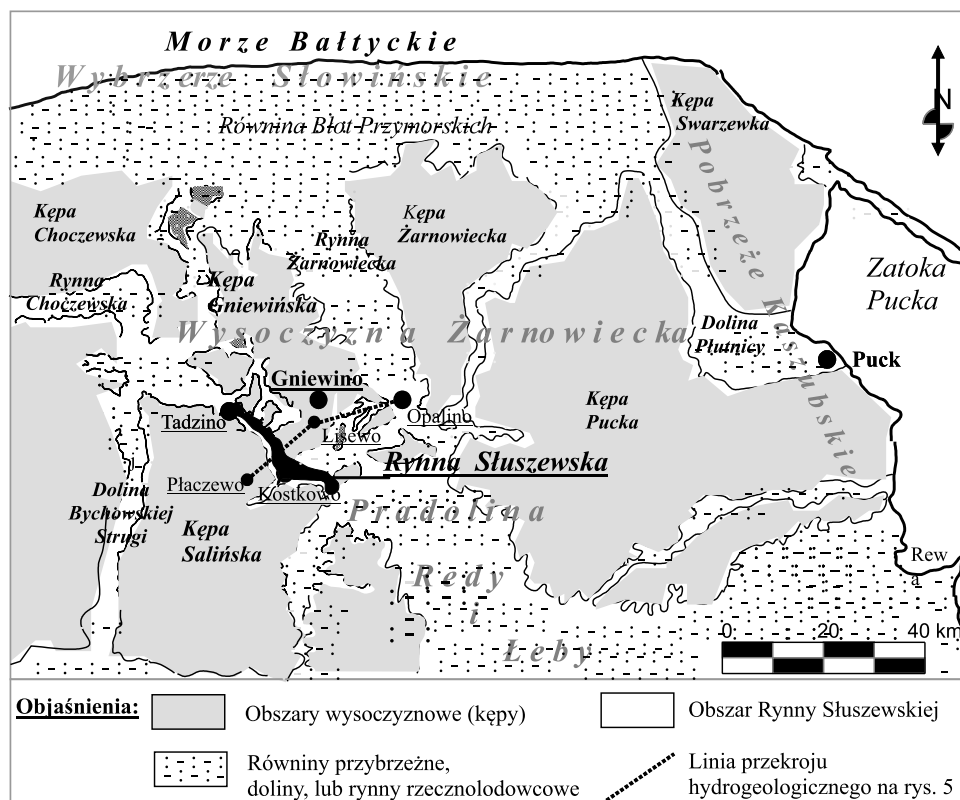
* W zależności od zapotrzebowania, aby utrzymać równowagę termiczną warstwy wodonośnej.

Źródła: Hickling Management Consultants Limited, 1989, zmodyfikowane.

jest w dużej mierze uwarunkowana rzeczywistymi ramami ekonomicznymi projektu, a nie tylko lokalnymi warunkami hydrogeologicznymi.

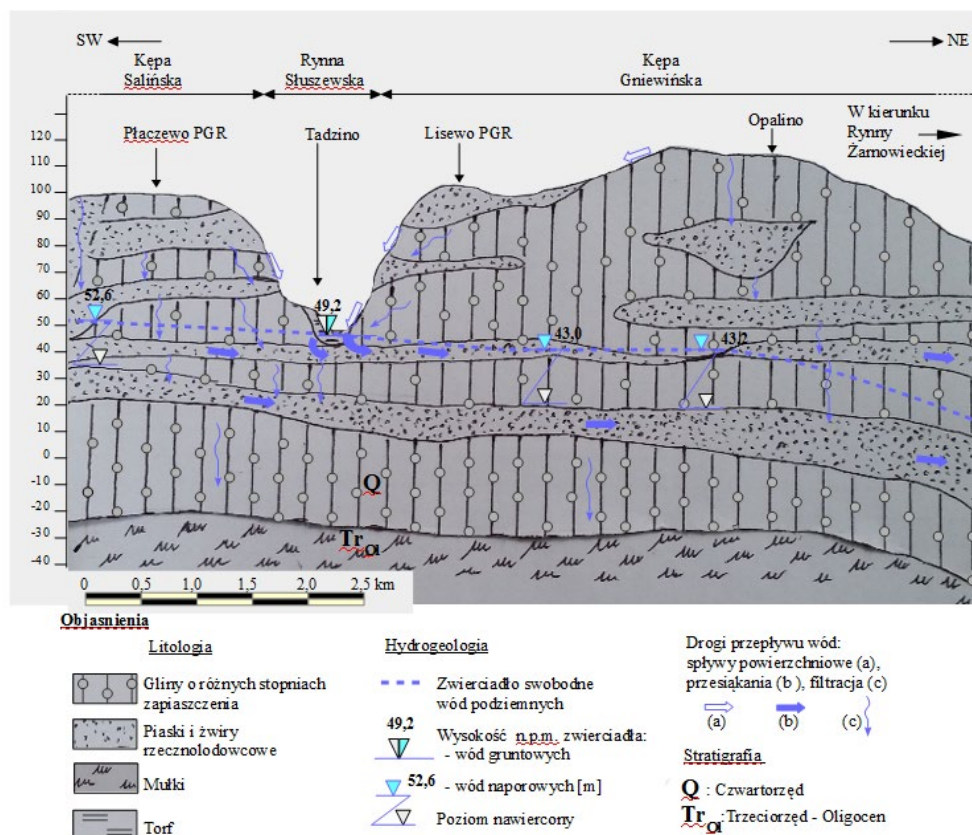
3. ZAKRES WYKONALNOŚCI INSTALACJI LT-ATES CELEM PRODUKCJI CIEPŁA I CHŁODU W RYNNIE SŁUSZEWSKIEJ – WYSOCZYŻNA ŻARNOWIECKA

W celu testowania metodyki oceny potencjału dla systemu ATES w konfiguracji hydrogeologicznej obszarów młodoglacjalnych występujących na Niziu Polskim wybrano górny odcinek Rynny Słuszejskiej. Rynna znajduje się w województwie pomorskim w południowej części Wysoczyzny Żarnowieckiej (Kondracki 2002), gdzie rozciąga się wzdłuż osi WNE-ESE między Kępą Gniewińską ze strony północnej a Kępą Salińską ze strony południowej (rys. 4). We wcześniejszej pracy (Lemoine 2017) wytypowano ten obszar jako perspektywiczny dla zastosowania sezonowego systemu LT-ATES pracującego w trybie cyklicznym z uwagi na dobrą dostępność drugiego poziomu czwartorzędowego piętra wodonośnego (rys. 5).



Rys. 4. Szkic lokalizacji Rynny Słuszejskiej na tle jednostek geomorfologicznych występujących w obrębie Wysoczyzny Żarnowieckiej

Fig. 4. A sketch of the location of the Słuszejska Ice-Marginal Valley against the background of geomorphological units occurring within the Żarnowiec Morainic Plateau



Rys. 5. Szkic pionowego układu krążenia wód podziemnych na tle schematycznego przekroju hydrogeologicznego Rynny Śluszevskiej w rejonie Jęczewo-Tadzino-Lisewo (Źródło danych: Ojaśnienia MHP, arkusz 05 – Ślawoszyno, N-33-37C)

Fig. 5. Sketch of the vertical components of groundwater flow with, in the background, schematic hydrogeological cross-section of Śluszevska Ice-Marginal Valley in the vicinity of Jęczewo-Tadzino-Lisewo (Data source: explicative note of the Hydrogeological Map of Poland, sheet 05 – Ślawoszyno, N-33-37C)

Charakterystykę hydrogeologiczną omawianej warstwy wodonośnej zaprezentowano w tabeli 3. Prędkość naturalnego przepływu wody mieści się w niej w granicach $3\text{--}25 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$, tj. ok. $1\text{--}8 \text{ m} \cdot \text{r}^{-1}$. Prowadząc stymulację termiczną tej warstwy na potrzeby eksploatacji sezonowego magazynowania ciepła LT-ATES, można spodziewać się przesunięcia termicznej strefy o zmienionej temperaturze. Aby oszacować bezwymiarową wartość tego przesunięcia δ w stosunku promienia termicznego, wykorzystano wzory poniżej (Courtois i in. 2007):

$$\delta = \frac{d_{TH}}{R_{TH}} \quad z \quad d_{TH} = v_{TH} = v \cdot \frac{C_{v-w}}{C_{v-aquif}} \cdot \tau$$

gdzie:

- d_{TH} – długość przemieszczenia frontu termicznego [m/s],
- R_{TH} – prędkość przemieszczenia frontu termicznego [m/s], wzór obliczeniowy w tab. 4,
- v – prędkość Darcy'ego przepływu warstwy wodonośnej ($3\text{--}25 \cdot 10^{-8}$ m/s),
- C_{v-w} – objętościowa pojemność ciepła wody ($4,187 \cdot 10^6$ J/(m³·K)),
- $C_{v-aquif}$ – objętościowa pojemność ciepła warstwy wodonośnej ($2,67 \cdot 10^6$ J/(m³·K)),
- τ – półcykl pracy określonego urządzenia hydraulicznego, [s], (6 miesięcy)

W niniejszym przypadku promień termiczny podziemnych magazynów wynosiłoby 54 m, a przesunięcie termiczne związane z naturalną prędkością wód podziemnych od 1,42 do 11,4% (tab. 4). Na bazie statystyki Gringartena i in. (1980) oszacowano współczynnik redukcyjny efektywności energetycznej η_δ związany z tym przesunięciem. Współczynnik ten wynosi od 0,95 do 0,98, tj. ponad 0,10 powyżej wartości dopuszczalnej. Z powyższego wynika, że analizowana hydrostruktura spełnia podstawowe wymaganie hydrodynamicznego systemu LT-ATES mimo granicznej wartości promienia termicznego. Bowiem według Ausseura i Sauty'ego (1982) ten ostatni wskaźnik powinien osiągnąć co najmniej 55 m.

W porównaniu z opisaną w poprzednim rozdziale warstwą Scarborough występującą w pobliżu Toronto rozpatrywana tu warstwa wykazuje następujące korzystniejsze warunki:

- jest bardziej dostępna, ze stropem na ok. 30 m p.p.t. (50 m w Scarborough);
- cechuje się stosunkowo niską hydrodynamiką: warstwa jest prawie stojąca z prędkością przepływu w granicach $1\text{--}10$ m·r⁻¹ (24 m·r⁻¹ w Scarborough);
- ma lepsze parametry hydrochemiczne: umiarkowana zasadowość ze stężeniem rozpuszczonego CaCO₃ w granicach ok. $45\text{--}85$ mg·dm⁻³ (250 mg·dm⁻³ w Scarborough), stosunkowo niskie stężenie żelaza, brak rozpuszczalnego metanu w wodzie (w warstwie wodonośnej Scarborough stężenie metanu w wodzie jest bardzo wysokie, wynosi $11 \cdot 10^3$ mg·dm⁻³).

Tylko współczynniki filtracji warstwy są tutaj nieco mniej korzystne. W badanym tu odcinku Rynny Słuszewskiej wahają się od $3,9 \cdot 10^{-5}$ m·s do $31,1 \cdot 10^{-5}$ m·s. W warstwie wodonośnej Scarborough wartość tego parametru mieści się w granicach ok. $15\text{--}25 \cdot 10^{-5}$ m·s.

W tabeli 4 zaprezentowano charakterystykę przestrzenną i termodynamiczną otwartych zbiorników podziemnych systemu LT-ATES, które można utworzyć stymulacją termiczną w tej warstwie wodonośnej. Charakterystykę tę można porównać z charakterystyką zbiorników takiego samego rodzaju stymulowanych we Francji w latach siedemdziesiątych XX w. (Gringarten i in. 1979). Stwierdzono wstępnie, że uwarunkowania dla metody ATES w odniesieniu do analizowanego wodonośca są średnio korzystne. Szczególnie korzystna jest liczba Pecleta, która opisuje płaski zbiorniki. Korzystna jest też liczba Λ , która opisuje sezonowe wymiany ciepła między nadkładem a warstwą wodonośną. Opierając się na tych bezwymiarowych liczbach, które wynoszą w przybliżeniu: $Pe = 100$; $\Lambda = 10$; $\epsilon > 5$, wykonano symulację komputerową sezonowego magazynowania ciepła. Symulacja ta obejmuje 6 lat teoretycznej eksploatacji Jednostkowego Modułu Cyklicznego LT-ATES (JMC LT-ATES) w rozumieniu teoretycznej dwu-otworowej instalacji LT-ATES pracującej w cyklicznym try-

Tabela 3

Charakterystyka hydrogeologiczna drugiego (głębszego) poziomu międzymorenowego w Rynnie Szuszeńskiej

Table 3

Hydrogeological characteristics of second (deeper) intermoraine aquifer in the Szuszeńska Ice-Marginal Valley

Lokalizacja: Obręb geodezyjny Tadzino, gmina Gniewino, pow. wejherowski, woj. pomorskie										
Geologia							Morfometria			
Typ warstwy	stratygrafia:		geneza:	litologia:			miąższość [m]	strop/sprag		
Poziom międzymorenowy	czwartorzęd, późny plejstocen		rzeczno-lodowcowa	piasek: drobny dominujący				[m p.p.t.]	[m n.p.m.]	
							10,3	22,7/33,0	27,3/17,0	
Hydrogeologia: cechy wodonośca <i>Zwierciadło wody</i>										
Typ przepuszczalności	Współczynnik filtracji $k_f [10^{-5} \cdot m \cdot s^{-1}]$			Przewodność hydrauliczna $T [10^{-5} \cdot m^2 \cdot s^{-1}]$			Typ	Poziom piezometryczny		
Porowy	k_f min.	k_f maks.	k_f średni	T min.	T maks.	T średni	napięty	[m p.p.t.]	[m n.p.m.]	
	3,9	31,1	17,5	40,1	320,0	180,5		2,1	47,9	
Gradient hydrauliczny warunki: $\Delta_H = -2,5$ m, $\Delta_L = 3100$ m $i [-]$,		Teoretyczna prędkość przepływu w warstwie:						Typ dynamiki	Kierunek przepływu WSW→ENE – SSW→NNE	
		sekundowa $v_s [10^{-8} m \cdot s^{-1}]$			roczna: $v_r [m \cdot r^{-1}]$.					
8 · 10 ⁻⁴		min.	maks.	śred.	min.	maks.	śred.	lekko płynąca		
		3,1	24,9	14,0	0,98	7,85	4,41			
Spodziewana wydajność poziomu wodonośnego: 20 m ³ /h przy ustalonym dopływie do studni o promieniu 40 cm										
Miąższość poziomu wodonośnego: 9 m < m < 11 m		Miąż. poziom. wodon. m [m]	Depres. wody w studni s [m]	Promień zasięgu studni R [m]			Wydajność hydrauliczna Q [m ³ · h ⁻¹]			
Depresja wody w studni (pełnej): 1 m < s < 15 m				R _{min}	R _{maks}	R _{śred.}	Q _{min}	Q _{maks}	Q _{śred.}	
Wzory obliczeniowe w konfiguracji naporowej:		9	1,0	18,7	52,9	39,7	2,1	13,0	7,5	
			3,0	56,2	158,7	119,1	4,8	31,8	18,3	
			5,0	93,7	264,5	198,4	7,3	48,8	28,0	
Wydajność studni (wzór Dupuit-Thiema) $Q = \frac{2,73 \cdot k_f \cdot s \cdot m}{\log \frac{R}{r}} [m^3/s]$		10	1,0	18,7	52,9	39,7	2,3	14,4	8,4	
			3,0	56,2	158,7	119,1	5,4	35,3	20,3	
			5,0	93,7	264,5	198,4	8,1	54,2	31,1	
Promień zasięgu studni (wg Sichardt) $R = 3000 \cdot s \cdot \sqrt{k_f} [m]$		11	1,0	18,7	52,9	39,7	2,5	15,8	9,2	
			3,0	56,2	158,7	119,1	5,9	38,8	22,4	
			5,0	93,7	264,5	198,4	8,9	59,6	34,0	
Charakterystyka fizykochemiczna wód wodonośca										
Typ hydrochemiczny: HCO ₃ -Ca (wody wodorowęglanowo-wapniowe), woda niskozmineralizowana, lekko zasadowa, mało żelazisto-manganowa Cecha tła regionalnego: podwyższone stężenie chlorków Geneza: przeważnie syndementacyjna z zasoleniem rezydualnym						Zastosowania: Wody nieagresywne ani dla betonu, ani dla metali, ponadto szczególnie przydatne do zaopatrzenia w wodę pitną				

Tabela 4

Charakterystyka przestrzenna i termodynamiczna zbiorników Jednostkowego Modułu Cyklicznego LT-ATES w lokalnej strefie górnego odcinka Rynny Słuszeńskiej

Table 4

Spatial and thermodynamical characteristics of the two energy storages of Cyclic Unitary Modul LT-ATES in the upper section of the Słuszeńska Ice-Marginal Valley

Charakterystyka ogólna (przypomniana)			Charakterystyka termodynamiczna		
m_{aquif} Miąższość (3 hipotezy) [m]	V (objętość hydrauliczna) [m ³]	R_{TH} Promień termiczny [m]	Liczba Pe (stosunek konwekcja/ dyfuzja) [-]	Liczba Λ (wymiany ciepła zbiorniki/nadkład) [-]	Liczba ε (bezwymiarowa miąższość nadkładu) [-]
9	52 704	54	99	9,2	5,7
10	58 464	54	99	11,3	5,7
11	64 512	54	99	13,7	5,7

Objaśnienia:
 V : Objętość wody, którą można technicznie ująć lub tłoczyć w obiegu w ciągu połowy cyklu termodynamicznego (6 miesięcy w przypadku sezonowych systemów LT-ATES). Ta ilość zależy od efektywnego czasu pracy urządzeń hydraulicznych i wydajności studni w warunkach zrównoważonej eksploatacji. Jest ona obliczana za pomocą wzoru:

$$V = V_c = V_z = Q \cdot t_{c/2} \quad [\text{m}^3]$$

gdzie:
 V_c – objętość zmagazynowanej ciepłej wody [m³]; V_z – objętość zmagazynowanej zimnej wody [m³], Q – średnia wydajność studni podczas iniekcji [m³/h], $t_{c/2}$ – czas pracy pompy głębinowej w trybie magazynowania podczas półcyklu rocznego [h].

$$R_{TH} = \sqrt{\frac{C_{v-w} \cdot V_{inj}}{C_{-aquif} \cdot \pi \cdot m_{aquif}}} \quad [\text{m}^3]$$

R_{TH} : Promień termiczny właściwy podziemnych zbiorników, tj. orientacyjny zasięg podziemnych zbiorników. Przy obliczeniu tego wskaźnika wykorzystuje się wzór Ausseura i Sauty'ego (1982) odnośnie do tłokowego (cylindrycznego) modelu stymulacji hydrotermicznej warstwy wodonośnej.

$$Pe = \frac{Q_f}{2\pi \cdot m_{aquif}} \cdot \frac{C_{v-w}}{\lambda_{aquif}}, \quad \Lambda = \frac{C_{v-w} \cdot C_{v-aquif}}{m_{aquif}} \cdot \frac{Q_f}{m_{aquif}}, \quad \varepsilon = \frac{m_{cap}}{d_{DTH-cap}} = \frac{m_{cap}}{\sqrt{\frac{\lambda_{cap}}{C_{v-cap}} \cdot \tau}}$$

gdzie:
 C_{v-w} – objętościowa pojemność ciepła wody [MJ · m⁻³ · K⁻¹]; V_{inj} – ilość wody tłoczona podczas półcyklu [m³];
 T_i – temperatura iniekcji wody [°C]; m_{aquif} – miąższość efektywna warstwy wodonośnej [m]; $C_{v-aquif}$ – objętościowa pojemność ciepła warstwy wodonośnej [MJ · m⁻³ · K⁻¹].

Pe , Λ i ε : wzory zaproponowane przez Ausseura i Sauty'ego (1982) w *Table des Symboles* w przypadku cyklicznych systemów ATES, gdzie odnosi się do wzorów stosowanych dla zbiorników pod pojedynczymi studniami.

Parametry do obliczeń z przyjętymi wartościami			
m_{aquif}	– miąższość poziomu wodonośnego: 9, 10, lub 11 m	m_{cap}	– miąższość pokrywy warstwy wodonośnej: 22,7 m
Q_f	– wydajność fikcyjna (średnia) studni [m^3/h]: 12,0, 13,3, lub 14,7 $m^3 \cdot h^{-1}$ *	λ_{cap}	– przewodność cieplna właściwa pokrywy: $2,00 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
R_{TH}	– promień termiczny iniekcji ciepłej wody: 54 m	C_{v-cap}	– objętościowa pojemność cieplna pokrywy: $2,00 \cdot 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
C_{v-w}	– objętościowa pojemność ciepłej wody $4,187 \cdot 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$	$d_{DTH-cap}$	– głębokość wnikania sygnału dyfuzji wodonośnej ciepłej w pokrywie [m]
$C_{v-aquif}$	– objętościowa pojemność ciepłej poziomu wodonośnego: $2,67 \cdot 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$	τ	– czas fikcyjny iniekcji: półcykl termodynamiczny: $1,5552 \cdot 10^7 \text{ s}$ (6 miesięcy).
λ_{-aquif}	– przewodność cieplna ciepłej poziomu wodonośnego: $2,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$		

* Odnosnie do wydajności efektywnej kolejno: 18,3, 20,3 i 22,4 $m^3 \cdot h^{-1}$ przy miąższości poziomu wodonośnego kolejno 9, 10 lub 11 m).

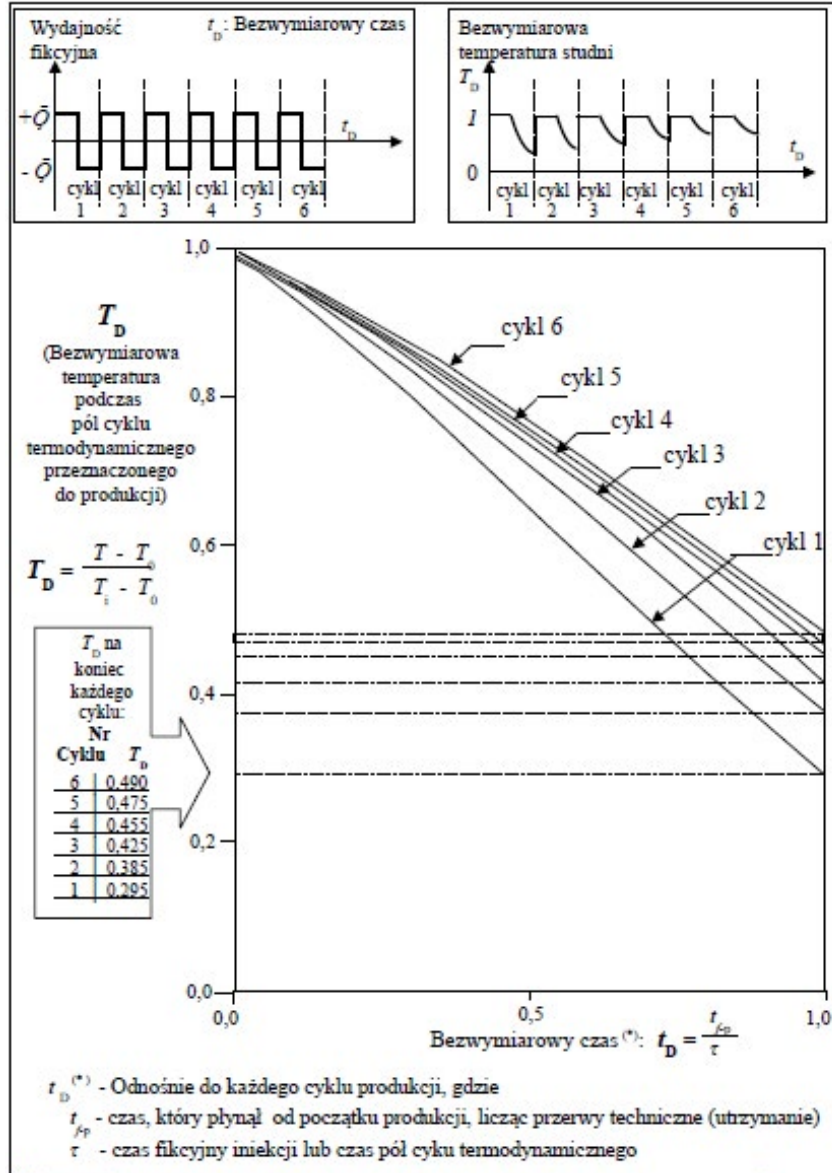
bie, z jedną stałą studnią ciepłą i jedną stałą studnią zimną. Zgodnie z zaleceniami Courtois i in. (2007) dla symulacji tego rodzaju założono, że przewidywany czas przestoju urządzeń hydraulicznych instalacji wynosi 4 miesiące rocznie, dokładnie 2 miesiące na każdą połowę cyklu termodynamicznego. W obliczeniach nie opierano się jednak na wydajności efektywnej studni podczas 4 miesięcy, ale na teoretycznej (w jęz. fr. zwana „fikcyjną”) wydajności studni, tj. średniej ważonej tego parametru na przestrzeni półcyklu termodynamicznego (6 miesięcy).

Pierwszy etap symulacji polegał na prognozie zmian bezwymiarowej temperatury (T_D) po stronie studni ciepłej z upływem bezwymiarowego czasu (t_D). Wykorzystując krzywe charakterystyczne dla $T_D = f(t_D)$, określone przez Gringartena i in. (1979), zastosowano metodę analogiczną: wybrano krzywe w zależności od wyżej obliczonych liczb Pe , Λ i ϵ . Te krzywe (rys. 6) pokazują, że w badanej tu konfiguracji termodynamicznej, sprawność energetyczna zbiorników jest stosunkowo niska podczas pierwszego cyklu termodynamicznego, kiedy nadkład i podłoże warstwy wodonośnej pochłaniają większość zmagazynowanej energii cieplnej. Podczas następujących cykli sprawność energetyczna wzrasta. Po pięciu cyklach termodynamicznych wzrost efektywności nie jest już wyraźny.

Drugi etap symulacji polegał na obliczeniu rzeczywistej temperatury otrzymanej w studni produkcyjnej – w tym przypadku wybrano temperatury ciepłej studni w chwili zakończenia cyklu produkcji. Zastosowano wtedy różne wartości $T_D = f(t_D)$ do określonych wartości temperatury wody zmagazynowanej w zakresie 12–30°C dla każdego cyklu termodynamicznego.

W trzecim etapie, opierając się na tych ostatnich wynikach, za pomocą wzorów zaproponowanych przez Courtois i in. (2013), wzory te zestawiono w tabeli 5, obliczono parametry wyjściowe procesu produkcji wody o podwyższonej temperaturze z płytkich zbiorników LT-ATES, są to:

- P_{th} teoretyczna moc cieplna, tj średnia ważona dla półcyklu termodynamicznego [MW],
- E_{th} ilość wyprodukowanej energii cieplnej [GJ],
- TR współczynnik odzysku ciepła [-].



Rys. 6. Zmiana bezwymiarowej temperatury w studni z upływem bezwymiarowego czasu w przypadku zbiorników podziemnych LT-ATES cechujących się $Pe = 100$ i $\Lambda = 10$ (Źródło: Gringarten i in. 1979)

Fig. 6. Dimensionless temperature evolution as a function of dimensionless time in the well in the case of underground heat storage LT-ATES characterized by $Pe = 100$ and $\Lambda = 10$ (Source: Gringarten et al. 1979)

Tabela 5

Parametry wyjściowe procesu produkcji wody o podwyższonej temperaturze z płytkich zbiorników podziemnych systemu LT-ATES cechujących się $Pe = 100$ i $A = 1$

Table 5

Output parameters of production process of the water with increased temperature from shallow underground storages LT-ATES characterized by $Pe = 100$ and $A = 1$

<p>P_{th}: Fikcyjna (średnia ważona) moc cieplna odzyskana:</p> $P_{th}^{\uparrow} = C_{v-w} \cdot Q_f \cdot T_s^{\Delta} - T_0 \cdot \eta_{\delta} \approx C_{v-w} \cdot Q_f \cdot \left \frac{T_e}{T_i} - T_0 \right \cdot \eta_{\delta} \quad [\text{W}]$	
<p>E_{th}: Energia magazynowana E_{th}^{\downarrow} i wypompowana i E_{th}^{\uparrow} w skali półcyklu termicznego τ:</p> $E_{th}^{\downarrow} = \int_0^{6 \text{ miesiacy}} P_{th}^{\downarrow}(t) dt \approx P_{th}^{\downarrow} \cdot \tau \quad [\text{J}], \quad E_{th}^{\uparrow} = \int_0^{6 \text{ miesiacy}} P_{th}^{\uparrow}(t) dt \approx P_{th}^{\uparrow} \cdot \tau \quad [\text{J}]$	
<p>TR: Wskaźnik odzyskiwania użytkowej energii cieplnej:</p> $TR = \frac{E_{th}^{\uparrow}}{E_{th}^{\downarrow}} = \frac{\int_0^{6 \text{ miesiacy}} P_{th}^{\uparrow}(t) dt}{\int_0^{6 \text{ miesiacy}} P_{th}^{\downarrow}(t) dt} \cdot \eta_{\delta} \approx 0,5 \left(1 + \frac{T_e - T_0}{T_i - T_0} \right) \cdot \eta_{\delta} \quad [-]$	
<p>gdzie:</p>	
<p>C_{v-w} – pojemność cieplna cieczy [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$], Q_f – teoretyczne natężenie przepływu wody z ciepłej studni w trakcie pompowania [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$], T_0 – pierwotna temperatura wody na głowicy (T warstwy wodonośnej) [$^{\circ}\text{C}$], T_s^{Δ} – temperatura wody podczas pompowania z studni ciepłej [$^{\circ}\text{C}$], T_i – temperatura wody na początku okresu pompowania (temperatura iniekcji) [$^{\circ}\text{C}$],</p>	<p>T_e – temperatura wody w końcu okresu pompowania, [$^{\circ}\text{C}$], τ – czas teoretycznej iniekcji: półcykl termodynamiczny: $1,5552 \cdot 10^7$ s (6 miesięcy), η_{δ} – współczynnik redukcyjny efektywności energetycznej związany z przesunięciem termicznym w zbiorniku podziemnym: $\eta_{\delta} = 0,95$.</p>

Przy obliczeniu pierwszego parametru stosowano uproszczony wzór z założeniem, że temperatura wypompowanej wody trafi na głowicę prawie regularnie wraz upływem czasu (rys. 6).

Poniżej podsumowane są główne wyniki przeprowadzonych obliczeń:

- P_{th} : średnia ważona moc cieplna wypompowanej wody podczas półcyklu termicznego waha się w zakresie:
 - $P_{th} = 33,1$ kW podczas 1. roku produkcji przy iniekcji wody o temperaturze 12°C ,
 - $P_{th} = 235,6$ kW podczas 6. roku produkcji przy iniekcji wody o temperaturze 30°C ,
- E_{th} : ilość energii cieplnej wypompowanej wody podczas półcyklu termicznego, waha się w zakresie:
 - $E_{th} = 523$ GJ podczas 1. roku produkcji przy iniekcji wody o temperaturze 12°C ,
 - $E_{th} = 3713$ GJ podczas 6. roku produkcji przy iniekcji wody o temperaturze 30°C .

- TR: współczynnik odzysku ciepła podczas kolejnych cykli termodynamicznych waha się w granicach:
 - 0,61 podczas 1. roku produkcji przy iniekcji wody o temperaturze 12°C,
 - 0,71 po zakończeniu 6. roku produkcji przy iniekcji wody o temperaturze 30°C.

W tabeli 6 wyszczególnione są zmiany temperatury teoretycznie produkowanej wody i użytkowej mocy instalacji, zmienne z upływem czasu. Wyniki symulacji komputerowej dla sześcioletniej pracy analizowanego JMC LT-ATES pozwalają sformułować następujące wnioski:

- Trzy pierwsze lata eksploatacji systemu kształtują przeważnie poziom temperatury wody po jego stronie cieplej w ciągu tych kolejnych lat pracy. Po tym okresie temperatura rośnie powoli.
- Odnosnie do temperatur tłocznej wody 12 i 15°C, średnia ważona moc cieplna osiąga prawie optymalną wartość, odpowiednio 38 i 70 kW, po czterech latach eksploatacji systemu.
- Współczynniki odzysku ciepła wahają się w granicach 61–71%, a po dwóch latach eksploatacji systemu przekraczają próg 68%, niezależnie od temperatury iniekcji, natomiast po sześciu latach wynoszą ok. 71%. Biorąc pod uwagę wartość graniczną 64% tego parametru (Gringarten i in. 1979), otrzymane wyniki są obiecujące dla magazynowania ciepła metodą LT-ATES.

Najniższa moc cieplna JMC LT-ATES obliczona w tej symulacji mieści się przedziale 31–38 kW, dotyczy systemu pracującego przy temperaturze iniekcji 12°C i jest raczej skromna w porównaniu do mocy cieplnej większości systemów ATES obecnie w użyciu w Holandii, gdzie megawatowa moc cieplna kilku JMC stanowi tam normę dla instalacji tego rodzaju. W tym kraju będącym światowym liderem w tej technologii, optymalną moc dla takich systemów szacuje się na 1,5 MW wyrażoną w mocy chłodniczej (Snijders i Aarssen 2003). Dla instalacji dużej mocy, jak również dla instalacji bardzo dużej mocy – np. do 20 MW, spodziewać się można jednostkowych kosztów inwestycyjnych na poziomie 200 €/kW. Poniżej 1,5 MW, te koszty instalacji rosną od 250 do nawet 450 €/kW w przypadku mocy chłodniczej odpowiednio 1,0 i 0,4 MW.

Z powyższego wynika, że w warunkach w Polsce, z punktu widzenia efektywności energetycznej, górny odcinek Rynny Słuszewskiej jest obszarem perspektywnym dla potencjalnej lokalizacji instalacji LT-ATES. Rzeczywiście, zakładając naturalną temperaturę warstwy wodonośnej 8,5°C i projektowanie instalacji na bazie wielootworowego zespołu Jednostkowych Modułów Cyklicznych o mocy cieplnej 31–38 kW każdy, można w ten sposób produkować wodę podgrzewaną do temperatury 12°C zimą, jak również wodę schłodzoną o temperaturze 5°C latem. Jest to sposób najbardziej dostosowany do wykorzystania pojemności cieplnej wybranej warstwy wodonośnej w sposób zrównoważony, tzn. bez wielkich strat termicznych i związanych z nimi oddziaływaniami na środowisko. Biorąc przykład z projektu Les Gros Saules w Aulnay-sous-Bois (Iris 1985), naruszenie równowagi termicznej warstwy wodonośnej byłoby bowiem w tym przypadku ograniczone do bezpośrednich stref wpływu stymulacji termicznych.

Tabela 6

Zmiany temperatury teoretycznie produkowanej wody i użytkowej mocy instalacji, zmiennej z upływem czasu, po cieplej stronie studni JMC LT-ATES – sześciolatnia symulacja wykorzystania wód wglębnych z drugiego (czwartorzędowego) poziomu wodonośnego w górnym odcinku Rynny Suszewskiej

Tabela 6

Theoretical evolution of the temperature of produced water, as a function of time, in the well of the warm side in a Cyclic Unitary Modul LT-ATES – simulation covering a six year period of seasonal storage using the confined groundwaters of the second (deeper) aquifer in the upper section of Suszewska Ice-Marginal Valley

T_i [°C]	Cykl I		Cykl II		Cykl III		Cykl IV		Cykl V		Cykl VI	
	T_e [°C]	P_{th}^{\uparrow} [kW]	T_e [°C]	P_{th}^{\uparrow} [kW]	T_e [°C]	P_{th}^{\uparrow} [kW]	T_e [°C]	P_{th}^{\uparrow} [kW]	T_e [°C]	P_{th}^{\uparrow} [kW]	T_e [°C]	P_{th}^{\uparrow} [kW]
12	9,5	33,1	9,8	35,3	10,0	37,5	10,1	38,3	10,2	38,3	10,2	38,3
15	10,4	61,8	11,0	66,2	11,3	68,4	11,5	69,9	11,6	70,6	11,7	71,4
18	11,3	90,5	12,2	97,1	12,5	99,3	12,8	101,5	13,0	103,0	13,2	104,5
21	12,2	119,2	13,3	127,3	13,8	131,0	14,2	133,9	14,4	135,4	14,6	136,9
24	13,1	147,9	14,5	158,2	15,1	162,6	15,5	165,6	15,9	168,5	16,1	170,0
27	14,0	176,6	15,6	188,4	16,4	194,3	16,9	197,9	17,3	200,9	17,6	203,1
30	14,8	204,6	16,8	219,3	17,6	225,2	18,3	230,3	18,7	233,3	19,0	235,5

Parametry wejściowe:
 — Mniejszość poziomu wodonośnego (średnia hipotetyczna wartość): $m_{aqu} = 10$ m
 — Początkowa temperatura poziomu wodonośnego (T poziomu wodonośnego): $T_e = 8,5^{\circ}\text{C}$
 — Ciągła teoretyczna wydajność studni (wyd. średnia w skali połowy cyklu): $Q_f = 13,4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
 — Temperatura wody podczas fazy iniekcji: $12 \leq T_i \leq 30^{\circ}\text{C}$

Parametry wyjściowe:
 T_e : Temperatura wody w końcu każdego okresu pompowania [°C]
 P_{th} : Moc teoretyczna (średnia ważona dla półcyklu termicznego) wypompowanej wody [MW]

Z punktu widzenia efektywności ekonomicznej warto najpierw podkreślić, iż zasadność jakiegokolwiek inwestycji LT-ATES może być wątpliwa, jeśli przedprojektowa analiza finansowa danego projektu nie uwzględnia innych zapotrzebowań oprócz zapotrzebowania energetycznego na ciepło i na chłód (G. Malina: inf. ustna Kraków, 19.04. 2018). Przykład symulacji pracy instalacji LT-ATES w górnym odcinku Rynny Słuszewskiej potwierdza ten wniosek. W tym przypadku moc cieplna Jednostkowego Modułu Cyklicznego (31–38 kW), byłaby zdecydowanie za niska dla komercyjnego projektu energetycznego: reprezentowałaby zaledwie 10–15% opartej na energii geotermalnej mocy zainstalowanej ujęć wód geotermalnych małych ośrodków uzdrowiskowego Dolnego Śląska – tj. ok. 300 kW na przykładzie ośrodków uzdrowiskowych Cieplice Śląskie Zdrój (w tym uzdrowisku wydobywa się wodę geotermalną o temperaturze 36–39°C na głowicy przy maksymalnej wydajności studni 27 m³/h; Kępińska 2011). Wskazuje to, iż wykonalność inwestycji typu LT-ATES nie powinna być rozpatrywana oddzielnie, ale w ramach kompleksowych projektów gospodarki płytkimi wodami podziemnymi. Perspektywa zastosowania technologii LT-ATES również w procesach remediacji tych wód (Malina i Bujak 2017) jest w tym sensie zupełnie realna w Polsce w ramach projektów rewitalizacji obszarów zdegradowanych (G. Malina: inf. ustna Kraków, 19.04. 2018). Na obszarach wiejskich Niżu Polskiego, a szczególnie na polodowcowych obszarach młodoglacjalnych, zastosowanie tej technologii dla poprawy jakości wód podziemnych, polegałoby wtedy na stopniowym obniżeniu w nich stężenia żelaza lub nawet odżelazieniu tych wód, które naturalnie wykazują często ponadnormatywne stężenie żelaza (Macioszczyk 2006). Proces ten, przyczyniając się do uzdatnienia wód *in situ*, mógłby być testowany na skalę aglomeracji wiejskich w wielootworowych instalacjach, po początkującej fazie próbnej dwuotworowej. Przed fazą projektową sensu stricto, dla każdej rozważanej lokalizacji systemu, zaleca się wstępne rozpoznanie wybranej hydrostruktury metodą geofizyczną, i wiarygodną analizę długoterminowego zapotrzebowania na zimną wodę na miejscu, ponieważ od tego zapotrzebowania zależy efektywność ekonomiczną projektu energetycznego. Projekt LT-ATES Canada Center Building w Scarborough, z lat osiemdziesiątych, prezentowany w niniejszym artykule z braku takiej analizy, stał się podręcznikowym przykładem niepowodzenia z powodu nierównowagi między popytem i podażą na wodę zimną, która nastąpiła już na etapie promowania inwestycji.

UWAGI KOŃCOWE

W pracy poświęconej Pojezierzu Kaszubskiemu (Lemoine 2016) wskazano na potencjał termiczny interwału wód głębszych czwartorzędowego piętra wodonośnego. Strefy wewnętrzne wysoczyzn dennomorenowych zostały wtedy wytypowane jako szczególnie perspektywiczne do sezonowego magazynowania ciepła metodą LT-ATES, tj. instalacjami pracującymi w trybie cyklicznym (sezonowym). Obniżenia rynnowe, z uwagi na stosunkowo wyższą prędkość przepływu tam wód podziemnych, byłyby mniej przydatne do magazynowania ciepła tą metodą, ponieważ tylko instalacje pracujące w ciągłym trybie mogą znaleźć zastosowanie w tym drugim przypadku, a są one mniej efektywne.

Analiza potencjału górnego odcinka Rynny Słuszwskiej, który przebiega pomiędzy dwoma kępami Wysoczyzny Żarnowieckiej, udowodniła że poza głównymi rynnami strukturalnymi, drugorzędne cięcia rynnowe mogą tworzyć lokalnie dobre warunki do magazynowania ciepła nie tylko systemami pracującymi w ciągłym trybie hydraulicznym, ale również systemami pracującymi w cyklicznym trybie hydraulicznym, które są specjalnie preferowane do metody sezonowej i stosunkowo bardziej efektywne.

W odróżnieniu od metod obliczeniowych stosowanych w konwencjonalnej geotermii złożowej, gdzie oblicza się wyłącznie moc grzewczą dubletu geotermalnego, w sezonowym magazynowaniu ciepła metodą LT-ATES, oblicza się również interwał potencjału chłodniczego hydrostruktur rozpoznanych jako perspektywiczne. Potencjał grzewczy jest wówczas traktowany jako odpadowy.

Przy ocenie interwału potencjału termicznego rozpatrywanej podziemnej hydrostruktury Rynny Słuszwskiej stosowano symulację komputerową. Stymulacja objęła sześć pierwszych lat eksploatacji Jednostkowego Modułu Cyklicznego LT-ATES (JMC LT-ATES) złożonego z dwóch otworów pracujących w trybie cyklicznym. W określonych powyżej warunkach hydrogeologicznych moc cieplna takiego modułu wynosiłaby ok. 35 kW. Rząd wielkości tej mocy cieplnej jest bardzo niski w porównaniu z progiem efektywności ekonomicznej dla systemu energetycznego takiego rodzaju w warunkach w Holandii – tj. 1 MW. A zatem wskazany typ, aby osiągnąć ten próg, powinien zawierać tutaj 28 JMC LT-ATES, więc 56 otworów. Brak potencjalnych odbiorców zimnej wody w dużej ilości w analizowanej strefie obecnie uniemożliwia realizację projektu komercyjnego w celu wyłącznie energetycznym. Pozostaje możliwość projektowania demonstracyjnej instalacji badawczej, np. na bazie jednego modułu JMC LT-ATES (dwuotworowego), z możliwością przekwalifikowania studni na zwykłe ujęcie wód podziemnych. Taki projekt znajdzie uzasadnienie jeśli, poza aspektami ściśle energetycznymi, rozpatrywane będą przede wszystkim kwestie związane z gospodarką wodami podziemnymi, a szczególnie możliwość ich remediacji *in situ*, jako ważne wezwanie ekonomiczne i ekologiczne w horyzoncie najbliższych dekad.

W niniejszym artykule wspomniano przykład projektu Canada Center Building w Scarborough, ponieważ podpowierzchniowe warunki geologiczne cechujące ten region położony nad Jeziorem Ontario są zbliżone do tych, które występują na nadbałtyckich obszarach młodoglacjalnych. To, co spotkało ów kanadyjski prototyp instalacji LT-ATES, pokazuje, że stosunkowo korzystne warunki hydrogeologiczne nie dają pełnej gwarancji powodzenia projektów energetycznych tego rodzaju. W odróżnieniu od stałych źródeł ciepła wykorzystywanych w głębokiej geotermii, zbiorniki niskotemperaturowe pracujące w systemach JMC LT-ATES cechują się wysoką podatnością termodynamiczną na zmiany warunków eksploatacyjnych. Stąd zasadność projektów, opartych na tej technologii, powinna być określona na bazie wieloletnich prognoz rynkowych zapotrzebowań na ciepło i chłód w danej lokalizacji, a nie na bazie chwilowych prognoz gospodarczych. Nie należy również zapominać, że rozpatrywane tu systemy energetyczne na początku ich postania były pomyślane jako sposób produkcji jedynie wody zimnej.

LITERATURA

- Aubertin i in. 1984 – Aubertin, G., Boisdet, A., Menjoz, A. i Rojas J. 1984. *Stockage intersaisonnier à moyenne température dans les aquifères à moyenne profondeur*. Rap. BRGM 84 SGN126 IRG.
- Ausseau, J.Y. i 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.
- Courtois i in. 2007 – Courtois, N., Marchal, J.-P., Menjoz, A., Monnot, P., Noël, Y., Petit, V., Thiéry, D., Grasselly, D. (Ctifl) i Grisey, A. (Ctifl) 2007. *Application du stockage thermique en aquifère au chauffage et au refroidissement de serres maraîchères en France : étude de pré-faisabilité – Application of aquifer thermal energy storage for heating and cooling of greenhouses in France -a prefeasibility study/RP-55481-FR*, 243 s.
- Gautier, J. 1993. *Modélisation du transport de chaleur en milieux poreux – application à un système de pompage géothermique avec stockage en aquifère*. Mémoire Maîtrise INRS-Eau. Univ. Québec à Ste-Foy, Ca.
- Gringarten i in. 1979 – Gringarten, A.C., Landel, P.A., Menjoz, A. i Sauty J.P. 1979. *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.
- Hickling management consultants limited, 1989 – Monitoring and Evaluation of the Aquifer Thermal Energy Storage Field Trials at the Scarborough Canada Centre Building”. Report issued to Public Works Canada.
- Iris, P. 1985a. Pompe à chaleur sur nappe et héliogéothermie. Une opération pilote sur 224 logements à Aulnay-sous-Bois. Rev. *La Houille blanche* 3/4.
- Kępińska, B. 2011. Energia geotermalna w Polsce – stan wykorzystania, perspektywy rozwoju. *Technika poszukiwań geologicznych, geotermia, zrównoważony rozwój* R. 50, z. 1–2, s. 7–18.
- Kondracki, J. 2002. *Geografia regionalna Polski*. Warszawa: Wyd. PWN, ISBN 83-01-13897.1
- Kranz i in. 2015 – Kranz, S., Bloecher, G. i Saadat A. 2015. Improving Aquifer Thermal Energy Storage Efficiency. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, 19–25 April 2015.
- Lee, K.S. 2010. *A Review on Concepts, Applications, and Models of Aquifer Thermal Energy Storage Systems*. *Energies* 2010, 3, s. 1320–1334; DOI:10.3390/en3061320.
- Lemoine, G. 2016. Analiza niskotemperaturowego potencjału energetycznego obszarów młodoglacjalnych na przykładzie Pojezierza Kaszubskiego – Podejście metodologiczne. *Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój* R. 55, z. 1, s. 151–171.
- Lemoine, G. 2017. *Perspektywy magazynowania ciepła metodą LT-ATES celem produkcji ciepła i chłodu w Rynnie Słuszewskiej*. Opracowanie dobrowolne, arch. PSG. Niepublikowane.
- MHP 0005, 2000 – Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000 – Arkusz Sławoszyno (0005), wyjaśnienie. PIG & POLGEOL.
- Macioszczyk, A. (red.) 2006. *Podstawy hydrogeologii stosowanej*. Warszawa: PWN.
- Malina, G. i Bujak, I. 2017. Ocena możliwości skojarzenia magazynowania energii cieplnej w warstwie wodonośnej z remediacją wód podziemnych. *Ochrona Środowiska* nr 39 (3), s. 9–8.
- Mirza i in. 1985 – Mirza, C., Lau, K.C., Morofski, E. i Crawford, A.M. 1985 – ATEs experience with the Scarborough field trial. *Third International Conference on Energy Storage for Building Heating and Cooling*, Enerstock '85, paper A21, s. 110–114.

- Mirza, C. 1993. Case History of Aquifer Thermal Energy Storage (ATES). *Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*.
- Nielsen, K. 2003. Thermal Energy Storage, A State-of-the-Art; NTNU: Trondheim, Norway.
- Schmidt, T. i Miedaner, O. 2012. *Solar district heating guidelines – Storage*. *Arkusze serii 7.2*, s. 1–13. Rap. Solites (DE) dla Solar District Heating.
- Szewczyk, J. 2010. Geofizyczne oraz hydrogeologiczne warunki pozyskiwania energii geotermicznej w Polsce. *Przełęcz Geologiczny* 58 (7), s. 566–573.
- Snijders, A.L. i Aarssen, M.M. Van. 2003. Big is beautiful? Application of large scale energy storage in the Netherlands. Futurostock' 2003, *The 9th International Conference on Thermal Energy Storage*, Warszawa, s. 83–88.
- Sommer, W. 2015. *Modelling and monitoring of aquifer thermal energy storage. Impacts of heterogeneity, thermal interference and bioremediation*. PhD Thesis Wageningen University.
- Wu i in. 2000 – Wu, X., Ma, J. i Bink, B. 2000. Chinese ATES Technology and Its Future Development. *8th International Conference on Thermal Energy Storage*, Stuttgart, Germany.

SEASONAL THERMAL ENERGY STORAGE PERSPECTIVES IN A SHALLOW AQUIFER OF YOUNG GLACIAL AREAS ON THE EXAMPLE OF SŁUSZEWSKA ICE-MARGINAL VALLEY IN THE ŻARNOWIEC MORAINIC PLATEAU

ABSTRACT

The main results of the first evaluation of environmental suitability of an area for seasonal ATES (Aquifer Thermal Energy Storage) development purpose was presented in the article. The site named the Słuszevska Trough is a marginal tunnel valley located inside the Żarnowiec Morainic Plateau (Pomeranian region, Poland).

Firstly, a briefly historical overview of ATES throughout the world is given concerning the emergence of this technology and its developments from the end of the last century to the beginning of the current one.

Secondly, the Żarnowiec Morainic Plateau is presented, as a young fluvio-glacial environment typically promising for low-temperature Aquifer Thermal Energy Storage (LT-ATES) applications.

Thirdly, a comparative approach is proposed between the Żarnowiec Morainic Plateau and Toronto Morainic Plain in Canada, with special regards to hydrogeological similarities between these two regions and lessons learned in the second region by pilot project LT-ATES of the Canada Center Building in Scarborough.

Finally, after confirming a promising aspect of the possible localization of a LT-ATES pilot project in the Żarnowiec Morainic Plateau, an assessment of thermal storage availability of the second aquifer layer was proposed, especially concerning the Słuszevska marginal tunnel valley.

KEYWORDS

Underground energy storage, ATES, Ground water heat pump, late-glacial area, Żarnowiec Morainic Plateau, Słuszevska marginal channel, Toronto Morainic Plain, Scarborough

