6. METODYKA BADAŃ DLA OCENY STREF PERSPEKTYWICZNYCH

(Wiesław Bujakowski, Leszek Pająk,
Aleksandra Borsukiewicz-Gozdur, Sławomir Wiśniewski,
Władysław Nowak, Maciej Miecznik, Barbara Tomaszewska)

6.1. Modelowanie numeryczne pracy złoża geotermalnego

(Leszek Pająk, Maciej Miecznik, Wiesław Bujakowski, Barbara Tomaszewska)

Podstawowym narzędziem analizy systemu wodonośnego są badania modelowe prowadzone z wykorzystaniem powszechnie stosowanych i ciągle rozbudowywanych pakietów programów obliczeniowych, zarówno w symulacjach procesów filtracji, jak i transportu masy i ciepła w wodach podziemnych (Dąbrowski i in. 2010). Pierwsze kody obliczeniowe na potrzeby inżynierii złożowej powstały we wczesnych latach siedemdziesiątych XX wieku. Do roku 2000, modelowanie numeryczne znalazło zastosowanie w przeszło 100 obszarach wykazujących znaczny potencjał dla pozyskania energii geotermalnej (O'Sullivan i in. 2000).

Modele numeryczne pomagają zrozumieć fizyczną naturę i zachowanie systemów geotermalnych. Dzięki nim możliwe jest określenie rozkładu przestrzennego i wartości parametrów charakteryzujących złoże oraz rozpoznanie zasobów energii cieplnej możliwej do zagospodarowania. Jednym z kluczowych kierunków zastosowania modelowania numerycznego jest rozpoznanie i ustalenie warunków przepływu wód w systemie wodonośnym, złożu w trakcie eksploatacji w długim horyzoncie czasowym. Na podstawie wyników modelowania możliwe jest między innymi wyznaczenie prognozowanych rozkładów ciśnienia, temperatury, kierunków przepływu medium (wody termalnej), jak również zmian fizykochemicznych w złożu, wskutek reakcji woda-skała. Jest to obecnie jedno z podstawowych narzędzi wykorzystywanych w inżynierii złożowej. Modele hydrogeologiczne, hydrogeotermalne, stanowią również wygodne narzędzie wykorzystywane przy wizualizacji struktury złoża, tworzeniu przekrojów geologicznych, obrazowaniu rozkładu temperatury lub ciśnienia, wizualizacji kierunków przepływu wód i innych. W tym celu szerokie zastosowania znajdują różne pre- i post- procesory, np. PetraSim dla kodu TOUGH2, który wykorzystany został w modelowaniu pracy złóż wód termalnych w niniejszym atlasie.

Trójwymiarowe modelowanie numeryczne o parametrach rozproszonych (ang. *distributed parameter model*) jest przykładem modelowania dynamicznego, tzn. uwzględnia odpowiedź układu na zadane warunki zaburzające. Oznacza to, że symulator w trakcie każdego kroku czasowego, jednocześnie wylicza rozkłady temperatury, ciśnienia, kierunki przepływu medium złożowego oraz zachodzące przemiany chemiczne (jeżeli są żądane) oraz pozostałe zadane parametry w układzie niestacjonarnym. Złożoność obliczeniowa trójwymiarowych modeli numerycznych jest znacznie większa niż w przypadku stosowania uproszczonych modeli (np. model objętościowy (ang. *volume model*), model o parametrach skupionych (ang. *lumped parameter model*)), a przez to wymagająca znacznej liczby danych opisujących modelowaną przestrzeń. W celu realizacji modelu numerycznego, konieczna jest znajomość warunków geologicznych i hydrogeologicznych obszaru badań, właściwości petrofizycznych skał budujących badaną strukturę geotermalną, rozkładu temperatury i ciśnienia w złożu oraz umiejętność określenia warunków brzegowych.

6.1.1. Parametryczny model 3D z użyciem kodu TOUGH2

Symulator numeryczny TOUGH2 (ang. *Transport of Unsaturated Groundwater and Heat*) – wykorzystany w obliczeniach numerycznych charakterystyki złoża w warunkach przedeksploatacyjnych (w stanie stacjonarnym) oraz w okresie eksploatacji został opracowany w Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) jako program przeznaczony do modelowania numerycznego transportu masy i ciepła w ośrodkach porowatych, dla cieczy wielofazowych i wieloskładnikowych (Pruess i in. 1999). TOUGH2 znajduje zastosowania w inżynierii złożowej dla potrzeb geotermii, składowania odpadów radioaktywnych, hydrogeologii oraz składowaniu dwutlenku węgla w warstwach geologicznych. Podstawowe równania matematyczne definiujące działanie kodu są następujące:

- równanie opisujące bilans masy i energii w każdym elemencie lub domenie (grupie elementów):

$$\frac{d}{dt}\int\int\int_{V_n} M^{\kappa} dV_n = \int\int_{\Gamma_n} F^{\kappa} \cdot n d\Gamma_n + \int\int\int_{V_n} q^{\kappa} dV_n \tag{6.1.1}$$

gdzie: V_n – domena lub element analizowanego systemu [m^3],
M – ilość masy lub energii w analizowanej domenie [kg/m^3, J/m^3],
κ – wskaźnik danego składnika [–],
F – strumień masy lub ciepła [kg/(s·m^2), J/(s·m^2)],
Γ_n – powierzchnia ograniczająca [m^2],
q – studnie lub źródła (masy lub ciepła) [kg/(s·m^3), J/(s·m^3)],
n – wektor normalny do element powierzchniowego $d\Gamma_n$, skierowany do V_n [–];

- transport masy w ośrodkach porowatych (6.1.2) opisuje Prawo Darcy:

$$u = -\frac{k}{\mu}(\nabla p - \rho g) \tag{6.1.2}$$

gdzie: u – wektor prędkości filtracji cieczy w ośrodku porowatym [m/s],
k – przepuszczalność całkowita [m^2],
μ – lepkość dynamiczna [Pa·s, kg/(m·s)],
∇p – gradient ciśnienia [Pa/m, kg/(m^2·s^2)],
ρ – gęstość [kg/m^3],
g – wektor przyspieszenia grawitacyjnego [m/s^2];

- równanie opisujące akumulację masy (6.1.3):

$$M^{\kappa} = \phi \sum_{\beta} s_{\beta} \rho_{\beta} X_{\beta}^{\kappa} \tag{6.1.3}$$

gdzie: ϕ – porowatość [–],
S – nasycenie [–],
ρ – gęstość [kg/m^3],
β – wskaźnik fazy [–],
X – udział masowy [–];

- równanie opisujące akumulację ciepła (6.1.4):

$$M^{\kappa} = (1-\phi)\rho_R c_R T + \phi \sum_{\beta} s_{\beta}\rho_{\beta}u_{\beta} \qquad (6.1.4)$$

gdzie: ϕ – porowatość [–],
S_β – nasycenie fazy β [–],
ρ_R – gęstość skały [kg/m^3],
β – wskaźnik fazy [–],
c_R – ciepło właściwe skały [J/kg·K, J/kg·°C],
u_β – energia wewnętrzna fazy β [J/kg],
T – temperatura [K, °C].

TOUGH2 wykorzystuje metodę całkowalnych różnic skończonych w celu dyskretyzacji przestrzennej oraz czasowej. Układ 2N (N – liczba elementów) liniowych równań różniczkowych rozwiązywany jest za pomocą metod bezpośrednich lub zbioru metod iteracyjnych. Pierwszy rodzaj metod jest bardziej niezawodny, ale wymagający dużych zasobów pamięci oraz czasu obliczeniowego, który rośnie w tempie N^3, gdzie N oznacza liczbę równań do rozwiązania. Przeciwieństwem tego są metody iteracyjne (np. metody gradientów sprzężonych), które są szybsze, a czas wykonywania obliczeń jest w mniejszym stopniu zależny od wielkości siatki obliczeniowej (N^w, gdzie $w \approx 1{,}4$–$1{,}6$). Zwiększona wydajność obliczeniowa jest kosztem mniejszej dokładności i niezawodności niż w przypadku metod bezpośrednich (Pruess i in. 1999).

6.1.2. Ogólne założenia dla przestrzennych modeli numerycznych

Dla każdej strefy wskazanej w rozdziale 7, opracowano w pierwszej kolejności koncepcyjny model geologiczny, który prezentował charakterystykę występowania i zalegania perspektywicznych zbiorników hydrogeotermalnych oraz niżej i wyżej zalegających struktur geologicznych. Na podstawie szczegółowej analizy dostępnych materiałów publikowanych i archiwalnych (głównie dokumentacji głębokich wierceń, por. rozdział 5.2), jak również przeprowadzonych na potrzeby niniejszej pracy badań w zakresie oceny mineralogiczno-petrograficznej (por. rozdział 5.3) i petrofizycznej skał (por. rozdział 5.4) oraz reinterpretacji archiwalnych danych sejsmicznych (por. rozdział 5.5) wykonano mapy ukształtowania stropu zbiornika jurajskiego, przekroje geologiczne z oszacowanymi miąższościami utworów skalnych. Rozpoznane parametry hydrogeotermalne oraz dane litostratygraficzne stanowiły podstawę dla opracowania numerycznych modeli przestrzennych. Dane wejściowe do analiz, ocen i przeprowadzonych na ich podstawie symulacji numerycznych cechowały się znacznym zróżnicowaniem ilościowym i jakościowym, co bezpośrednio wynikało z uwarunkowań naturalnych i stanu rozpoznania.

Dla każdej lokalizacji perspektywicznej opracowano dwa modele numeryczne: model termiki górotworu oraz model pracy złoża geotermalnego. Pierwszy z modeli pozwolił ustalić profil głębokościowy temperatury, jako warunku początkowego do modelu hydrodynamicznego pracy złoża geotermalnego. Na drugim z modeli symulowano pracę dubletu geotermalnego w czasie 50 lat i na tej podstawie oceniano spadek temperatury na filtrze otworu produkcyjnego (oceniając ilościowo efekt przebicia frontu chłodnego), różnicę ciśnień pomiędzy otworem produkcyjnym i chłonnym oraz wynikającą z tego niezbędną moc napędową pomp obiegowych systemu geotermalnego. Konstrukcja modeli pracy złoża geotermalnego oparta została na modelach termiki górotworu. Stąd opisane przy kolejnych rozpatrywanych strefach (por. rozdział 7) założenia dla modeli termiki górotworu są spójne z zasadami uwzględnionymi przy realizacji modeli pracy złoża geotermalnego.

W rozdziale 4 scharakteryzowano ogólnie warunki hydrogeologiczne i hydrodynamiczne występujące w obrębie analizowanych zbiorników perspektywicznych. Rozkład pola hydrodynamicznego dolnojurajskiego zbiornika wód podziemnych określony został w skali regionalnej przez Góreckiego z zespołem (1995), a dla niecki podhalańskiej przez Chowańca i Witka (2003). Regionalne warunki i kierunki przepływu wód zbiornika triasowego Niżu Polskiego oraz struktur geologicznych rejonu Sudetów nie zostały dotychczas odpowiednio ustalone. Istniejący stan rozpoznania hydrogeologicznego (w tym poziom ciśnienia piezometrycznego, gradienty ciśnień, przepuszczalności skał i in.), geofizycznego (rozpoznanie przebiegu uskoków, szczelin) oraz wyniki profilowania termicznego w otworach wiertniczych, umożliwił w modelach koncepcyjnych i numerycznych odwzorowanie hydrodynamiki przepływu wód dla stref: Bańska Niżna, Łowicz i Cieplice Śl. Zdrój. Dla pozostałych lokalizacji, w ramach zastosowanej schematyzacji założeń modelowych, nie uwzględniono kierunków przepływu wód.

W obrębie wytypowanych struktur geologicznych występują wody termalne słodkie (Cieplice Śląskie Zdrój), słonawe (Bańska Niżna) i solanki (Koło, Turek, Konin, Ślesin, Żnin, Łowicz, Stargard Szczeciński, Chociwel). W modelowaniu numerycznym przyjęto doświadczalnie dwie metody symulacji warunków przepływu, przy założeniu występowania: 1) wód słodkich: Cieplice Śląskie Zdrój, Bańska Niżna, Koło, Turek, Łowicz i 2) wód zasolonych: Konin, Ślesin, Żnin, Stargard Szczeciński, Chociwel. Podjęto próbę oceny wpływu przyjętego zasolenia wód na wyniki modelowania. Odnosząc się do wariantu pierwszego, w modelowaniu procesów termodynamicznych założono, że płyny wypełniające szczeliny są wodą słodką, co stanowi uproszczenie modelu numerycznego. Powyższe założenie powoduje pewne błędy obliczeniowe związane głównie z procesem przepływu płynu przez złoże (oceną oporów przepływu i entalpii). Zróżnicowanie parametrów cieplnych wody i solanki ulega jednak pewnej kompensacji. Wartość strumienia energii niesionego przez strumień solanki i strumień wody są zbliżone, gdyż w formule określania strumienia energii występuje iloczyn: strumienia objętości, ciepła właściwego i gęstości [m^3/s · J/(kg · K) · kg/m^3 = W/K]. O ile gęstość solanki rośnie, to jej ciepło właściwe maleje ze wzrostem mineralizacji; w przypadku wody ciepło właściwe ma wartość wyższą od ciepła właściwego solanki, lecz gęstość wody jest mniejsza od gęstości solanki. Próby ilościowej oceny błędów wynikających z powyższego założenia dokonano w artykule (Miecznik 2013).

W modelach, w których założono, że płynem złożonym jest solanka, wykorzystano moduł EWASG (ang. *Equation for Water, Salt, Gas*) symulatora TOUGH2, który uwzględnia zależność gęstości, entalpii oraz lepkości płynu złożowego w funkcji temperatury i ciśnienia (podobnie jak w module EOS1) oraz od stopnia mineralizacji. W module EWASG przyjmuje się, że całkowity TDS (ang. *Total*

Dissolved Solids) zostaje zastąpiony przez sumaryczny udział jonów Na^+ oraz Cl^- (w rzeczywistości składniki dominujące w ujęciu masowym) wyrażony jako frakcja całkowitej masy składników rozpuszczonych do masy jednostkowej objętości płynu złożowego. W przeprowadzonych obliczeniach nie uwzględniono reakcji rozpuszczania bądź wytrącania wskutek reakcji skała-ciecz.

Do obliczeń związanych z prognozowaniem możliwych do osiągnięcia efektów pracy instalacji geotermalnych wykorzystano prognozowane temperatury głowicowe wody termalnej potwierdzone: informacjami geologicznymi, wynikami pomiarów i obserwacji poczynionych na etapie wiercenia i dokumentowania otworów. Modele numeryczne analizowanych stref, oparte na obecnym stanie rozpoznania geologicznego, potwierdzają prawdopodobieństwo osiągnięcia zakładanych w obliczeniach energetycznych wartości temperatury złożowej. W świetle przeprowadzonych wyników modelowania numerycznego temperatury przyjęte do obliczeń związanych z instalacją powierzchniową uznać można za realne, możliwe do osiągnięcia i obarczone minimalnym ryzykiem geologicznym. Jednakże wyniki modelowania numerycznego wskazują najczęściej możliwość osiągnięcia wyższej temperatury w strefie filtra otworu produkcyjnego. W przypadku potwierdzenia ich pracami wiertniczymi poprawią one znacząco efekty pracy instalacji geotermalnych.

Bazowy wymiar przestrzenny większości modelowanych obszarów wynosił około 10 km x 10 km, uwzględniając warunki lokalne w przestrzeni poziomej oraz 1–5 km w pionie. Rozmiar ten pozwalał na symulacje eksploatacji złoża metodą dubletu otworów z uwzględnieniem odpowiednio odsuniętych granic modelu, tak aby wynik eksploatacji nie był zaburzony przez geometrię oraz wpływ warunków brzegowych samego modelu. Jednakże rozmiar przestrzenny modelu był przede wszystkim podyktowany obecnością charakterystycznych granic geologiczno-tektonicznych bądź hydrogeologicznych, umożliwiających poprawne przyjęcie warunków brzegowych. W każdym z modelowanych obszarów perspektywicznych warstwie stropowej modelu przypisano warunek brzegowy I rodzaju (warunek Dirichleta), określający niezmienną w czasie oraz niezależną od procesów zaburzających wartość temperatury i ciśnienia. Warunek brzegowy Dirichleta był również stosowany w warstwach spągowych modelu, symulując niezmienną w czasie wartość temperatury i ciśnienia na głębokości znacznie poniżej wybranej warstwy wodonośnej. W wybranych modelach – a w szczególności w obszarach o słabiej rozpoznanej termice górotworu – zastosowano w warstwie spągowej modelu warunek brzegowy II rodzaju (Neumanna) określający wielkość strumienia ciepła dostarczanego z większych głębokości systemu geotermalnego nie objętych przez przyjęte granice modelu. Zastosowanie warunku Neumanna pozwala na uniknięcie potencjalnego problemu związanego z nieumiejętnym zastosowaniem warunku brzegowego I rodzaju.

Do każdego z elementów przypisano właściwości petrofizyczne skał. Kompletny opis wydzielenia geologicznego składa się z przypisania następujących parametrów petrofizycznych: gęstość, porowatość, przepuszczalność w kier. X, Y, Z, współczynnik przewodnictwa cieplnego oraz pojemność cieplna matrycy skalnej. Ze względu na uzyskanie odpowiednich warunków przepływu oraz rozkładu temperatury, przepuszczalności oraz przewodność cieplna mają kluczowe znaczenie (Miecznik 2010). Ze względu na ograniczone możliwości obliczeniowe bardzo często nie da się precyzyjnie zasymulować obecności uskoków. W tym celu właściwości termiczne i hydrauliczne w danym bloku odpowiednio się uśrednia po większej objętości, uwzględniając jego heterogeniczną strukturę geologiczną (np. model regionalny obszaru Karkonoszy).

Kalibracja modelu stanu przedeksploatacyjnego (stanu stacjonarnego) polegała na porównaniu rezultatów otrzymanych z modelowania numerycznego z dostępną informacją otworową (profile temperatury i ciśnienia w warunkach ustabilizowanych) lub na obszarach słabo rozpoznanych bądź nierozpoznanych wierceniami – dostępną literaturą (pod. rozdział 4). Dopasowanie polegało głównie na modyfikacji warunków brzegowych lub zmianie parametrów petrofizycznych wyszczególnionych grup skalnych. Kalibracja modelu produkcyjnego była możliwa tylko w przypadku modelu utworzonego dla strefy Bańska Niżna, w którym bazowano na danych z monitoringu istniejącego systemu geotermalnego (PEC Geotermia Podhalańska S.A.).

W modelu pracy złoża geotermalnego przyjęto założenie, że eksploatacja będzie prowadzona w schemacie dubletu otworów (jeden otwór produkcyjny, jeden otwór chłonny), chyba że na danym obszarze perspektywicznym pracuje już system w innym układzie (Bańska Niżna). Przyjęto, że temperatura zatłaczanej wody będzie wynosić 30°C, co pozwoliłoby na wykorzystanie ciepła wód termalnych zarówno do wytwarzania energii elektrycznej w układach binarnych jak i na zagospodarowanie pozostałej ilości ciepła w systemie kaskadowym na cele grzewcze (ciepłownictwo, rekreacja i/lub balneologia oraz inne). Dla 50-letniego przedziału czasu objętego modelowaniem przyjęto w każdym z analizowanych wariantów stałą wydajność dubletu. W zależności od lokalizacji, przyjęto wydajność systemu geotermalnego w zakresie od 45 m^3/h do 275 m^3/h oraz 600 m^3/h dla systemu geotermalnego Bańskiej Niżnej. W modelach przyjęto, że odległość pomiędzy otworem produkcyjnym i chłonnym będzie w danych warunkach geologicznych możliwie jak najmniejsza, a zarazem dostateczna dla uniknięcia wyraźnego przebicia frontu chłodnego w modelowanym czasie 50 lat.

W modelowaniu pracy złoża geotermalnego pominięto zagadnienia związane z korozją i kolmatacją instalacji geotermalnej i obniżaniem chłonności skał zbiornikowych. Rola korozji i kolmatacji, a w konsekwencji powstawanie, migracja i deponowanie cząstek stałych w systemach geotermalnych, oraz metody prognozowania i zapobiegania tym zjawiskom przedstawione zostały w licznych pracach (m.in. Kapuściński i in. 1997; Górecki (red.) 2006, 2011; Banaś i in. 2009; Kępińska, Bujakowski (red.) 2011; Tomaszewska i in. 2013). Ustalony w niniejszej pracy wzrost ciśnienia zatłaczania wód do górotworu, odzwierciedla w modelach pracy złoża efekt wynikający głównie ze zwiększonej lepkości dynamicznej zatłaczanej wody. Nie można wykluczyć, że w przypadku budowy instalacji geotermalnej i wystąpienia problemów z zatłaczaniem schłodzonych wód do górotworu konieczne byłoby rozważenie wykonania drugiego otworu chłonnego, co bez wątpienia znalazłoby odzwierciedlenie w prognozie nakładów inwestycyjnych na realizację przedsięwzięcia. Zagadnienia te wymagają jednakże oddzielnych prac studialnych i na obecnym etapie nie były rozpatrywane.

6.2. Metodyka oceny wpływu zmian parametrów eksploatacyjnych i parametrów powierzchniowych na uzyskiwane efekty pracy instalacji binarnej

(Aleksandra Borsukiewicz-Gozdur, Sławomir Wiśniewski, Władysław Nowak)

6.2.1. Parametry pracy elektrowni geotermalnej

Podstawowymi parametrami jakie winny być znane na etapie projektowania i szacowania mocy elektrowni geotermalnej są:

- temperatura początkowa wody termalnej T_{g1} [°C];
- strumień wody termalnej $\dot{V}_g$ [m^3/h];

- właściwości wody termalnej: gęstość ρ_g [kg/m^3], ciepło właściwe $c_{p,g}$ [kJ/kgK] – (parametry zależne od składu fizykochemicznego wody);
- temperatura wody termalnej za elektrownią T_{g2} [°C];
- parametry dostępnego w miejscu posadowienia elektrowni dolnego źródła energii – powietrza lub wody do chłodzenia skraplacza T_{c1} , T_{c2} [°C];
- strumień czynnika chłodzącego skraplacz $\dot{V}_c$ [m^3/h].

Czynnikami, mającymi najistotniejszy wpływ na efektywność pracy elektrowni geotermalnej są temperatura początkowa wody T_{g1} i jej strumień $\dot{V}_g$. Nie bez znaczenia pozostają także jej właściwości fizykochemiczne, gdyż wpływają na średnie ciepło właściwe wody termalnej $c_{p,g}$ i jej gęstość ρ_g. Także pod względem eksploatacyjnym istotna jest zawartość składników mineralnych w wodzie termalnej, jednak ten ostatni czynnik nie jest przedmiotem rozważań.

Istotną wielkością jest także oczekiwana temperatura schłodzenia wody termalnej (za elektrownią) T_{g2} i wynika ona zazwyczaj z planowanego dalszego jej wykorzystania.

Kolejnym ważnym parametrem jest sposób realizacji procesu chłodzenia skraplacza. Skraplanie czynnika roboczego jest realizowane w wymienniku ciepła zwanym skraplaczem, przy czym wymiennik ten musi być chłodzony płynem, który odprowadzi ciepło skraplania do otoczenia (elektrownia) lub do dalszych procesów technologicznych (elektrociepłownia). W przypadku elektrowni odbiór ciepła od skraplającego się czynnika roboczego realizowany jest poprzez medium chłodzące skraplacz – wodą z cieku wodnego, w zamkniętej chłodni wentylatorowej lub grawitacyjnej, poprzez wymuszone chłodzenie powietrzem i inne. Jak wynika z powyższego opisu chłodzenie skraplacza jest uzależnione od warunków lokalnych, a także od temperatury otoczenia (pory roku, pory dnia). Tym samym do projektowania parametrów pracy elektrowni konieczne jest przyjęcie pewnej uśrednionej wartości temperatury skraplania czynnika roboczego T_{n3}.

Jak wspomniano wcześniej, bardzo istotną cechą elektrowni ORC jest możliwość wyboru płynu roboczego stosowanego w obiegu siłowni parowej. Tym samym wybór optymalnych parametrów pracy elektrowni (temperatury odparowania czynnika roboczego T_{n5} i temperatury przegrzania T_{n1}) zależy nie tylko od paramentów źródła energii (wody termalnej), ale także od zastosowanego czynnika roboczego. Poniżej przedstawiono metodykę obliczania efektywności pracy elektrowni geotermalnej w zależności od wybranych, wymienionych wcześniej parametrów oraz po uwzględnieniu jednostkowej pracy turbiny l_t i jednostkowej pracy pompy l_p określonych zależnościami:

$$l_t = h_{n1} - h_{n2s} \tag{6.2.1}$$

$$l_p = h_{n4s} - h_{n3} \tag{6.2.2}$$

gdzie: l_t – jednostkowa praca turbiny [kJ/kg],
l_p – jednostkowa praca pompy [kJ/kg],
h – entalpia właściwa w odpowiednich punktach obiegu n1, n2s, n4s, n3 [kJ/kg].

Ocena efektywności pracy elektrowni geotermalnej może zostać przeprowadzona na podstawie wielkości mocy elektrowni i jej sprawności.

Sprawność siłowni ORC:

$$\eta_{ORC} = \frac{N_{ORC}}{\dot{Q}_d} \tag{6.2.3}$$

gdzie: η_{ORC} – sprawność obiegu ORC,
N_{ORC} – moc obiegu ORC [kW],
$\dot{Q}_d$ – strumień ciepła doprowadzanego [kW].

Moc elektryczną siłowni, będącą różnicą mocy turbogeneratora N_t i mocy agregatu pompowego N_p:

$$N_{ORC} = N_t - N_p \tag{6.2.4}$$

gdzie: N_{ORC} – moc obiegu ORC [kW],
N_t – moc turbiny [kW],
N_p – moc pompy [kW].

Moc turbogeneratora można wyznaczyć na podstawie jednostkowej pracy turbiny l_t oraz po uwzględnieniu sprawności turbogeneratora z następującej zależności:

$$N_t = \dot{m}_n l_t \eta_t \tag{6.2.5}$$

gdzie: N_t – moc turbiny [kW],
$\dot{m}_n$ – strumień czynnika roboczego w obiegu ORC [kg/s],
l_t – jednostkowa praca turbiny [kJ/kg],
η_t – sprawność turbiny.

Moc potrzebną do napędu pompy można wyznaczyć opierając się na jednostkowej pracy sprężania oraz po uwzględnieniu sprawności agregatu pompowego z następującej zależności:

$$N_p = \frac{\dot{m}_n l_p}{\eta_p} \tag{6.2.6}$$

gdzie: N_p – moc pompy [kW],
$\dot{m}_n$ – strumień czynnika roboczego w obiegu ORC [kg/s],
l_p – jednostkowa praca pompy [kJ/kg],
η_p – sprawność pompy.

W zależnościach 6.2.5 i 6.2.6 uwzględniono sprawności η_t oraz η_p, przy czym są to łączne sprawności agregatu pompowego i turbozespołu (bez rozgraniczania na sprawność wewnętrzną, mechaniczną i elektryczną tych elementów). Należy wyjaśnić, że w układach ORC stosowane są zazwyczaj hermetyczne pompy obiegowe i mogą być stosowane hermetyczne turbozespoły skła-

dające się z jednostopniowej turbiny parowej i generatora; z tego względu dla tego typu układów hermetycznych podaje się sprawność całkowitą.

Strumień ciepła doprowadzanego, niezbędny do określenia sprawności η_{ORC} (6.2.1) można obliczyć z zależności:

$$\dot{Q}_d = \dot{m}_g c_{p,g}(T_{g1} - T_{g2}) \tag{6.2.7}$$

gdzie: $\dot{Q}_d$ – strumień ciepła doprowadzanego [kW],
$\dot{m}_g$ – strumień wody geotermalnej [kg/s],
$c_{p,g}$ – właściwa pojemność cieplna wody geotermalnej [kJ/(kgK)],
T_{g1} – początkowa temperatura wody geotermalnej [°C],
T_{g2} – końcowa temperatura wody geotermalnej [°C].

Masowy strumień wody termalnej $\dot{m}_g$ określono na podstawie objętościowego strumienia wody termalnej z niżej podanej zależności:

$$\dot{m}_g = \frac{1}{3600} \cdot \rho_g \cdot \dot{V}_g \tag{6.2.8}$$

gdzie: $\dot{m}_g$ – strumień wody geotermalnej [kg/s],
ρ_g – gęstość wody geotermalnej [kg/m^3],
$\dot{V}_g$ – strumień objętościowy wody geotermalnej [m^3/s].

Na podstawie równania bilansu energii wymiennika W1 (przy założeniu braku strat ciepła do otoczenia) (rys. 3.2.1.1):

$$\dot{Q}_d = \dot{m}_n(h_{n1} - h_{n4s}) = \dot{m}_g c_{p,g}(T_{g1} - T_{g2}) \tag{6.2.9}$$

gdzie: $\dot{Q}_d$ – strumień ciepła doprowadzanego [kW],
$\dot{m}_n$ – strumień czynnika roboczego w obiegu ORC [kg/s],
h – entalpia właściwa w odpowiednich punktach obiegu n1, n4s [kJ/kg],
$\dot{m}_g$ – strumień wody geotermalnej [kg/s],
$c_{p,g}$ – właściwa pojemność cieplna wody geotermalnej [kJ/(kgK)],
T_{g1} – początkowa temperatura wody geotermalnej [°C],
T_{g2} – końcowa temperatura wody geotermalnej [°C]

można określić strumień czynnika roboczego w obiegu:

$$\dot{m}_n = \frac{\dot{m}_g c_{p,g}(T_{g1} - T_{g2})}{h_{n1} - h_{n4s}} \tag{6.2.10}$$

Aby możliwe było wykorzystanie zależności (6.2.1), (6.2.2) i (6.2.9) niezbędne jest ustalenie wartości entalpii właściwej czynnika roboczego w charakterystycznych punktach obiegu. Poniżej przedstawiono procedury określania tych wielkości wraz ze sposobem dobierania parametrów pracy elektrowni dla różnych wariantów siłowni.

6.2.2. Algorytm określania parametrów pracy siłowni z zastosowaniem czynnika suchego bez przegrzewania pary czynnika roboczego

Punktem wyjścia przedstawionego niżej algorytmu obliczeń elektrowni geotermalnej z siłownią ORC pracującą na suchym czynniku roboczym jest równanie bilansu energii doprowadzanej z wodą termalną w wymienniku ciepła W1 (6.2.9). Przedstawiony na rysunku 3.2.1.1 (por. rozdział 3.2) uproszczony schemat instalacji dotyczy wszystkich niżej rozpatrywanych wariantów. Biorąc pod uwagę, że dla poszczególnych wariantów przyjęte zostały różne założenia początkowe opisane algorytmy obliczeń bazują na wykresach przemian termodynamicznych czynnika roboczego w układzie współrzędnych *T*, *s* z zaznaczonymi temperaturami wody termalnej. Cykl przemian termodynamicznych realizowanych w obiegu siłowni ORC za pomocą czynnika suchego bez przegrzewania pary czynnika przedstawiono na rysunku 6.2.2.1. Aby zastosowane zależności algorytmu obliczeń były bardziej przejrzyste, na rysunku 6.2.2.2 przedstawiono także wykresy ilustrujące rozkład temperatury wody termalnej dla wariantów A i B oraz temperatury czynnika roboczego w wymienniku W1 w funkcji powierzchni wymiany ciepła tego wymiennika. Ponadto poniżej objaśniono symbole zastosowane w algorytmie przedstawionym w niniejszym punkcie wraz z podaniem jednostek:

T_{n1}, T_{n4s}, T_{n5} – temperatury czynnika roboczego w odpowiednich punktach obiegu (zgodnie z rysunkiem 6.2.2.1 i 6.2.2.2) [°C],

T_{g1}, T_{g2}, T_{g3} – temperatury wody geotermalnej w odpowiednich punktach układu (zgodnie z rysunkiem 6.2.2.1 i 6.2.2.2) [°C],

$p_{n1}, p_{n2s}, p_{n3}, p_{n4s}, p_{n5}$ – ciśnienia czynnika roboczego w odpowiednich punktach obiegu [MPa],

$h_{n1}, h_{n2s}, h_{n3}, h_{n4s}, h_{n5}$ – wartości entalpii właściwych czynnika roboczego w odpowiednich punktach obiegu [kJ/kg],

$s_{n1}, s_{n2s}, s_{n3}, s_{n4s}$ – wartości entropii właściwych czynnika roboczego w odpowiednich punktach obiegu [kJ/(kgK)],

x – stopień suchości pary czynnika roboczego,

$c_{p,g}$ – właściwa pojemność cieplna wody geotermalnej [kJ/(kgK)],

$\dot{m}_n$ – strumień czynnika roboczego w obiegu ORC [kg/s].

W pierwszej kolejności należy ustalić temperaturę odparowania czynnika roboczego T_{n5} przy czym wiadomo, że nie jest możliwe określenie tej temperatury wprost i wielkość ta podlega optymalizacji, a jej wartość ma bezpośredni wpływ na moc siłowni i spełnienie pozostałych kryteriów pracy elektrowni.

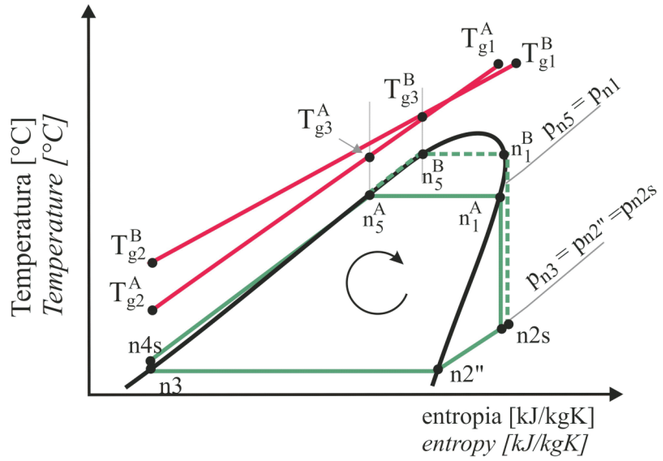
Optymalna wartość temperatury odparowania czynnika roboczego zostanie określona metodą kolejnych przybliżeń. Ponieważ wiadomym jest, że:

$$T_{n5} < T_{g1} \tag{6.2.11}$$

początkową wartości temperatury T_{n5} można określić z zależności:

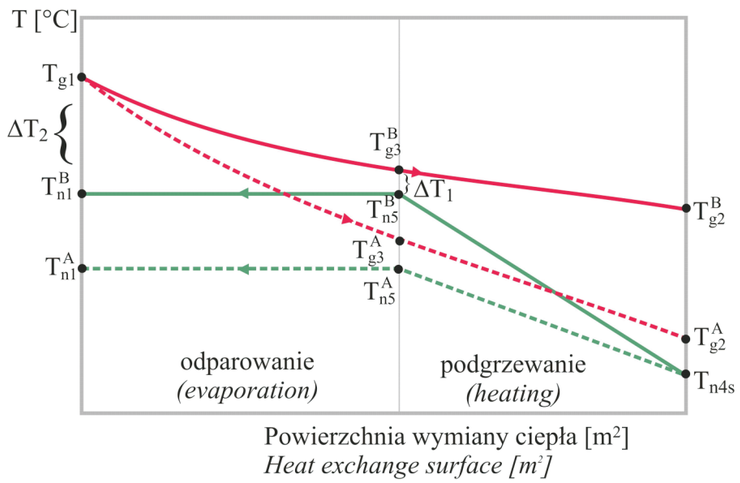
$$T_{n5} = T_{g1} - \Delta T_2 \tag{6.2.12}$$

gdzie: ΔT_2 – wartość różnicy temperatur przyjęta do obliczeń w pierwszym kroku (np. ΔT_2 = 10 K).



Rys. 6.2.2.1. Cykl przemian termodynamicznych czynnika suchego realizowanych w obiegu siłowni ORC bez przegrzewania pary, z zaznaczonymi temperaturami wody termalnej dla wariantów A i B

Fig. 6.2.2.1. Dry fluid thermodynamic cycle in an ORC power plant without superheating steam, with thermal water temperatures marked for variants A and B



Rys. 6.2.2.2. Rozkład temperatur w wymienniku W1 dla siłowni z czynnikiem suchym bez przegrzewania pary (dla wody termalnej dla poszczególnych wariantów A i B – kolor czerwony oraz dla czynnika roboczego – kolor zielony)

Fig. 6.2.2.2. Temperature distribution in the W1 heat exchanger for a dry fluid power plant without superheating steam (thermal water for variants A and B – red, working fluid – green)

Następnie za pomocą bazy danych właściwości substancji chemicznych należy określić ciśnienie na krzywej nasycenia x = 0:

$$p_{n5} = f(T_{n5}, x = 0) \tag{6.2.13}$$

oraz entalpię właściwą w punkcie n5:

$$h_{n5} = f(p_{n5}, x = 0) \tag{6.2.14}$$

Dla obiegu ORC (obiegu porównawczego siłowni parowej) ciśnienie p_{n5} jest ciśnieniem leżącym na izobarze parowania, to znaczy że:

$$p_{n5} = p_{n1} = p_{n4s} \tag{6.2.15}$$

Entalpię h i entropię właściwą s w stanie n1 można określić na podstawie niżej podanych relacji:

$$h_{n1} = f(p_{n1}, x = 1) \tag{6.2.16}$$

$$s_{n1} = f(p_{n1}, x = 1) \tag{6.2.17}$$

Dla czynnika suchego, w układzie bez przegrzewania pary słuszna jest równość:

$$T_{n5} = T_{n1} \tag{6.2.18}$$

Na podstawie znanej wartości temperatury skraplania czynnika roboczego T_{n3} można określić wartość ciśnienia czynnika roboczego w tym punkcie:

$$p_{n3} = f(T_{n3}, x = 0) \tag{6.2.19}$$

oraz

$$h_{n3} = f(p_{n3}, x = 0) \tag{6.2.20}$$

oraz

$$s_{n3} = f(p_n, x = 0) \tag{6.2.21}$$

Z uwagi na to, że ciśnienie skraplania p_{n3} wyznacza także izobarę dolną obiegu Clausiusa-Rankine'a, co można zapisać równaniem:

$$p_{n3} = p_{n2''} = p_{n2s} \tag{6.2.22}$$

Na podstawie ciśnienia p_{n2s} oraz tego, iż przyjęto że w turbinie odbywa się proces izentropowej ekspansji, to znaczy:

$$s_{n2s} = s_{n1} \tag{6.2.23}$$

można określić entalpię właściwą h_{n2s} z relacji:

$$h_{n2s} = f(p_{n2s}, s_{n1}) \tag{6.2.24}$$

Podobnie dla pompy założono, że proces realizowany jest według przemiany izentropowej, a ciśnienie przetłaczanego czynnika wzrasta od ciśnienia dolnego p_{n3} do ciśnienia p_{n1}, co można zapisać zależnością:

$$s_{n3} = s_{n4s} \tag{6.2.25}$$

tym samym wartość entalpii właściwej h_{n4s} można określić z niżej podanej relacji:

$$h_{n4s} = f(p_{n1}, s_{n3}) \tag{6.2.26}$$

Po wyznaczeniu parametrów stanu czynnika roboczego w obiegu należy sprawdzić słuszność założenia temperatury T_{n5}. W tym celu należy na podstawie równania bilansu energii dla procesu podgrzewania czynnika roboczego:

$$\dot{m}_n(h_{n5} - h_{n4s}) = \dot{m}_g c_{p,g}(T_{g3} - T_{g2}) \tag{6.2.27}$$

lub z równania bilansu energii dla procesu odparowania czynnika roboczego:

$$\dot{m}_n(h_{n1} - h_{n5}) = \dot{m}_g c_{p,g}(T_{g1} - T_{g3}) \tag{6.2.28}$$

obliczyć temperaturę wody termalnej:

$$T_{g3} = T_{g2} + \frac{\dot{m}_n(h_{n5} - h_{n4s})}{\dot{m}_g c_{p,g}} \tag{6.2.29}$$

$$T_{g3} = T_{g1} - \frac{\dot{m}_n(h_{n1} - h_{n5})}{\dot{m}_g c_{p,g}} \tag{6.2.30}$$

Obliczona temperatura wody termalnej T_{g3} powinna spełniać niżej podaną nierówność:

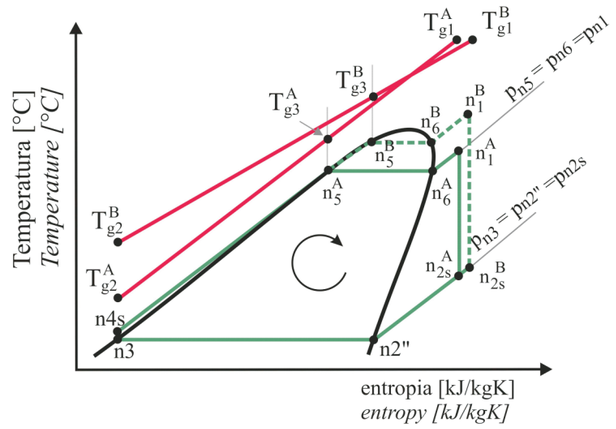
$$T_{g3} \geq T_{n5} + \Delta T_1 \tag{6.2.31}$$

gdzie: ΔT_1 – minimalna założona różnica temperatur pomiędzy wodą termalną a czynnikiem roboczym (np. ΔT_1 = 5 K) [K].

Jeżeli obliczona temperatura wody termalnej T_{g3} nie spełnia warunku (6.2.31) (jest zbyt niska) należy przeprowadzić kolejny krok zwiększając wartość ΔT_2.

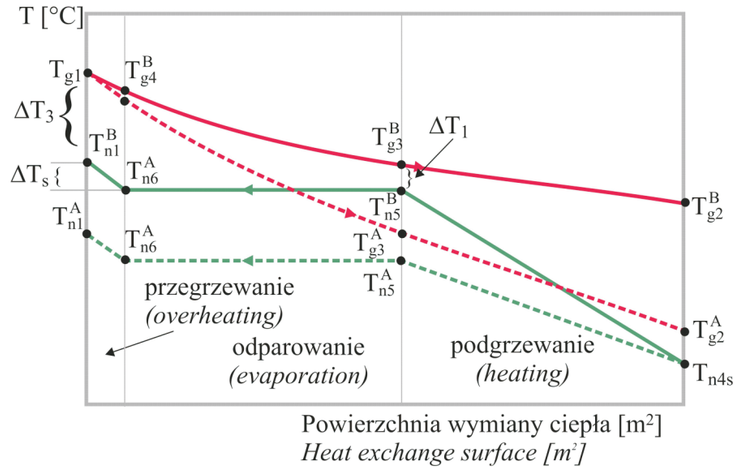
6.2.3. Algorytm określania parametrów pracy siłowni z zastosowaniem czynnika suchego z przegrzewaniem pary czynnika roboczego

Cykl przemian termodynamicznych realizowanych w obiegu siłowni ORC za pomocą czynnika suchego z przegrzewaniem pary czynnika przedstawiono na rysunku 6.2.3.1, natomiast na rysunku 6.2.3.2 pokazano rozkład temperatur wody termalnej dla wariantów A i B oraz temperatury czynnika roboczego w wymienniku W1.



Rys. 6.2.3.1. Cykl przemian termodynamicznych czynnika suchego realizowanych w obiegu siłowni ORC z przegrzewaniem pary, z zaznaczonymi temperaturami wody termalnej dla wariantów A i B

Fig. 6.2.3.1. Dry fluid thermodynamic cycle in an ORC power plant with superheating steam, with thermal water temperatures marked for variants A and B



Rys. 6.2.3.2. Rozkład temperatur w wymienniku W1 dla siłowni z czynnikiem suchym z przegrzewaniem pary (dla wody termalnej dla wariantów A i B – kolor czerwony oraz dla czynnika roboczego – kolor zielony)

Fig. 6.2.3.2. Temperature distribution in the W1 heat exchanger for a dry fluid power plant with superheating steam (thermal water for variants A and B – red, working fluid – green)

Jak wspomniano wcześniej, przegrzewanie czynnika suchego przed skierowaniem go do turbiny parowej nie jest konieczne, jednak powinno być stosowane ze względów eksploatacyjnych.

W pierwszej kolejności należy ustalić początkową wartość temperatury odparowania czynnika roboczego T_{n5} z zależności:

$$T_{n5} = T_{g1} - \Delta T_2 \tag{6.2.32}$$

gdzie ΔT_2 jest wartością przyjętą do obliczeń w pierwszym kroku (np. ΔT_2 = 10 K).

Następnie za pomocą bazy danych właściwości substancji chemicznych należy określić ciśnienie na krzywej nasycenia x = 0:

$$p_{n5} = f(T_{n5}, x = 0) \tag{6.2.33}$$

oraz entalpię właściwą w punkcie n5:

$$h_{n5} = f(p_{n5}, x = 0) \tag{6.2.34}$$

Dla obiegu ORC (obiegu porównawczego siłowni parowej) ciśnienie p_{n5} jest ciśnieniem leżącym na izobarze parowania, to znaczy że:

$$p_{n5} = p_{n6} = p_{n1} = p_{n4s} \tag{6.2.35}$$

Entalpię właściwą w stanie n6 można określić na podstawie niżej podanej relacji:

$$h_{n6} = f(p_{n6}, x = 1) \tag{6.2.36}$$

Dla czynnika suchego, w układzie z przegrzewania pary słuszna jest równość:

$$T_{n5} = T_{n6} \tag{6.2.37}$$

Temperaturę pary w punkcie n1 można określić po uwzględnieniu założonego stopnia przegrzania pary czynnika:

$$T_{n1} = T_{n6} + \Delta T_s \tag{6.2.38}$$

gdzie: ΔT_s – założony (przyjęty do obliczeń) stopnień przegrzania czynnika [K].

Stopnień przegrzania czynnika określa następująca zależność:

$$\Delta T_s = T_{n1} - T_{n6} \tag{6.2.39}$$

W niniejszym opracowaniu przyjęto stałą wartość stopnia przegrzania czynnika ΔT_s = 3 K, jednak jeśli założony stopień przegrzania pary jest większy to należy sprawdzić, czy spełniony jest poniższy warunek:

$$T_{n1} \le T_{g1} + \Delta T_3 \tag{6.2.40}$$

gdzie: ΔT_3 jest minimalną założoną różnicą temperatur pomiędzy wodą termalną a czynnikiem roboczym (np. ΔT_3 = 5 K).

Jeśli warunek (6.2.40) nie jest spełniony oznacza to, że należy przejść do zależności (6.2.32) i zwiększyć wartość ΔT_2.

Jeśli warunek jest spełniony można przejść do kolejnego etapu, polegającego na wyznaczeniu pozostałych parametrów stanu czynnika roboczego:

$$h_{n1} = f(p_{n1}, T_{n1}) \tag{6.2.41}$$

$$s_{n1} = f(p_{n1}, T_{n1}) \tag{6.2.42}$$

Na podstawie znanej wartości temperatury skraplania czynnika roboczego T_{n3} można określić wartość ciśnienia czynnika roboczego w tym punkcie:

$$p_{n3} = f(T_{n3}, x = 0) \tag{6.2.43}$$

oraz

$$h_{n3} = f(p_{n3}, x = 0) \tag{6.2.44}$$

i

$$s_{n3} = f(p_n, x = 0) \tag{6.2.45}$$

Z uwagi na to, że ciśnienie skraplania p_{n3} wyznacza tak zwaną izobarę dolną obiegu Clausiusa-Rankine'a, co można zapisać równaniem:

$$p_{n3} = p_{n2''} = p_{n2s} \tag{6.2.46}$$

na podstawie ciśnienia p_{n2s} oraz tego, iż przyjęto, że w turbinie odbywa się proces izentropowej ekspansji:

$$s_{n2s} = s_{n1} \tag{6.2.47}$$

można określić entalpie właściwą h_{n2s} z relacji:

$$h_{n2s} = f(p_{n2s}, s_{n1}) \tag{6.2.48}$$

Podobnie dla pompy założono, że proces realizowany jest według przemiany izentropowej, a ciśnienie przetłaczanego czynnika wzrasta od ciśnienia dolnego p_{n3} do ciśnienia p_{n1}, co można zapisać zależnością:

$$s_{n3} = s_{n4s} \tag{6.2.49}$$

tym samym wartość entalpii właściwej h_{n4s} można określić z niżej podanej relacji:

$$h_{n4s} = f(p_{n1}, s_{n3}) \tag{6.2.50}$$

Po wyznaczeniu parametrów stanu czynnika roboczego w obiegu należy sprawdzić słuszność założenia temperatury T_{n5}. W tym celu należy na podstawie równania bilansu energii dla procesu podgrzewania czynnika roboczego:

$$\dot{m}_n(h_{n5} - h_{n4s}) = \dot{m}_g c_{p,g}(T_{g3} - T_{g2}) \tag{6.2.51}$$

obliczyć temperaturę wody termalnej w T_{g3}:

$$T_{g3} = T_{g2} + \frac{\dot{m}_n(h_{n5} - h_{n4s})}{\dot{m}_g c_{p,g}} \tag{6.2.52}$$

lub

$$T_{g3} = T_{g1} - \frac{\dot{m}_n(h_{n1} - h_{n5})}{\dot{m}_g c_{p,g}} \tag{6.2.53}$$

Obliczona temperatura wody termalnej T_{g3} powinna spełniać niżej podaną nierówność:

$$T_{g3} \geq T_{n5} + \Delta T_1 \tag{6.2.54}$$

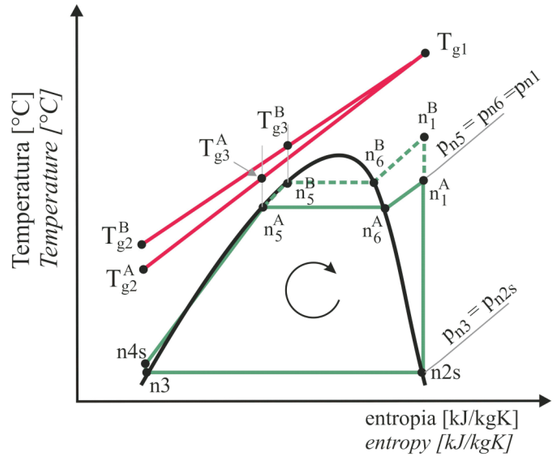
gdzie: ΔT_1 jest minimalną założoną różnicą temperatur pomiędzy wodą termalną a czynnikiem roboczym (np. ΔT_1 = 5 K). Jeżeli obliczona temperatura wody termalnej T_{g3} nie spełnia warunku (6.2.54) należy przeprowadzić kolejne przybliżenie zwiększając wartość ΔT_2.

6.2.4. Algorytm określania parametrów pracy siłowni z zastosowaniem czynnika mokrego z przegrzewaniem pary czynnika roboczego

Cykl przemian termodynamicznych realizowanych w obiegu siłowni ORC z mokrym czynnikiem roboczym przedstawiono na rysunku 6.2.4.1, natomiast na rysunku 6.2.4.2 pokazano rozkład temperatur wody termalnej dla wariantów A i B oraz temperatury czynnika roboczego w wymienniku W1.

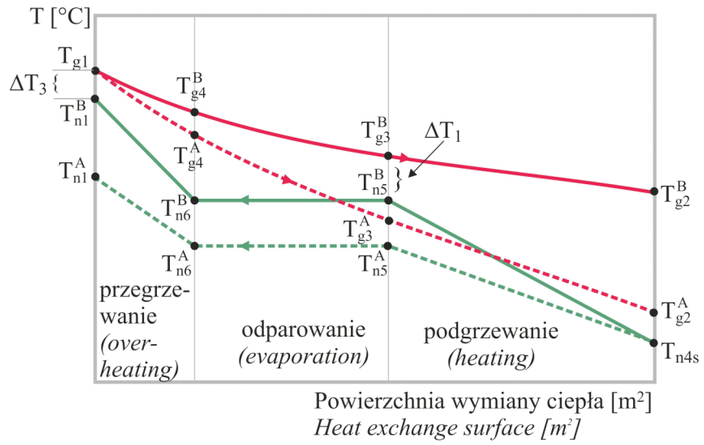
Jak wspomniano w rozdziale 3.2, przegrzewanie czynnika mokrego przed skierowaniem go do turbiny parowej jest niezbędne przynajmniej w stopniu umożliwiającym realizację procesu rozprężania pary w turbinie w obszarze pary przegrzanej lub suchej. Dla czynników mokrych obliczenia paramentów pracy siłowni można przeprowadzić na dwa sposoby. W pierwszym z nich ustala się temperaturę odparowania czynnika roboczego i na tej podstawie prowadzi dalsze obliczenia. Ten sposób jest efektywny dla czynników o krzywej nasycenia x = 1 zbliżonej lub słabo odchylonej od linii pionowej, a kolejność postępowania jest taka jak to przedstawiono w rozdziale 6.2.3. Dla niektórych czynników (o krzywej nasycenia x = 1 mocno odchylonej od pionu) korzystniej jest przeprowadzać obliczenia zaczynając od określenia temperatury przegrzania czynnika roboczego T_{n1}. Poniżej przedstawiono algorytm obliczeń dla takiego przypadku, przy czym uzyskany wynik nie zależy od sposobu postępowania. W niniejszym algorytmie zastosowano następujące oznaczenia wielkości:

$T_{n1}, T_{n4s}, T_{n5}, T_{n6}$ – temperatury czynnika roboczego w odpowiednich punktach obiegu (zgodnie z rysunkiem 6.2.4.1 i 6.2.4.2), [°C],



Rys. 6.2.4.1. Cykl przemian termodynamicznych czynnika w obiegu siłowni ORC z czynnikiem mokrym, z zaznaczonymi temperaturami wody termalnej dla wariantów A i B

Fig. 6.2.4.1. Wet fluid thermodynamic cycle in an ORC power plant, with thermal water temperatures marked for variants A and B



Rys. 6.2.4.2. Rozkład temperatur w wymienniku W1 dla siłowni z czynnikiem mokrym (dla wody termalnej dla poszczególnych wariantów A i B – kolor czerwony oraz dla czynnika roboczego – kolor zielony)

Fig. 6.2.4.2. Temperature distribution in the W1 heat exchanger for a wet fluid power plant (thermal water for variants A and B – red, working fluid – green)

$T_{g1}, T_{g2}, T_{g4}, T_{g5}$ – temperatury wody geotermalnej w odpowiednich punktach układu (zgodnie z rysunkiem 6.2.4.1 i 6.2.4.2), [°C],

$p_{n1}, p_{n2s}, p_{n3}, p_{n4s}, p_{n5}, p_{n6}$ – ciśnienia czynnika roboczego w odpowiednich punktach obiegu [MPa],

$h_{n1}, h_{n2s}, h_{n3}, h_{n4s}, h_{n5}, h_{n6}$ – wartości entalpii właściwych czynnika roboczego w odpowiednich punktach obiegu [kJ/kg],

$s_{n1}, s_{n2s}, s_{n3}, s_{n4s}$ – wartości entropii właściwych czynnika roboczego w odpowiednich punktach obiegu [kJ/(kgK)],

x – stopień suchości pary czynnika roboczego,
$c_{p,g}$ – właściwa pojemność cieplna wody geotermalnej [kJ/(kgK)],
$\dot{m}_n$ – strumień czynnika roboczego w obiegu ORC [kg/s].

W pierwszej kolejności należy określić temperaturę pary czynnika roboczego na wlocie do turbiny T_{n1}:

$$T_{n1} = T_{g1} - \Delta T_3 \tag{6.2.55}$$

gdzie: ΔT_3 jest założoną różnicą temperatur pomiędzy wodą termalną a czynnikiem roboczym (w pierwszym kroku np. ΔT_3 = 5 K).

Na podstawie znanej (założonej) wartości temperatury skraplania czynnika roboczego T_{n3} należy określić wartość ciśnienia czynnika roboczego w tym punkcie:

$$p_{n3} = f(T_{n3}, x = 0) \tag{6.2.56}$$

oraz

$$h_{n3} = f(p_{n3}, x = 0) \tag{6.2.57}$$

i

$$s_{n3} = f(p_n, x = 0) \tag{6.2.58}$$

Z uwagi na to, że ciśnienie skraplania p_{n3} wyznacza izobarę dolną obiegu Clausiusa-Rankine'a, co można zapisać równaniem:

$$p_{n3} = p_{n2s} \tag{6.2.59}$$

entalpię i entropię właściwą w punkcie n2s można określić z relacji:

$$h_{n2s} = f(p_{n2s}, x = 1) \tag{6.2.60}$$

$$s_{n2s} = f(p_{n2s}, x = 1) \tag{6.2.61}$$

Na podstawie określonej z zależności (6.2.55) temperatury T_{n1} oraz tego, iż przyjęto, że w turbinie odbywa się proces izentropowej ekspansji:

$$s_{n2s} = s_{n1} \tag{6.2.62}$$

można wyznaczyć wartość ciśnienia na izobarze górnej:

$$p_{n1} = f(T_{n1}, s_{n2s}) \tag{6.2.63}$$

przy czym:

$$p_{n1} = p_{n6} = p_{n5} = p_{n4s} \tag{6.2.64}$$

Następnie za pomocą bazy danych właściwości substancji chemicznych należy określić temperaturę i entalpię właściwą w punkcie n6:

$$T_{n5} = f(p_{n6}, x = 1) \tag{6.2.65}$$

$$h_{n6} = f(p_{n6}, x = 1) \tag{6.2.66}$$

oraz entalpię właściwą w punkcie n5:

$$h_{n5} = f(p_{n5}, x = 0) \tag{6.2.67}$$

gdyż

$$T_{n5} = T_{n6} \tag{6.2.68}$$

Określenie parametrów w punkcie n4s jest możliwe na podstawie założenia, że proces pompowania realizowany jest według przemiany izentropowej:

$$s_{n4s} = s_{n3} \tag{6.2.69}$$

a ciśnienie przetłaczanego czynnika wzrasta od ciśnienia dolnego p_{n3} do ciśnienia p_{n1}, co można zapisać zależnością. Tym samym wartość entalpii właściwej h_{n4s} można określić z niżej podanej relacji:

$$h_{n4s} = f(p_{n1}, s_{n3}) \tag{6.2.70}$$

Na podstawie zależności (6.2.10) należy obliczyć strumień czynnika roboczego w obiegu $\dot{m}_n$ oraz na podstawie równania bilansu energii dla procesu podgrzewania czynnika roboczego:

$$\dot{m}_n (h_{n5} - h_{n4s}) = \dot{m}_g c_{p,g} (T_{g3} - T_{g2}) \tag{6.2.71}$$

obliczyć temperaturę wody termalnej T_{g3}:

$$T_{g3} = T_{g2} + \frac{\dot{m}_n (h_{n5} - h_{n4s})}{\dot{m}_g c_{p,g}} \tag{6.2.72}$$

Obliczona temperatura wody termalnej T_{g3} powinna spełniać niżej podaną nierówność:

$$T_{g3} \geq T_{n5} + \Delta T_1 \tag{6.2.73}$$

gdzie: ΔT_1 jest minimalną (założoną) różnicą temperatur pomiędzy wodą termalną a czynnikiem roboczym (np. ΔT_1 = 5 K).

Jeżeli obliczona temperatura wody termalnej T_{g3} nie spełnia warunku (6.2.73) należy przeprowadzić kolejny krok obliczeń zwiększając wartość ΔT_3.

6.2.5. Założenia do oceny wpływu zmian parametrów wody termalnej i parametrów pracy instalacji na efektywność pracy systemu binarnego

Przeanalizowano efektywność zastosowania różnych czynników roboczych: naturalnych, syntetycznych węglowodorów oraz substancji krzemopochodnych, których podstawowe dane zestawiono w tabeli 6.2.5.1.

Tabela 6.2.5.1. Zestawienie czynników roboczych uwzględnionych w obliczeniach
Table 6.2.5.1. Operating media for the ORC system

Czynnik roboczy	Rodzaj	Temperatura krytyczna °C	Zakres ciśnień [MPa] dla różnicy temperatur 30–80°C	Uwagi
MM heksametldisiloxan $C_6H_{18}OSi_2$	suchy	245,6	0,007–0,054	silikonowy
Methanol CH_3OH	mokry	239,5	0,022–0,181	naturalny
Izobutan $CH(CH_3)_3$ R600a	suchy do 105°C powyżej mokry	134,66	0,405–1,344	naturalny
R 236fa $CF_3CH_2CF_3$	suchy do 100°C powyżej mokry	124,92	0,321–1,249	fluorowęglowodór
R1234ze trans-1,3,3,3-tetrafluor opropan	suchy do 65°C powyżej mokry	109,37	0,578–1,858	fluorowęglowodór
R 227ea CF_3CHFCF_3	suchy do 80°C powyżej mokry	101,75	0,528–1,858	fluorowęglowodór

Do obliczeń przyjęto następujące założenia:

- minimalna różnica temperatur pomiędzy wodą termalną a czynnikiem roboczym ΔT_1 = 5 K,
- temperatura skraplania czynnika roboczego T_{n3} = 30°C,
- sprawność turbogeneratora t = 80%,
- sprawność agregatu pompowego p = 75%,

Wartości ciepła właściwego oraz gęstość wody termalnej w wytypowanych strefach (por. rozdz. 7) przedstawiono w tabeli 6.2.5.2. W tabeli tej zestawiono również prognozowane temperatury wydobywanej wody termalnej T_{g1}, mineralizację oraz wydajności ujęć geotermalnych.

Wartości gęstości i ciepła właściwego dla wody, zestawione w tabeli 6.2.5.2, określono na podstawie zależności przedstawionych w pracy Miecznika (2013).

Tabela 6.2.5.2. Przewidywane parametry ujęcia geotermalnego dla wybranych lokalizacji elektrowni i elektrociepłowni geotermalnych wraz z parametrami fizycznymi wydobywanych wód termalnych
Table 6.2.5.2. Projected parameters for selected locations of geothermal power plants and heat and power generating plants alongside physical parameters of sourced thermal waters

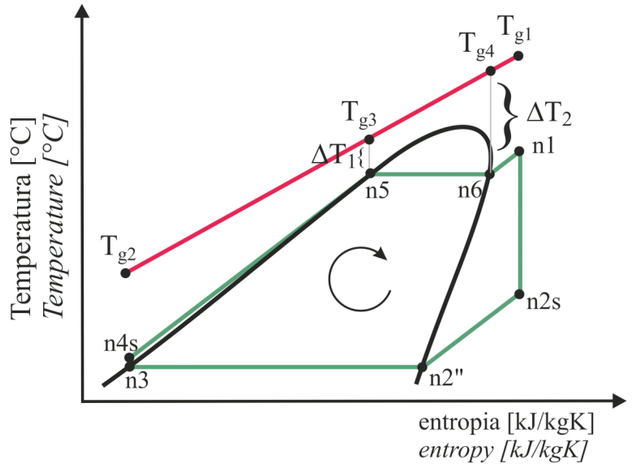
Strefa	[m³/h]	[°C]	Mineralizacja [g/l]	Gęstość wody [kg/m³]	Ciepło właściwe [kJ/(kg K)]
Koło	200	118	175	1 075,7	3,48
Turek	150	98	100	1 033,5	3,75
Konin	150	98	75	1 015,1	3,86
Ślesin	150	98	100	1 033,5	3,75
Żnin (woj. kujawsko-pomorskie)	100	105	170	1 080,6	3,48
Łowicz	50	100	300	1 180,0	3,09
Stargard Szczeciński	275	89	120	1 054,1	3,66
Chociwel (woj. zachodniopomorskie)	275	89	125	1 057,8	3,64
Bańska Niżna	600	86	3	970,1	4,18
Cieplice	45	86	0,5	968,3	4,20

Przewidywane parametry ujęcia geotermalnego dla wybranych lokalizacji elektrowni i elektrociepłowni geotermalnych wraz z parametrami fizycznymi wydobywanych wód termalnych zestawiono w tabeli 6.2.5.2. Obliczenia wykonano dla trzech oczekiwanych temperatur końcowych wody termalnej (woda schłodzona w systemie energetycznym) T_{g2} :

- **wariant A** – woda termalna zasila tylko elektrownię geotermalną (po zasileniu elektrowni będzie kierowana do odwiertu chłonnego) – wybrano te parametry pracy elektrowni, przy których moc elektrowni jest najwyższa;
- **wariant B** – woda termalna będzie wykorzystywana na potrzeby ciepłownicze lub do innych procesów technologicznych – do obliczeń przyjęto 60°C;
- **wariant C** – woda termalna będzie wykorzystywana na potrzeby technologii basenowej i/lub cele balneologiczne – do obliczeń przyjęto 47°C.

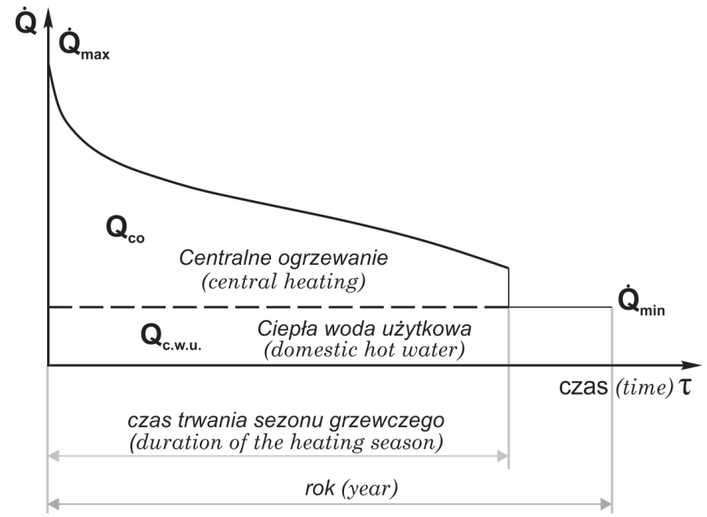
Wyniki obliczeń uzyskano z wykorzystaniem bazy czynników organicznych RefProp 9.0. (Badr i in. 1985), na podstawie której określono termiczne i kaloryczne parametry czynników w charakterystycznych punktach obiegu ORC.

W zestawieniach tabelarycznych, zaprezentowanych w rozdziale 7, odpowiednio dla każdej wytypowanej strefy zestawiono wyniki przeprowadzonych obliczeń. Oznaczenia w tabelach są zgodne ze schematem zaprezentowanym na rysunku 6.2.5.1.



Rys. 6.2.5.1. Cykl przemian termodynamicznych dla siłowni z czynnikiem R227ea

Fig. 6.2.5.1. Thermodynamic cycle for a plant with the R227ea medium



Rys. 6.2.6.1. Przykładowy uporządkowany wykres zapotrzebowania na ciepło na cele centralnego ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej (na podstawie Nowak i in. 2000)

Fig. 6.2.6.1. Example of an ordered diagram of heat demand for central heating and domestic hot water purposes (after Nowak et al. 2000)

6.2.6. Charakterystyka przyjętych układów technologicznych

Każdy system geotermalny składa się z dwóch części: systemu pozyskiwania energii geotermalnej i systemu wykorzystania energii geotermalnej. System pozyskiwania energii geotermalnej obejmuje wszystkie urządzenia i elementy, umożliwiające wydobycie wody termalnej oraz ponowne jej wtłoczenie do górotworu, po obniżeniu temperatury w wyniku odprowadzenia ciepła w systemie ciepłowniczym. System wykorzystania energii geotermalnej składa się z elementów i urządzeń pozwalających na energetyczne wykorzystanie lub transformację energii cieplnej zawartej w wydobywanych wodach na energię elektryczną. W zależności od lokalnych uwarunkowań, może to być ciepłownia lub elektrociepłownia z różnym przeznaczeniem produkowanej energii cieplnej, albo sama elektrownia binarna. Na podstawie przeprowadzonych analiz, w niniejszej pracy przeprowadzono rozważania energetyczne dla systemów opartych na obiegu ORC.

Cechą charakterystyczną układów pokrywających zapotrzebowanie na ciepło, na cele centralnego ogrzewania jest praca przy zmiennym obciążeniu. Wynika to z tego, że zapotrzebowanie na ciepło zmienia się w ciągu doby oraz w czasie trwania całego sezonu ogrzewczego. System ciepłowniczy musi pracować ze zmienną mocą, tak aby dostosowywać strumień dostarczanego ciepła do zmiennych warunków atmosferycznych. Strumień ten powinien umożliwić utrzymanie wewnątrz pomieszczeń stałej temperatury, zapewniającej użytkownikom optymalne warunki komfortu cieplnego. Z tego powodu do określania ilości ciepła, potrzebnego do utrzymania określonej temperatury wewnętrznej, wykorzystuje się uporządkowany wykres zapotrzebowania na ciepło. Wykres ten pozwala na odpowiednie zaprojektowanie układu, poprzez dobór odpowiednich urządzeń umożliwiających najbardziej efektywne wykorzystanie energii ze źródła geotermalnego. Przykładowy uporządkowany wykres zapotrzebowania na ciepło przedstawiono na rysunku 6.2.6.1. Na wykresie uwzględniono zapotrzebowanie na ciepło na cele centralnego ogrzewania (c.o.) oraz na cele przygotowania ciepłej wody użytkowej (c.w.u.). Zapotrzebowanie na ciepło na cele c.o. występuje tylko w trakcie trwania sezonu grzewczego i zależy od temperatury zewnętrznej. Natomiast zapotrzebowanie na ciepło do przygotowania c.w.u. jest stałe (niezależne od warunków zewnętrznych) i występuje przez cały rok.

Biorąc pod uwagę powyższy wykres system ciepłowniczy powinien być tak zaprojektowany, aby był w stanie pokryć maksymalne zapotrzebowanie na ciepło. Maksymalne zapotrzebowanie na ciepło występuje w krótkim przedziale czasu, kiedy na zewnątrz panują najniższe temperatury. Z tego względu najkorzystniej jest, gdy w układzie przewidziane jest urządzenie szczytowe, uruchamia ne w momencie spadku temperatury zewnętrznej poniżej określonej (wcześniej ustalonej) wartości.

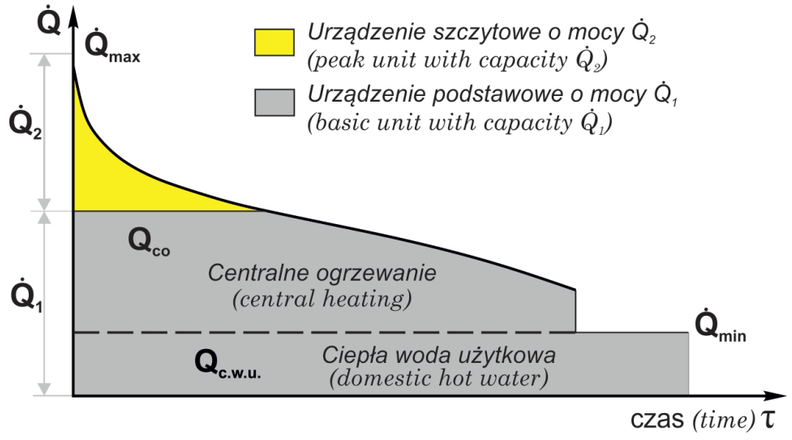
Taki przypadek zobrazowano na rysunku 6.2.6.2, przedstawiającym uporządkowany wykres zapotrzebowania na ciepło z zaznaczeniem obszarów działania dwóch urządzeń wchodzących w skład ciepłowni: urządzenia podstawowego o mocy $\dot{Q}_1$ i urządzenia szczytowego o mocy $\dot{Q}_2$.

Czas występowania danych temperatur można określić z zależności podanej przez Reissa (6.2.74):

$$\frac{T_{Zg} - T_Z}{T_{Zg} - T_{Z\min}} = [1 - \sqrt[3]{\bar{\tau}} + \bar{\tau}^2 (1 - \sqrt{\bar{\tau}})] \tag{6.2.74}$$

gdzie: T_{Zg} – zewnętrza temperatura graniczna, przy której rozpoczyna się sezon grzewczy [°C],
T_Z – temperatura zewnętrza (zmienna w czasie) [°C],
$T_{Z\min}$ – minimalna temperatura zewnętrza zależna od strefy klimatycznej [°C],
$\bar{\tau}$ – czas zredukowany.

W celu wyznaczenia ilości ciepła przekazywanego przez sieć ciepłowniczą, ciepła geotermalnego i ciepła dostarczonego przez urządzenie szczytowe, należy posłużyć się podanymi niżej wzorami.



Rys. 6.2.6.2. Uporządkowany wykres zapotrzebowania na ciepło z uwzględnieniem pokrycia obciążenia przez dwa źródła ciepła w ciepłowni (na podstawie Nowak i in. 2000)

Fig. 6.2.6.2. Example of an ordered diagram of heat demand, accounting for the load being covered by two heat sources at the heat plant (after Nowak et al. 2000)

Wyrażenie na rozkład zapotrzebowania ciepła na potrzeby centralnego ogrzewania, zależnego od temperatury zewnętrznej T_Z, minimalnej temperatury zewnętrznej $T_{Z\min}$ oraz temperatury wewnątrz pomieszczeń T_W, przyjmuje następującą postać:

$$\dot{Q}_{co} = \dot{Q}_{co\max}\frac{T_W - T_Z}{T_W - T_{Z\min}} \tag{6.2.75}$$

gdzie: T_W – temperatura wewnętrzna [°C],
T_Z – temperatura zewnętrza (zmienna w czasie) [°C],
$T_{Z\min}$ – minimalna temperatura zewnętrza zależna od strefy klimatycznej [°C],
$\dot{Q}_{co}$ – strumień ciepła na potrzeby c.o. [kW],
$\dot{Q}_{co\max}$ – maksymalny strumień ciepła na potrzeby c.o. [kW].

Strumień ciepła przekazany przez sieć cieplną, równoważny zapotrzebowaniu na ciepło $\dot{Q}_{co}$ (przy zaniechaniu strat związanych z przesyłem), określa się na podstawie strumienia czynnika grzewczego $\dot{m}_S$, przepływającego przez odbiorniki ciepła oraz na podstawie temperatury czynnika na zasilaniu T_{Sz} i powrocie T_{Sp}, wykorzystując zależność:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_S c_S (T_{Sz} - T_{Sp}) \tag{6.2.76}$$

gdzie: T_{Sz} – temperatury czynnika na zasilaniu odbiorników ciepła [°C],
T_{Sp} – temperatury czynnika na powrocie z odbiorników ciepła [°C],
c_S – ciepło właściwe czynnika grzewczego [kJ/(kg K)],
$\dot{m}_S$ – strumień czynnika grzewczego [kg/s],
$\dot{Q}_c$ – strumień ciepła przekazany przez sieć cieplną układu c.o. [kW].

Wykorzystując zależność (6.2.76), po wprowadzeniu czasu zredukowanego z wykorzystania zależności (6.2.74) i (6.2.75):

$$\bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_0} \tag{6.2.77}$$

gdzie: $\bar{\tau}$ – czas zredukowany,
τ – czas [h],
τ_0 – czas trwania sezonu grzewczego [h]

można określić ilość ciepła przekazywanego przez sieć cieplną w określonym przedziale czasu (od $\bar{\tau}_1$ do $\bar{\tau}_2$), według równania:

$$Q_c = \tau_0 \int_{\bar{\tau}_1}^{\bar{\tau}_2} \dot{Q}_c d\bar{\tau} = c_s \tau_0 \int_{\bar{\tau}_1}^{\bar{\tau}_2} \dot{m}_s (T_{Sz} - T_{Sp}) d\bar{\tau} \tag{6.2.78}$$

gdzie: Q_c – ilość ciepła przekazywanego przez sieć ciepłowniczą [kWh],
$\dot{Q}_c$ – strumień ciepła przekazany przez sieć cieplną układu c.o. [kW].
T_{Sz} – temperatury czynnika na zasilaniu odbiorników ciepła [°C],
T_{Sp} – temperatury czynnika na powrocie z odbiorników ciepła [°C],
c_S – ciepło właściwe czynnika grzewczego [kJ/(kg K)],
$\dot{m}_S$ – strumień czynnika grzewczego [kg/s],
$\bar{\tau}$ – czas zredukowany,
τ_0 – czas trwania sezonu grzewczego [h].

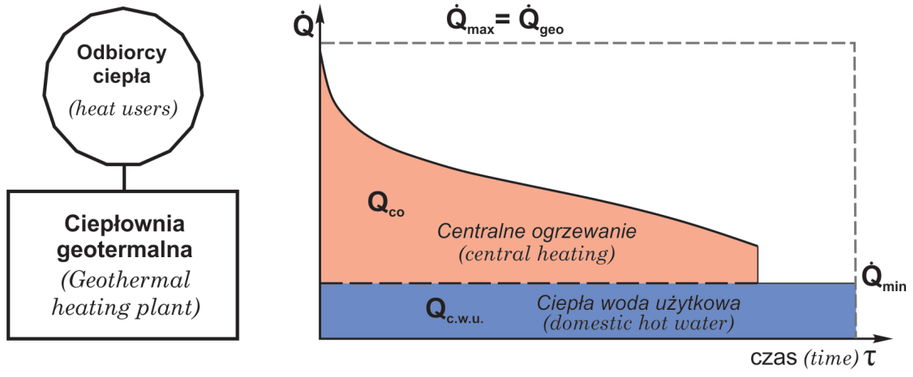
W powyższym wyrażeniu, w zależności od zastosowanego systemu regulacji ciepła parametrami zmieniającymi się w zależności od temperatury zewnętrznej, co bezpośrednio przekłada się na zmienność tych parametrów w funkcji czasu, są: w przypadku regulacji ilościowej strumień wody sieciowej, w przypadku regulacji jakościowej temperatura wody zasilającej, a w przypadku regulacji mieszanej obydwa parametry jednocześnie.

Wybór systemu wykorzystania energii geotermalnej w dużej mierze zależy od parametrów wydobywanej wody termalnej, jak i parametrów charakteryzujących potencjalnych odbiorców ciepła.

Stopień zagospodarowania energii ze źródła geotermalnego zależy od zastosowanego rozwiązania w systemie wykorzystania energii geotermalnej.

W przypadku zastosowania samej elektrowni mamy do czynienia ze stałym obciążeniem źródła, przy założeniu, że elektrownia pracuje przez cały czas z taką samą mocą. W takim przypadku nie jest konieczne stosowanie dodatkowego źródła ciepła. System wykorzystania energii geotermalnej jest systemem monowalentnym, jedynym źródłem ciepła jest woda termalna. Możliwa do uzyskania moc elektryczna w takim systemie zależy od temperatury i strumienia objętości wody termalnej oraz od rodzaju zastosowanego czynnika w obiegu ORC. Wadą takiego systemu jest to, że konwersja energii geotermalnej w energię elektryczną odbywa się przy niskiej sprawności (pomimo znacznego wychłodzenia wody termalnej).

Zupełnie odmiennym przypadkiem jest zastosowanie w systemie wykorzystania energii geotermalnej klasycznej ciepłowni. Jeżeli parametry źródła geotermalnego pozwalają na pokrycie maksymalnego zapotrzebowania na ciepło, mamy również do czynienia z systemem monowalentnym. W przypadku, gdy ciepłownia pokrywa w całości zapotrzebowanie na cele centralnego ogrzewania i przygotowanie ciepłej wody użytkowej, wówczas optymalne wykorzystanie źródła geotermalnego mamy jedynie w chwilach najniższych temperatur zewnętrznych (w okresie zimowym). W okresie letnim, kiedy zapotrzebowanie na ciepło wynika jedynie z potrzeby podgrzania ciepłej wody użytkowej, mamy do czynienia z niewielkim wykorzystaniem możliwości źródła geotermalnego. Doskonale jest to zobrazowane na rysunku 6.2.6.3, przedstawiającym wykres uporządkowanego zapotrzebowania na ciepło na cele c.o. oraz c.w.u.



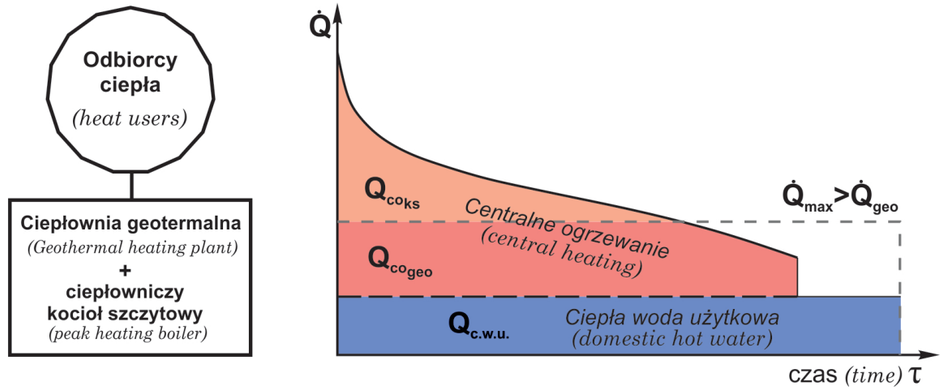
Rys. 6.2.6.3. Układ monowalentny – schemat blokowy ciepłowni geotermalnej, uporządkowany wykres zapotrzebowania na ciepło (na podstawie Nowak i in. 2000)

Fig. 6.2.6.3. Monovalent system – block diagram of a geothermal heat plant, ordered diagram of heat demand (after Nowak et. al. 2000)

Zastosowanie układu monowalentnego w odniesieniu do polskich warunków geotermalnych jest ograniczone. Z uwagi na niskie parametry wód termalnych, w ciepłowni geotermalnej jest konieczne dodatkowe źródło ciepła w postaci kotła szczytowego. Potrzeba stosowania dodatkowego źródła ciepła wynika stąd, że parametry wody termalnej nie wystarczają do pełnego podgrzania wody sieciowej układu ciepłowniczego, a więc zachodzi konieczność dogrzewania tej wody w innych urządzeniach (np. kotłach szczytowych). Z racji występowania dwóch źródeł ciepła układy tego typu nazywane są układami biwalentnymi. Przykładowy uporządkowany wykres zapotrzebowania na ciepło dla układu biwalentnego przedstawiono na rysunku 6.2.6.4.

W odróżnieniu od układów monwalentnych, układy te zapewniają bardziej efektywne wykorzystanie mocy dyspozycyjnej źródła geotermalnego. To z kolei korzystnie wpływa na efektywność ekonomiczną takiego rozwiązania. Drugą zaletą tego układu jest możliwość wykorzystania, po niezbędnych modernizacjach, lokalnych ciepłowni jako dodatkowego źródła ciepła wspomagającego źródło geotermalne. Taka możliwość wpływa na zmniejszenie nakładów inwestycyjnych, co w konsekwencji może przełożyć się na większą rentowność danego przedsięwzięcia.

W przypadku, gdy systemem wykorzystania energii geotermalnej jest elektrociepłownia, w zależności od parametrów wody termalnej, analogicznie jak w ciepłowni, możemy mieć do czynienia albo z układem monowalentnym, albo układem biwalentnym (z dodatkowym źródłem ciepła).



Rys. 6.2.6.4. Układ biwalentny – schemat blokowy ciepłowni geotermalnej, uporządkowany wykres zapotrzebowania na ciepło (na podstawie Nowak i in. 2000)

Fig. 6.2.6.4. Bivalent system – block diagram of a geothermal heat plant, ordered diagram of heat demand (after Nowak et al. 2000)

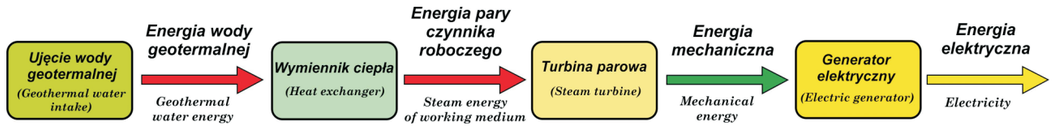
W przypadku elektrociepłowni geotermalnej możemy mieć dodatkowo do czynienia z dwoma wariantami instalacji. Pierwszy wariant dotyczy przypadku, kiedy w elektrociepłowni podstawowym produktem jest ciepło, a energia elektryczna jest wytwarzana z nadwyżki energii geotermalnej. W takiej elektrociepłowni wzrost lub spadek zapotrzebowania na ciepło będzie powodował zmiany w produkcji energii elektrycznej, co może niekorzystnie wpłynąć na pracę urządzeń w układzie siłowni ORC (w obiegu tej siłowni). Wynika to stąd, że układy ORC projektowane na konkretne parametry zasilania mogą pracować przy obciążeniu nie mniejszym niż około 50% mocy nominalnej. Każde obniżenie obciążenia pociąga za sobą zmniejszenie sprawności produkcji energii elektrycznej, która i tak w tych układach jest niska, oraz może spowodować utratę stabilności pracy turbiny. Z tych powodów stosowanie takiego rozwiązania nie jest zalecane.

Drugi wariant dotyczy elektrociepłowni, w której podstawowym produktem jest energia elektryczna, a pozostała część niezagospodarowanego strumienia energii geotermalnej wykorzystywana jest na cele ciepłownicze. To, czy woda termalna opuszczająca wymiennik ciepła obiegu ORC może być dalej wykorzystana do celów grzewczych zależy od jej temperatury oraz od temperatury wymaganej dla danego systemu grzewczego. Czym wyższa temperatura wody opuszczającej wymiennik układu ORC, tym większe możliwości dalszego jej wykorzystania. W przypadku wysokich temperatur można wykorzystać energię tej wody na cele ogrzewania wysokotemperaturowego, a w przypadku niższych na cele ogrzewania niskotemperaturowego, ogrzewania basenów, czy też w hodowli ryb.

Na kolejnych rysunkach przedstawiono schematy blokowe instalacji elektrowni, ciepłowni i elektrociepłowni z zaznaczeniem procesów transformacji i konwersji energii, zachodzących w tych układach. Odpowiednio na rysunku 6.2.6.5 przedstawiono blokowy schemat układu elektrowni geotermalnej.

Natomiast na rysunkach 6.2.6.6 i 6.2.6.7 przedstawiono odpowiednio schemat blokowy monowalentnego oraz biwalentnego układu ciepłowni geotermalnej, a na rysunkach 6.2.6.8 i 6.2.6.9 schematy blokowe dla elektrociepłowni geotermalnej.

Przedstawiony na rysunku 6.2.6.10 schemat blokowy obrazuje elektrownię hybrydową (zasilaną z dwóch źródeł). Jednym źródłem energii jest wydobywana woda z ujęcia geotermalnego, a drugim



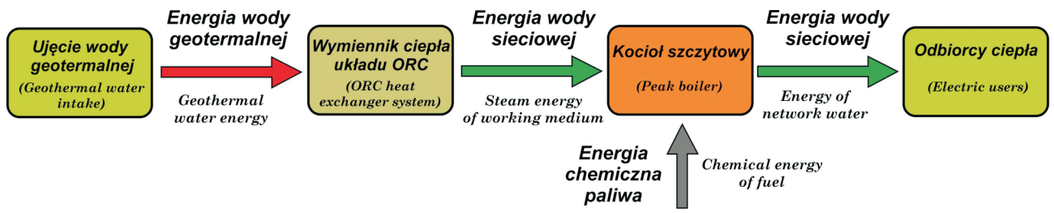
Rys. 6.2.6.5. Schemat blokowy elektrowni geotermalnej (układ monowalentny)

Fig. 6.2.6.5. Block diagram of a geothermal power plant (monovalent system)



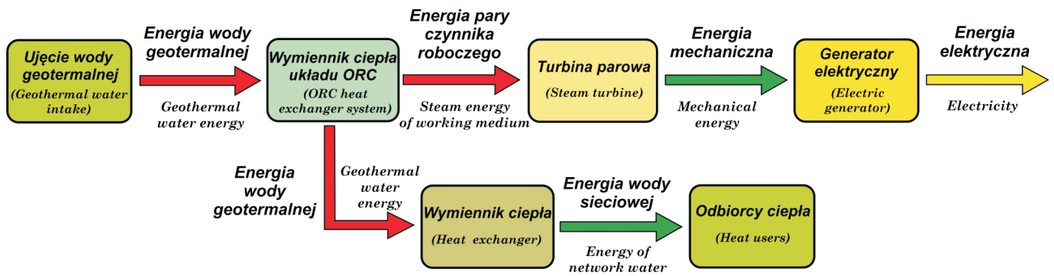
Rys. 6.2.6.6. Schemat blokowy ciepłowni geotermalnej (układ monowalentny)

Fig. 6.2.6.6. Block diagram of a geothermal heat plant (monovalent system)



Rys. 6.2.6.7. Schemat blokowy ciepłowni geotermalnej (układ biwalentny)

Fig. 6.2.6.7. Block diagram of a geothermal heat plant (bivalent system)

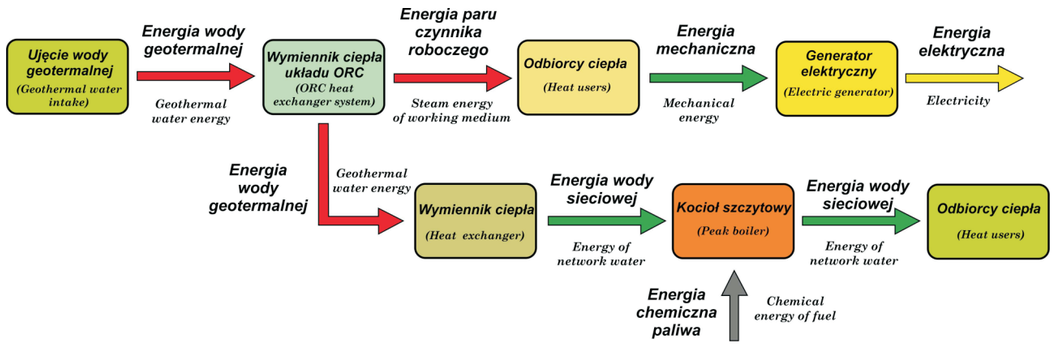


Rys. 6.2.6.8. Schemat blokowy elektrociepłowni geotermalnej (układ monowalentny)

Fig. 6.2.6.8. Block diagram of a geothermal heat and power generating plant (monovalent system)

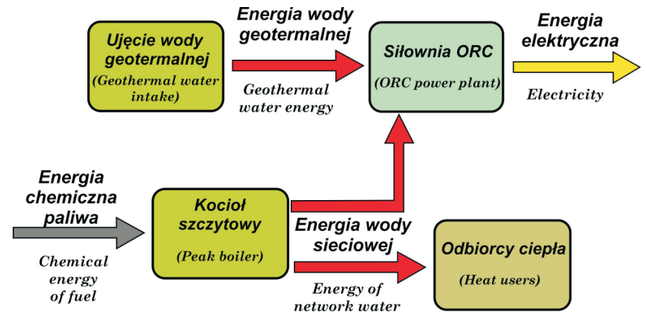
kocioł opalany paliwem. Najekonomiczniej byłoby wykorzystać w układzie kocioł opalany biomasą, co zapewnia wytwarzanie energii jedynie z odnawialnych źródeł.

Z analizy sieci ciepłowniczych w wybranych lokalizacjach wynika, że parametry czynnika grzewczego stosowane w tych sieciach są wysokie. Jest to spowodowane charakterystyką odbiorców ciepła przyłączonych do sieci przesyłowych, którzy posiadają wysokotemperaturowe odbiorniki



Rys. 6.2.6.9. Schemat blokowy elektrociepłowni geotermalnej (układ biwalentny)

Fig. 6.2.6.9. Block diagram of a geothermal heat and power generating plant (bivalent system)



Rys. 6.2.6.10. Schemat blokowy elektrociepłowni hybrydowej

Fig. 6.2.6.10. Block diagram of a hybrid heat and power generating plant

ciepła. Przy takiej charakterystyce odbiorców ciepła temperatura wody powrotnej z systemu ciepłowniczego (sieci ciepłowniczej) wynosi w zależności od temperatury zewnętrznej 70°C i więcej (czym niższa temperatura zewnętrzna tym wyższe parametry wody sieciowej). Tak wysoka temperatura niekorzystnie wpływa na możliwość wykorzystania źródła geotermalnego do podgrzewania wody sieciowej w rozpatrywanej elektrociepłowni.

W związku z tym, przy opracowywaniu koncepcji elektrociepłowni (ciepłowni) geotermalnej, poza produkcją ciepła na cele centralnego ogrzewania i ciepłej wody użytkowej, należy uwzględniać – gdy jest taka możliwość – dostarczanie ciepła technologicznego do różnego typu zakładów przemysłowych, rolnych lub innych. To spowoduje większe wykorzystanie energii geotermalnej, a tym samym znacznie efektywniejszą pracę określonego systemu geotermalnego.

6.2.7. Założenia dla oceny wskaźników energetycznych

W celu określenia efektywności zastosowanego rozwiązania można posłużyć się wskaźnikiem energetycznym, określającym stopień wykorzystania źródła geotermalnego. Niezbędną rzeczą przy obliczaniu tego wskaźnika jest określenie temperatury odniesienia T_{g2T}, do której teoretycznie można schłodzić wodę geotermalną. W niniejszej analizie przyjęto, że temperatura ta wynosi T_{g2T} = 30°C.

Przyjęcie takiej wartości temperatury T_{g2T} uzasadnione jest tym, że w przypadku układów, które współpracują z odbiornikami niskotemperaturowymi, lub przy wykorzystaniu wody termalnej do celów rolnych i hodowlanych, można tę wodę schłodzić do takiej (lub nawet niższej) temperatury. Wskaźnik wykorzystania źródła geotermalnego zdefiniowano jako stosunek całkowitej ilości wykorzystanego ciepła geotermalnego Q_g, do ilości ciepła $Q_{g\max}$. Ilość ciepła $Q_{g\max}$ jest to maksymalna ilość ciepła jaką można pozyskać w danym systemie geotermalnym, przy założeniu, że przez cały czas jego pracy wykorzystywany byłby cały strumień energii geotermalnej. Oznacza to, że wykorzystywany jest maksymalny strumień wody geotermalnej, a woda ta wychładzana jest do możliwie najniższej temperatury, temperatury odniesienia T_{g2T}.

W przypadku, gdy system wykorzystania energii geotermalnej pracuje ze zmiennym obciążeniem, wskaźnik wykorzystania energii geotermalnej definiujemy następująco:

$$E_g = \frac{Q_g}{Q_{g\max}} \qquad (6.2.79)$$

gdzie: Q_g – ilość ciepła pozyskanego ze źródła geotermalnego [kWh], [GJ],
$Q_{g\max}$ – maksymalna ilość ciepła możliwa do pozyskania ze źródła geotermalnego [kWh], [GJ].

Wielkość $Q_{g\max}$ określono z następującej zależności:

$$Q_{g\max} = \tau \dot{Q}_{g\max} = \tau \dot{m}_{g\max} c_{p,g} (T_{g1} - T_{g2T}) \qquad (6.2.80)$$

gdzie: $Q_{g\max}$ – maksymalna ilość ciepła możliwa do pozyskania ze źródła geotermalnego [kWh], [GJ],
$\dot{m}_{g\max}$ – maksymalny strumień wody termalnej w danym ujęciu [kg/s],
$C_{p,g}$ – ciepło właściwe wody termalnej [kJ/(kg K)],
T_{g1} – temperatury wody termalnej zasilającej dany układ (wody na wypływie z ujęcia) [°C],
T_{g2T} – temperatura odniesienia wody termalnej powracającej z danego układu [°C],
τ – czas pracy układu [h].

Jeżeli mamy do czynienia z systemem pracującym ze stałym obciążeniem wskaźnik ten można zdefiniować, jako stosunek odpowiednich strumieni ciepła, następująco:

$$E_g = \frac{\dot{m}_g c_{p,g} (T_{g1} - T_{g2})}{\dot{m}_{g\max} c_{p,g} (T_{g1} - T_{g2T})} \qquad (6.2.81)$$

gdzie: $\dot{m}_{g\max}$ – maksymalny strumień wody termalnej w danym ujęciu [kg/s],
$\dot{m}_g$ – rzeczywisty strumień wody termalnej kierowany do danego układu [kg/s],
$C_{p,g}$ – ciepło właściwe wody termalnej [kJ/(kg K)],
T_{g1} – temperatura wody termalnej zasilającej dany układ (wody na wypływie z ujęcia) [°C],
T_{g2} – temperatura wody termalnej powracającej z danego układu (wody zatłaczanej do ujęcia) [°C],
T_{g2T} – temperatura odniesienia wody termalnej powracającej z danego układu [°C].

W powyższej zależności wprowadzono oznaczenie $\dot{m}_{g\max}$. Strumień $\dot{m}_{g\max}$ jest to maksymalny do uzyskania strumień wody termalnej w danym ujęciu, a strumień $\dot{m}_g$ jest rzeczywistym strumieniem kierowanym do systemu wykorzystania energii geotermalnej. W przypadku, gdy do systemu wykorzystania energii geotermalnej kierowany jest maksymalny strumień wody termalnej $\dot{m}_g = \dot{m}_{g\max}$ wskaźnik zdefiniowany zależnością (6.2.81) upraszcza się do postaci:

$$E_g = \frac{T_{g1} - T_{g2}}{T_{g1} - T_{g2T}} \qquad (6.2.82)$$

Najkorzystniej, z punktu widzenia efektywności wykorzystania energii geotermalnej byłoby, gdyby wskaźnik ten był jak najbardziej zbliżony do jedności. W takim przypadku mamy do czynienia z optymalnym wykorzystaniem możliwości danego ujęcia geotermalnego.

Ważną rzeczą z punktu widzenia efektywności energetycznej działania systemu wykorzystującego energię geotermalną jest to, w jakim stopniu energia finalna została wyprodukowana z energii geotermalnej. W celu określenia tego udziału wprowadzono do rozważań wskaźnik Z_g. Wskaźnik ten określa stosunek energii wyprodukowanej w układzie ciepłowni, elektrowni lub elektrociepłowni z wykorzystaniem wody termalnej do całkowitej ilości wyprodukowanej energii. Zależności na wyznaczenie wskaźnika Z_g dla poszczególnych układów przedstawiono za pomocą poniższych wzorów:

- dla elektrociepłowni:

$$Z_g = \frac{Q_{CO\,g} + N_{el\,g}}{Q_{CO} + N_{el}} \qquad (6.2.83)$$

- dla ciepłowni:

$$Z_g = \frac{Q_{CO\,g}}{Q_{CO}} \qquad (6.2.84)$$

- dla elektrowni:

$$Z_g = \frac{N_{el\,g}}{N_{el}} \qquad (6.2.85)$$

gdzie: Q_{CO} – całkowita ilość ciepła wyprodukowanego na cele grzewcze [kWh], [GJ],
N_{el} – całkowita ilość wyprodukowanej energii elektrycznej [kWh], [GJ],
$Q_{CO\,g}$ – ilość energii cieplnej wyprodukowanej z wykorzystaniem energii geotermalnej [kWh], [GJ],
$N_{el\,g}$ – ilość energii elektrycznej wyprodukowanej z wykorzystaniem energii geotermalnej [kWh], [GJ].

Z analizy powyższych wskaźników Z_g wynika, że w przypadku układów monowalentnych, w których jedynym źródłem ciepła jest ujęcie geotermalne, wskaźnik ten przyjmuje wartość Z_g = 1. W przypadku układów biwalentnych wskaźnik Z_g będzie zawsze mniejszy od jedności, jednakże dla tych układów czym wyższa wartość tego wskaźnika tym lepiej.

Wyżej przedstawione wskaźniki określą stopień wykorzystania energii źródła geotermalnego oraz udział tego źródła w całkowitej produkcji energii. Kolejny wskaźnik uwzględnia sprawność transformacji i konwersji energii geotermalnej w danym systemie, w odniesieniu do maksymalnej, możliwej do pozyskania ilości energii geotermalnej. Wskaźnik sprawności wykorzystania energii źródła geotermalnego ξ_g dla elektrociepłowni zdefiniowano następująco:

$$\xi_g = \frac{Q_{CO\,g} + N_{el\,g}}{Q_{q\max}} \tag{6.2.86}$$

- dla ciepłowni:

$$\xi_g = \frac{Q_{CO\,g}}{Q_{g\max}} \tag{6.2.87}$$

- dla elektrowni:

$$\xi_g = \frac{N_{el\,g}}{Q_{q\max}} \tag{6.2.88}$$

gdzie: ξ_g – wskaźnik sprawności wykorzystania energii źródła geotermalnego,
$Q_{CO\,g}$ – ilość energii cieplnej wyprodukowanej z wykorzystaniem energii geotermalnej [kWh], [GJ],
$N_{el\,g}$ – ilość energii elektrycznej wyprodukowanej z wykorzystaniem energii geotermalnej [kWh], [GJ],
$Q_{g\max}$ – maksymalna ilość ciepła możliwa do pozyskania ze źródła geotermalnego [kWh], [GJ].

Z punktu widzenia energetycznego wykorzystania energii wydobywanych wód termalnych, oczywiście najkorzystniej byłoby, gdyby wskaźnik ξ_g przyjmował jak najwyższe wartości.

Z analizy pracy ciepłowni, elektrowni i elektrociepłowni wynika, że najwyższe wartości wskaźnika ξ_g można uzyskać w przypadku ciepłowni. Jest to spowodowane tym, że w ciepłowni końcowym produktem jest ciepło, więc nie zachodzi konieczność konwersji energii cieplnej wody termalnej na inną formę energii. W przypadku elektrowni wskaźnik ξ_g zależy od sprawności wytwarzania energii elektrycznej w układzie ORC. Sprawność ta zdefiniowana jest zależnością (6.2.3). Uwzględniając tę sprawność, zależność (6.2.88) przyjmuje postać:

$$\xi_g = \frac{\eta_{ORC} Q_g}{Q_{g\max}} \tag{6.2.89}$$

gdzie: η_{ORC} – sprawność wytwarzania energii elektrycznej w układzie ORC,
Q_g – ilość ciepła pozyskanego ze źródła geotermalnego [kWh], [GJ],
$Q_{g\max}$ – maksymalna ilość ciepła możliwa do pozyskania ze źródła geotermalnego [kWh], [GJ].

Zatem w przypadku elektrowni, czym wyższa sprawność wytwarzania energii elektrycznej w układzie ORC, tym wyższe wartości osiąga wskaźnik ξ_g.

Na tym etapie ogólności rozważań oceny efektywności pracy rozpatrywanych rozwiązań monowalentnych i biwalentnych z zastosowaniem ciepłowni i elektrociepłowni geotermalnych, w niniejszej pracy opracowano wskaźniki uproszczone, bez uwzględniania zmiennego zapotrzebowania strumienia ciepła na cele centralnego ogrzewania (c.o).

Aby uzyskać pełniejszy obraz oceny przedstawionej w rozdziale 7, wskaźniki oceny efektywności zagospodarowania poszczególnych wariantów określono dla odpowiednich temperatur wody termalnej na dopływie T_{g1} i na wypływie z instalacji T_{g2}. Jak wspomniano, w rozdziale 6.2.5 analizie poddano trzy różne warianty:

- **Wariant A** – dotyczy przypadku maksymalizacji mocy elektrowni, jako wynik minimalizacji temperatury $T_{g2} = T_{g2}^{A}$.
- **Wariant B** – dotyczy przypadku, w którym temperatura wody termalnej opuszczającej instalację wynosi $T_{g2} = T_{g2}^{B} = 60^{\circ}\mathrm{C}$.
- **Wariant C** – dotyczy przypadku, w którym temperatura wody termalnej opuszczającej instalację wynosi $T_{g2} = T_{g2}^{C} = 47^{\circ}\mathrm{C}$.

Ocenę wskaźników energetycznych według powyższych założeń przeprowadzono wyłącznie dla stref/miejscowości, z których posiadano potwierdzone dane dotyczące wielkości zapotrzebowania na ciepło (c.o.), uzyskane na podstawie przeprowadzonej ankietyzacji. Stąd też, biorąc pod uwagę dane dotyczące całkowitej produkcji ciepła w ciągu roku, wskaźniki przedstawione w rozdziałach 7.X.2 (odpowiednio dla kolejnych stref-X) podano dla lokalizacji zestawionych w tabeli 6.2.7.1.

Tabela 6.2.7.1. Wielkość produkcji ciepła w wybranych lokalizacjach
(na podstawie informacji z przedsiębiorstw ciepłowniczych)
Table 6.2.7.1. Heat production figures for selected locations
(based on information from heat supply companies)

Lokalizacja	Rzeczywista produkcja ciepła w roku Q_{CO} [TJ]
Koło	300
Łowicz	250
Konin	1 312
Stargard Szczeciński	618

6.3. Ocena wpływu zmian parametrów eksploatacyjnych oraz efektów ekonomicznych

(Leszek Pająk, Wiesław Bujakowski)

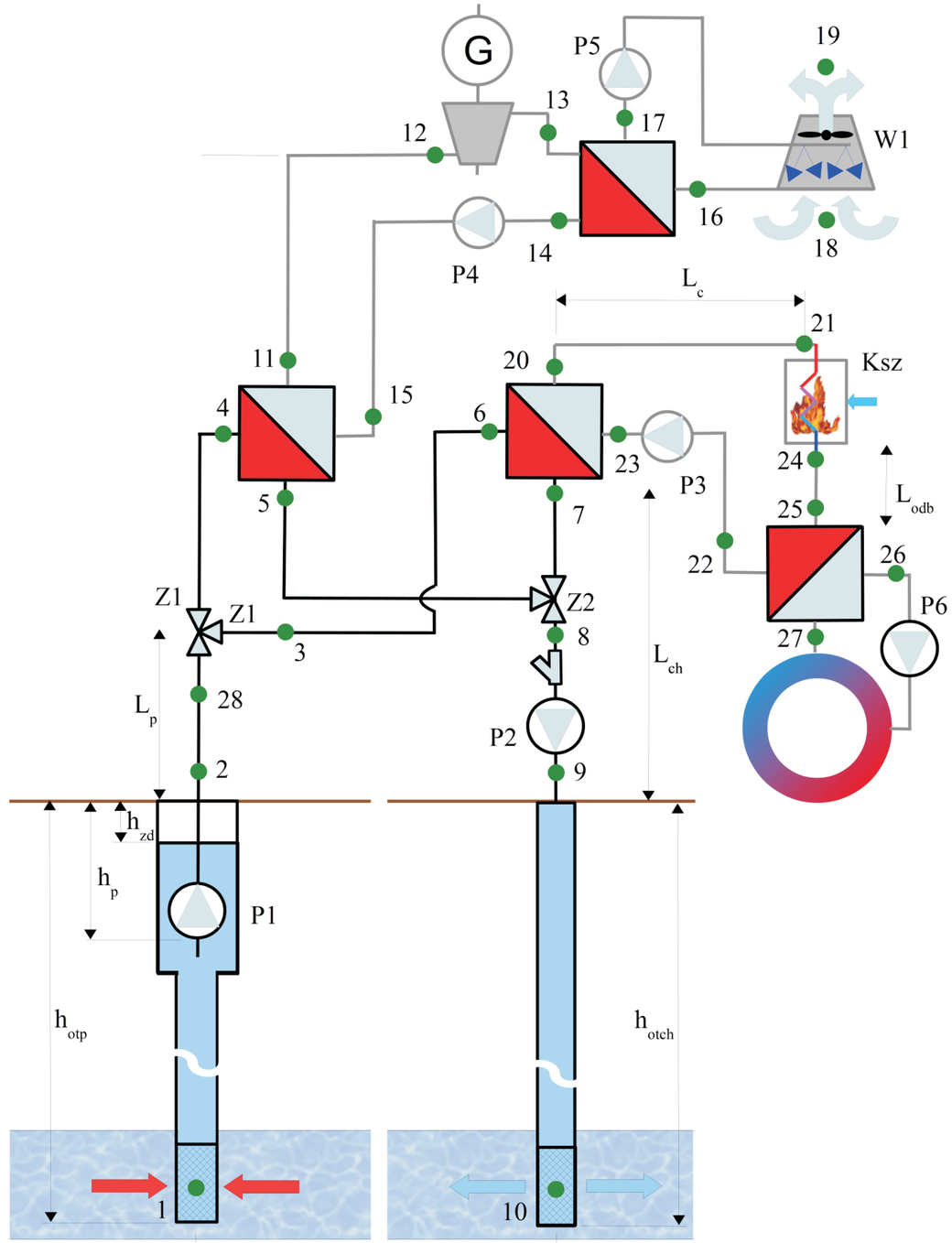
Poza oceną wskaźników energetycznych, przedstawioną w rozdziałach 7.X.4 (gdzie X to nr podrozdziału odpowiadający kolejnej strefie), opracowaną dla miejscowości: Koło, Łowicz, Konin i Stargard Szczeciński, w rozdziałach 7.X.6 przedstawiono wyniki kompleksowej prognozy efektów finansowych, energetycznych, ekologicznych i społecznych. Prognozowania efektów adaptacji technologii binarnych w wytypowanych strefach dokonano przy wykorzystaniu modelu matematycznego, określającego warunki i efekty pracy instalacji. Model instalacji został wykonany na potrzeby niniejszych obliczeń i uwzględniał parametry: złożowe, klimatyczne oraz lokalną infrastrukturę energetyczną. Infrastruktura energetyczna dotyczyła głównie charakterystyki odbiorcy energii cieplnej oraz systemu jej dystrybucji. Założono, że dystrybucja energii prowadzona będzie przy wykorzystaniu istniejących rurociągów ciepłowniczych wszędzie tam, gdzie takowe istnieją.

Schemat technologiczny powierzchniowej instalacji źródła energii zaprezentowano na rysunku 6.3.1. Analizowany schemat technologiczny przewiduje równoczesne wytwarzanie energii elektrycznej i cieplnej. Na schemacie technologicznym instalacji powierzchniowej oznaczono i ponumerowano kolejnymi liczbami ważniejsze punkty charakterystyczne instalacji. W punktach tych (od 1 do 28) wyznaczano lub zadawano najważniejsze parametry: rodzaj medium, jego temperaturę ciśnienie

Objaśnienia do rysunku 6.3.1:

h_{opt} – głębokość otworu produkcyjnego, h_p – głębokość ulokowania pompy głębinowej, h_{zd} – poziom zwierciadła dynamicznego, h_{otch} – głębokość otworu chłonnego, H – odległość między filtrami otworów dubletu geotermalnego, L_p – długość rurociągu łączącego otwór produkcyjny z elektrociepłownią geotermalną, L_{ch} – długość rurociągu łączącego otwór chłonny z elektrociepłownią geotermalną, L_{odb} – długość rurociągu łączącego odbiorców energii ze szczytowym źródłem energii cieplnej, L_c – odległość elektrociepłowni geotermalnej od szczytowego źródła energii cieplnej, P1 – głębinowa pompa geotermalna, P2 – pompa zatłaczająca ochłodzone wody geotermalne do złoża, P3 – pompa dystrybucyjnego obiegu ciepłowniczego, P4 – pompa czynnika roboczego siłowni binarnej, P5 – pompa czynnika chłodzącego obieg binarny, P6 – pompy instalacji grzewczych u odbiorców energii, G – generator energii elektrycznej, W1 – chłodnie obiegu binarnego, Ksz – szczytowe źródło energii, Z1 – system zaworów rozdzielających strumień wody geotermalnej na obieg siłowni binarnej i ciepłowni, Z2 – system zaworów łączących strumienie wody geotermalnej po jej wykorzystaniu

h_{opt} – depth of a production well, h_p – depth of location submersible pump, h_{zd} – dynamic water level, h_{otch} – depth of an injection well, H – the distance between liners of wells in the geothermal doublet, L_p – length of the pipeline linking the production well and geothermal power plant, L_{ch} – length of the pipeline linking the injection well and geothermal power plant, L_{odb} – length of the pipeline linking the peak energy source with thermal energy users, L_c – length of the pipeline linking the peak energy source and geothermal power plant, P1 – submarsible geothermal pump, P2 – pump for reinjection of cooled geothermal water, P3 – pump of energy distribution system, P4 – pump of binary system working fluid, P5 – pump of cooling fluid circulation, P6 – pumps of water at energy users installations, G – generator of electricity, W1 – cooling units of binary cycle, Ksz – peak energy unit, Z1 – valves system separating the stream of geothermal water between binary cycle and heating station, Z2 – valves system collecting streams of geothermal water incoming from binary cycle and heating station



Rys. 6.3.1. Schemat technologiczny powierzchniowej instalacji wykorzystującej energię geotermalną do produkcji energii elektrycznej i cieplnej

Fig. 6.3.1. Technological diagram of a surface installation using geothermal energy to produce electricity and heat

i przepływ. Wszystkie powyższe parametry ulegały zmianom w czasie, zależnie od parametrów ujęcia geotermalnego i potrzeb odbiorcy (zależnych od aktualnych warunków klimatycznych). Potrzeby odbiorcy ustalano poprzez określenie jego charakterystyki cieplnej. Charakterystyka odbiorcy składała się z określenia zmian w czasie wymaganej temperatury zasilania, wymaganego strumienia czynnika grzewczego i osiąganej temperatury powrotu.

Założono, że wytwarzana energia elektryczna będzie w pierwszej kolejności wykorzystywana do napędu pomp instalacji geotermalnej oraz pomp obiegowych systemu dystrybucji energii. Pompy te oznaczono na schemacie z rysunku 6.3.1 kolejnymi symbolami: P1 (pompy geotermalne eksploatacyjne), P2 (pompy w strefie zatłaczania ochłodzonych wód termalnych do złoża), P3 (pompy obiegowe systemu dystrybucji energii) i P4 oraz P5 (pompy przetłaczające ciecz roboczą obiegu siłowni binarnej i ciecz chłodzącą). Pompy przetłaczające wodę w instalacji odbiorcy (lub odbiorców) nie były brane pod uwagę; zakłada się, że odbiorca ponosi koszty ich funkcjonowania. Nadmiar energii elektrycznej będzie odprowadzany do sieci elektroenergetycznej w nieograniczonej ilości, zależnej od możliwości produkcyjnych siłowni binarnej.

Priorytetem pracy instalacji powierzchniowej jest wytwarzanie i sprzedaż energii cieplnej jeżeli tylko istnieje na nią zapotrzebowanie – energia elektryczna jest wytwarzana wtedy, gdy istnieje nadmiar mocy cieplnej ujęcia geotermalnego. Takie założenie wiąże się z prognozowaną niską sprawnością konwersji energii geotermalnej w energię elektryczną. Przewiduje się, że nie przekroczy ona rzędu kilku do maksymalnie kilkunastu procent energii cieplnej ujęcia geotermalnego netto (uwzględniając własną konsumpcję energii elektrycznej). Sprawność cyklu Celsiusa-Rankine CR z zastosowaniem regeneracji można opisać następująco (na podstawie danych pochodzących z Vankeirsbilck i in. 2011):

$$\eta_{CR} = \frac{-0{,}0003 t_e^2 + 0{,}2069 t_e - 7{,}2}{100} \tag{6.3.1}$$

gdzie: t_e – temperatura czynnika roboczego przed turbiną w °C, przy założeniu temperatury skraplania 40°C.

Sprawność konwersji energii cieplnej w energię elektryczną – obok sprawności obiegu opisanej równaniem (6.3.1.) – musi ujmować również sprawność wewnętrzną turbozespołu η_{tz}, sprawność mechaniczną turbiny η_{mt} i sprawność generatora elektrycznego η_{ge}. Iloczyn wszystkich powyższych sprawności daje wypadkową sprawność konwersji energii cieplnej w energię elektryczną dla siłowni binarnej:

$$\eta_{c-e} = \eta_{CR}\eta_{tz}\eta_{mt}\eta_{ge} \approx 0{,}67\eta_{CR} \tag{6.3.2}$$

Przyjmując charakterystyczne wartości powyższych sprawności za literaturą (Szargut 1991 za Kaczmarek 2011) $\eta_{tz} \approx \sim 0{,}75$; $\eta_{mt} = 0{,}97$ i $\eta_{ge} = 0{,}96$, oszacować można sprawność konwersji energii cieplnej ujęcia geotermalnego w energię elektryczną.

Energię cieplną można dostarczać ze znacznie wyższą sprawnością – najczęściej rzędu 85–92% (po uwzględnieniu strat na przesyle). Średnie straty przesyłowe w Polsce wynosiły w 2010 roku 12,7% (wg *Danych URE za PWC 2012*). Rekompensuje to niższą potencjalną cenę sprzedaży energii cieplnej c_{cpl}. Warunkiem opłacalności sprzedaży energii elektrycznej, nawet wówczas gdy istnieje zapotrzebowanie na energię cieplną, jest osiągnięcie stosunku ceny sprzedaży energii elektrycznej c_{el} do ceny sprzedaży energii cieplnej z wyłączeniem kosztów dystrybucji c_{cpl} na poziomie (zakładając η_{C-R} = 0,06–0,09 dla t_e = 90–120°C i sprawność dostawy energii cieplnej η_{cpl} = 0,85–0,95):

$$E_{geo} c_{el} \eta_{c-e} \geq E_{geo} c_{cpl} \eta_{cpl} \Rightarrow \frac{c_{el}}{c_{cpl}} \geq \frac{\eta_{cpl}}{\eta_{c-e}} \Rightarrow \frac{c_{el}}{c_{cpl}} \geq \frac{0{,}95 - 0{,}85}{0{,}06 - 0{,}09} \Rightarrow \frac{c_{el}}{c_{cpl}} \geq 9{,}4 - 15{,}8 \tag{6.3.3}$$

gdzie: E_{geo} – pozyskana energia ujęcia geotermalnego – ilość energii, która może zostać wykorzystana dla zaspokojenia potrzeb cieplnych odbiorcy lub dla wytworzenia energii elektrycznej w systemie binarnym.

W rzeczywistości nie osiąga się tak dużej dysproporcji między ceną sprzedaży energii cieplnej i elektrycznej – realnie stosunek ceny sprzedaży energii elektrycznej do ceny sprzedaży energii cieplnej wynosić może niewiele ponad 1,7 – zakładając, że paliwem jest węgiel kamienny (c_{el} = 201 zł/MWh = 55,8 zł/GJ – na podstawie danych Prezes URE 2013; c_{cpl} = 32 zł/GJ – na podstawie Pająk, Bujakowski 2013a). Zakładając, że paliwem referencyjnym jest gaz ziemny wartość tego wskaźnika wynosi około 1. Mając to na uwadze korzystniej – z ekonomicznego punktu widzenia – sprzedawać energię cieplną jeżeli jest tylko na nią zapotrzebowanie. Uzyskanie znacząco wyższej ceny sprzedaży energii elektrycznej – co jest możliwe biorąc pod uwagę, że będzie to energia ze źródła odnawialnego (certyfikaty za wytwarzanie energii „zielonej") – może zmienić warunki opłacalności wytwarzania i sprzedaży energii opisane zależnością (6.3.3). Mało realne jest jednak przekroczenie wyznaczonej bariery stosunku ceny sprzedaży energii elektrycznej do ceny sprzedaży energii cieplnej.

Schemat działania instalacji powierzchniowej, który przedstawiono na rysunku 6.3.1. jest następujący: woda termalna jest udostępniona ujęciem geotermalnym, które schematycznie oznaczono na rysunku jako dublet geotermalny, składający się z otworu produkcyjnego i chłonnego. W otworze produkcyjnym znajduje się komora pompowa, w której zatopiona jest pompa geotermalna (P1). Pompa powinna być zatopiona w otworze na głębokości h_p, tak by poziom zwierciadła dynamicznego h_{zd} zapewniał osiągnięcie odpowiedniego ciśnienia napływu, przeciwdziałając zjawisku kawitacji. Woda termalna wydobyta na powierzchnię kierowana jest do zaworu trójdrogowego (Z1), gdzie jej strumień może zostać podzielony na dwie części: część kierowaną dla zaspokojenia potrzeb ciepłowniczych oraz część kierowaną do siłowni binarnej. Rozdział strumienia wody termalnej na zaworze trójdrogowym (Z1) zawsze prowadzony jest przy zachowaniu priorytetu zaspokojenia potrzeb ciepłowniczych (uzasadnienie takiego sposobu sterowania pracą instalacji znajduje się powyżej).

Woda termalna kierowana do części związanej z zaspokojeniem potrzeb ciepłowniczych płynie do stacji wymienników ciepła, gdzie oddaje energię cieplną wodzie obiegowej obiegu ciepłowniczego. W obiegu ciepłowniczym wymienia ona ciepło z wodą z tzw. „powrotu" – czyli najchłodniejszą. Ma to duże znaczenie ponieważ pozwala odebrać maksymalną ilość energii od wody termalnej. Wstępnie podgrzana woda sieciowa kierowana jest do sieci ciepłowniczej, gdzie na węzłach indywidualnych odbiorców odbywa się stosowna regulacja mocą chwilową dostarczoną. Jeżeli temperatura wody sieciowej po podgrzaniu wodą termalną nie jest wystarczająco wysoka, w odniesieniu do potrzeb

odbiorcy, to przewidywane jest jej dogrzanie do wymaganej temperatury przez szczytowe źródło energii (Ksz).

Jeżeli chwilowy strumień energii niesiony przez wodę termalną przewyższa zapotrzebowanie na moc odbiorcy, to nadwyżka strumienia wody termalnej kierowana jest do siłowni binarnej – części instalacji, w której odbywa się zamiana energii cieplnej w energię elektryczną. Sprawność tego procesu jest określana na podstawie obliczeń zamieszczonych w rozdziale 7.X.4, dla wariantu przy którym osiągana moc elektryczna siłowni binarnej przyjmuje maksymalne wartości dla danej lokalizacji wartości.

Po ochłodzeniu do określonej temperatury (zmiennej w czasie, zależnej od potrzeb) woda termalna z obiegu ciepłowniczego i binarnego łączy się na zaworze (Z2). Następnie kierowana jest do sekcji filtrów i jej ciśnienie jest podnoszone tak, by pokonać ciśnienie represji i wtłoczyć wodę do górotworu. Pokonanie ciśnienia represji odbywa się dzięki pracy pompy (P2).

Przepływ płynów rurociągami ciepłowniczymi pomiędzy: głowicą otworów a instalacją, ciepłownią geotermalną i ciepłownią szczytową oraz pomiędzy ciepłownią szczytową a odbiorcami energii związany jest z nieuchronną stratą energii cieplnej. Ilości energii traconej na tej drodze oszacowane są przy wykorzystaniu metodyki opisanej w (Pająk, Barbacki 2013). Opory przepływu dla płynów określono przy wykorzystaniu metodyki opisanej w tej samej publikacji, zakładając że opory miejscowe stanowią 10% liniowych oporów przepływu. Obliczenia uwzględniają zmiany gęstości i lepkości wody w funkcji ciśnienia i temperatury. Określenie niezbędnych dla potrzeb obliczeń parametrów opisujących warunki atmosferyczne odbywa się przy wykorzystaniu typowych lat meteorologicznych zalecanych dla obliczeń energetycznych budynków przez Ministerstwo Infrastruktury i Rozwoju, a zamieszczonych na stronie internetowej Ministerstwa (Ministerstwo Infrastruktury i Rozwoju, 2014). Założono, że wszystkie rurociągi ułożone są bezpośrednio w ziemi jako rurociągi preizolowane. Współczynnik przewodzenia ciepła przez rurę przewodową określono na 50 W/(m K) – co odpowiada stali, współczynnik izolacji termicznej określono na 0,03 W/(m K) – co odpowiada materiałom termoizolacyjnym wykorzystywanym przy produkcji rur preizolowanych, a współczynnik przewodzenia ciepła rury osłonowej ustalono na 3 W/(m K) – co odpowiada materiałom wykorzystywanym do produkcji rur osłonowych rurociągów preizolowanych. Współczynnik przewodzenia ciepła dla gruntu ustalono na podstawie (Plewa 1994), przyjęto wartość 1,8 W/(m K) – co mniej więcej odpowiada: wilgotnym piaskom, glinie piaszczystej, wilgotnej glinie.

Średnice rurociągów (rura przewodowa, średnica wewnętrzna) dobrano tak, by prędkość przepływu wody osiągała maksymalnie określaną w danych obliczeniowych wartość (zadawaną przez użytkownika). Założono, że średnica izolacji jest o 20% większa od średnicy rury przewodowej. Prędkość przepływu wody w rurociągach ma wpływ na opory przepływu i spadek temperatury medium przetłaczanego rurociągami.

Straty temperatury wody termalnej na wypływie od strefy złoża do głowicy otworu produkcyjnego określono wykorzystując opisaną metodykę (Barbacki i in. 2009). Temperatura głowicowa wody termalnej używana do obliczeń energetycznych określona została po roku ciągłej eksploatacji otworu przy parametrach nominalnych.

Efekty ekologiczne eksploatacji instalacji określono wykorzystując wskaźniki unosu zanieczyszczeń określone w (Pająk 2007) odniesione do 1 GJ energii finalnej (cieplnej lub elektrycznej) – wskaźniki te zestawiono w tabeli 6.3.1.

Założono, że instalacją porównawczą będzie ciepłownia o mocy produkcji energii cieplnej identycznej do instalacji geotermalnej, ale wykorzystująca jako paliwo referencyjne węgiel kamienny.

Tabela 6.3.1. Wskaźniki emisji głównych składników zanieczyszczających atmosferę powstających w trakcie wytwarzania energii cieplnej z wybranych nośników [kg/GJ] (Pająk 2007)

Table 6.3.1. Emissions of primary air pollutants generated during the production of thermal energy from selected energy carriers [kg/GJ] (Pająk 2007)

Polutant	Słoma żółta*	Słoma szara*	Drewno*	Węgiel kamienny[1]	Olej opałowy lekki[2]	Gaz ziemny sieciowy[3]	Sieciowa energia elektryczna[4]
B(a)P	b.d.	b.d.	b.d.	0,001	$5{,}340 \cdot 10^{-8}$	0,000	$5{,}288 \cdot 10^{-5}$
Sadza	b.d.	b.d	b.d.	0,514	0,000	0,000	0,005
Pył	0,148	0,147	0,143	2,057	0,053	0,000	0,106
CO_2[5]	128,079	119,816[6]	123,81	105,714	48,954	60,475	290,851
CO	2,463	0,249	0,295	5,714	0,018	0,011	0,661
NO_2[7]	0,591	0,599	0,524	0,057	0,148	0,039	0,529
SO_2	0,128	0,129	0,095	0,731	0,113	0,000	1,798
WWAlif.[8]	0,128	0,120	0,142	0,286	0,007	0,003	0,033
WWArom.				0,286	0,003	0,001	0,033

* Dla biomasy założono sprawność konwersji energii chemicznej w energię cieplną użytecznie wykorzystaną 70%. Wskaźniki emisji [kg/Mg] zaczerpnięto z (Jelinek 1996).

[1] Wskaźniki emisji dla palenisk o niewielkiej mocy (do 200 kW) z ciągiem naturalnym, wartość opałowa węgla 25 GJ/Mg, zawartość popiołu 18%, zawartość siarki 0,8%, sprawność procesu spalania 70%. Wskaźniki emisji [kg/Mg] na podstawie materiałów informacyjno-szkoleniowych MOŚZNiL, 1996.

[2] Olej lekki EKOTERM Plus (42,6 MJ/kg, 0,86 kg/dm^3), sprawność procesu spalania 92%. Wskaźniki emisji [kg/Mg] na podstawie materiałów informacyjno-szkoleniowych MOŚZNiL, 1996.

[3] Gaz ziemny GZ50, sprawność procesu spalania 92%. Wskaźniki emisji [kg/m3] na podstawie materiałów informacyjno-szkoleniowych MOŚZNiL, 1996.

[4] Emisja zanieczyszczeń określona przy założeniu produkcji energii elektrycznej z węgla kamiennego (24,4 GJ/Mg, zaw. popiołu 20%, siarka 0,8%, sprawność konwersji energii chemicznej zawartej w paliwie w energię elektryczną, uwzględniając straty przesyłowe 31%, sprawność procesu odpylania 99%. Wskaźniki emisji [kg/Mg] na podstawie materiałów informacyjno-szkoleniowych MOŚZNiL, 1996 – dla kotłów z rusztem mechanicznym o mocach powyżej 12 MW (wydajność pary powyżej 20 Mg/h).

[5] W przypadku spalania biomasy powszechnie przyjmuje się, że bilans emisji CO_2 jest zerowy – tzn. że biomasa w trakcie swojego wzrostu pochłania dokładnie taką samą ilość CO_2 jaka została wyemitowana. W celach informacyjnych podano jednak wartości wskaźników emisji CO_2 dla nośników biomasy.

[6] Brak danych literaturowych; przyjęto wskaźnik emisji CO_2 [kg/Mg] jak dla słomy żółtej z tabeli 3. Założenie to przyjęto po analizie składu chemicznego obu rodzajów słomy (Grzybek i in. 2001) – zawierają one bardzo podobne ilości pierwiastka węgla, słoma szara charakteryzuje się nieco wyższą zawartością części lotnych.

[7] Tlenki azotu (NOx) przeliczone na dwutlenek azotu (NO_2).

[8] W przypadku nośników biomasy emisję węglowowodorów podano sumarycznie.

Efekt ekologiczny związany z wytwarzaniem energii elektrycznej będzie określony jako efekt równoważny dla ilości energii wytworzonej przez siłownię binarną, przy uwzględnieniu wskaźników emisji zanieczyszczeń zestawionych w tabeli 6.3.1.

Efekty ekonomiczne pracy instalacji określane są na podstawie parametrów technicznych, głównie: produkcji energii cieplnej i możliwej produkcji energii elektrycznej. Założono, że cena sprzedaży energii elektrycznej jest ceną rynkową i nie uwzględnia certyfikatów za wytwarzanie energii ze źródeł

odnawialnych – założono, że instalacja powinna gwarantować finansową autonomię niezależnie od politycznych uwarunkowań. Cenę zbytu energii elektrycznej ustalono na 0,24 zł/kWh netto. Jest ona o około 19% wyższa od średniej ceny sprzedaży energii elektrycznej na ryku konkurencyjnym, obowiązującej w 2012 roku. Średnia cena sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym według danych Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki (*Prezes Urzędu Regulacji Energetyki 2012*) w roku 2011 wynosiła 198,90 zł/MWh, w roku 2012 wzrosła do 201,36 zł/MWh (*Prezes URE 2013*). Cenę zakupu sieciowego gazu ziemnego, który był paliwem dla instalacji szczytowej, ustalono uwzględniając wszystkie składniki na nią wpływające (cenę paliwa, cenę dystrybucji i akcyzy) – wynosiła ona 1,626 zł/m^3 netto.

Cenę energii cieplnej każdorazowo określano tak, by powodowała ona zamknięcie bilansu finansowego, gwarantując rentowność proponowanych rozwiązań. Określona w modelu cena energii cieplnej jest ceną uwzględniającą: straty energii na przesyle, główne składniki kosztów stałych oraz zakup konwencjonalnych nośników energii. Jest to zatem końcowa cena zakupu energii cieplnej dla odbiorcy, uwzględniająca wszystkie (brane pod uwagę w modelu) składniki kosztotwórcze. Może się zatem zdarzyć, że dla rozwiązań o wątpliwej opłacalności otrzymana cena sprzedaży energii cieplnej będzie znacząco wyższa od ceny rynkowej. Wartości referencyjne ciepła sieciowego mogą zostać określone na podstawie dostępnych danych literaturowych (np. Pająk, Bujakowski 2013a). Z pracy Pająka i Bujakowskiego (2013a) wynika, że cena energii cieplnej sieciowej zawiera się w przedziale od 42 do 116 zł/GJ netto (rys. 6.3.2). Przy czym wartości niższe są charakterystyczne dla instalacji wykorzystujących jako paliwo węgiel, a wartości maksymalne dla instalacji bazujących na oleju opałowym. Cena energii cieplnej finalnej charakterystyczna dla sieciowego gazu ziemnego zawiera się mniej więcej w przedziale od 75 do 85 zł/GJ netto (Pająk, Bujakowski 2013a).

Wymagany poziom nakładów inwestycyjnych związany z implementacją rozwiązania określany jest przy uwzględnieniu głównych komponentów systemu z rysunku 6.3.1; są to:

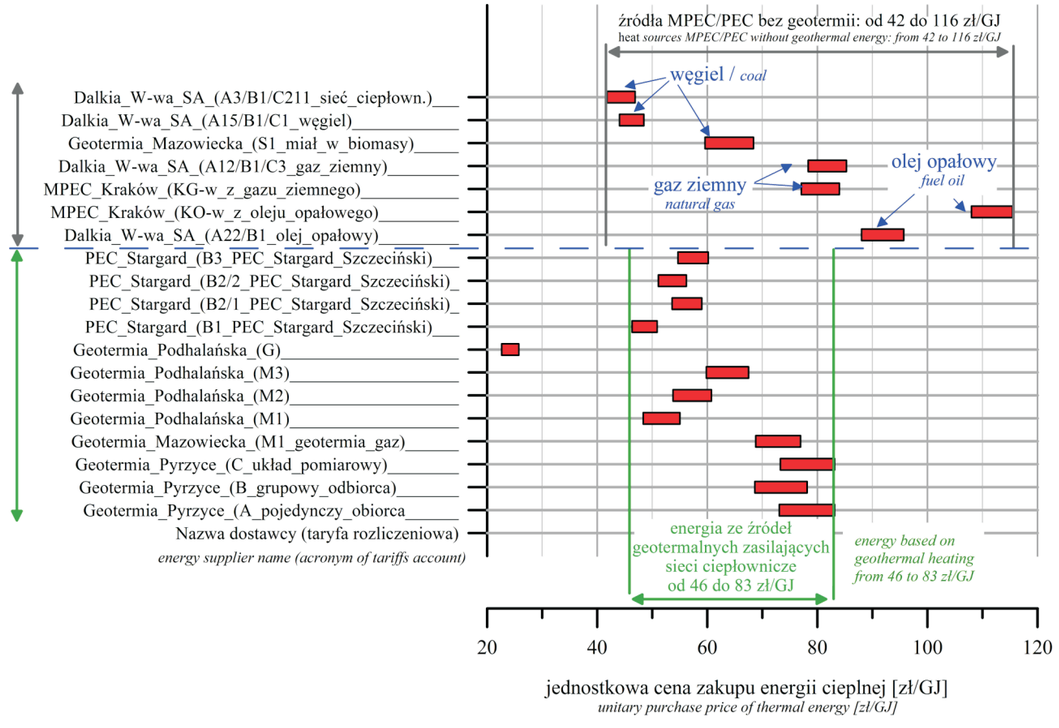
- otwory produkcyjny i chłonny (na podstawie Barbacki i in., 2013) – rysunek 6.3.3, przewidujący potencjalną możliwość rekonstrukcji lub adaptacji otworów,
- siłownia binarna według zależności 6.3.4 i 6.3.5 (na podstawie Pająk, Bujakowski 2013b), zależnie od temperatury wody na wejściu do siłowni binarnej tx:
  - dla technologii ORC w zakresie temperatur: $100 \le t_x \le 150°C$

$$N_{ORC}\left[\frac{\text{zł}}{\text{kW}_{el}}\right] = 9000\frac{\text{zł}}{\text{kW}_{el}} - 64\frac{\frac{\text{zł}}{\text{kW}_{el}}}{°\text{C}}(t_x[°\text{C}] - 100°\text{C}) \quad (6.3.4)$$

  - dla technologii Kaliny w zakresie temperatur: $100 \le t_x \le 150°C$

$$N_{Kalina}\left[\frac{\text{zł}}{\text{kW}_{el}}\right] = 7000\frac{\text{zł}}{\text{kW}_{el}} - 48\frac{\frac{\text{zł}}{\text{kW}_{el}}}{°\text{C}}(t_x[°\text{C}] - 100°\text{C}) \quad (6.3.5)$$

gdzie N_{ORC} ,N_{Kalina} – nakłady na instalację siłowni pracującej w obiegu ORC lub Kaliny,



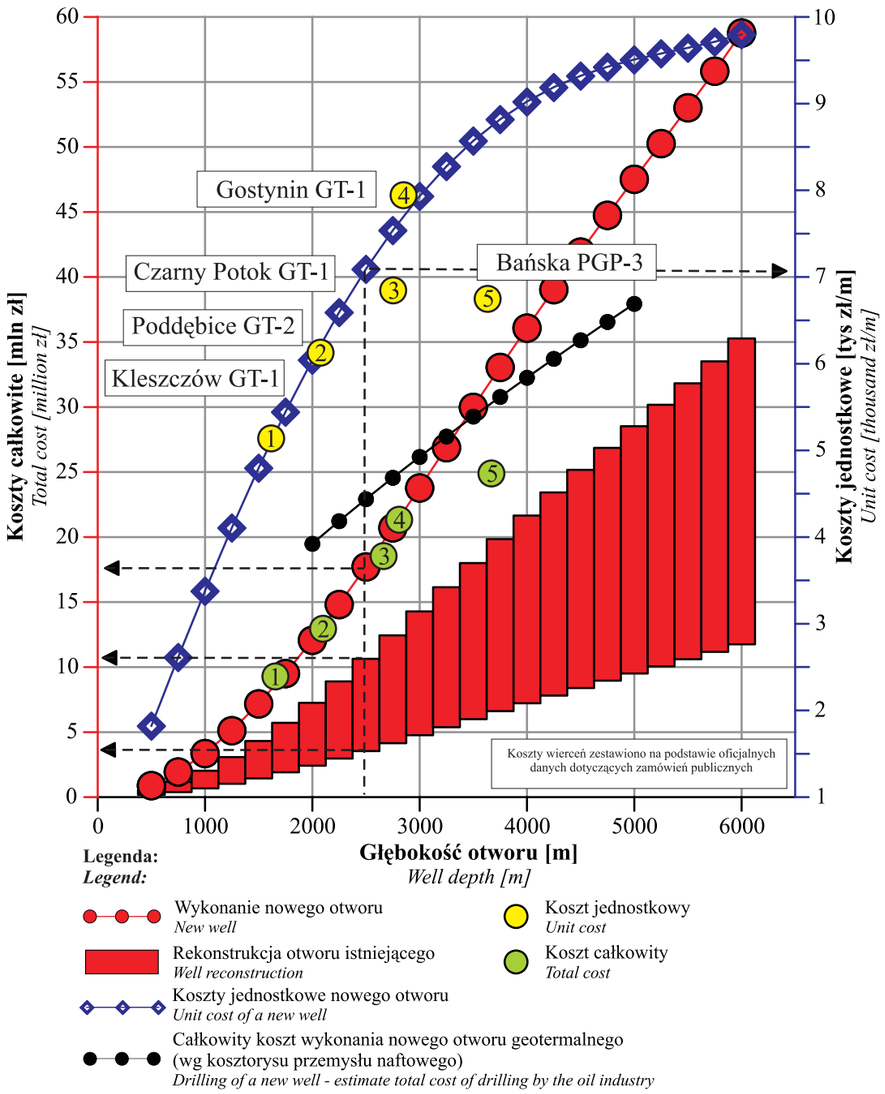
Rys. 6.3.2. Cena netto zakupu energii cieplnej dla końcowego odbiorcy (zawiera koszty pozyskania energii i koszty jej dystrybucji), stan z czerwca 2013 roku (Pająk, Bujakowski 2013a)

Fig. 6.3.2. Net thermal energy purchase price for the end user (including energy generation and distribution costs) as at June 2013 (Pająk, Bujakowski 2013a)

- szczytowe źródło energii (kotły gazowe wraz z palnikami i systemem kominowym), uwzględniając wykorzystanie źródła już istniejącego,
- pompy geotermalne, tj. pompa wgłębna w otworze produkcyjnym i pompa instalacji chłonnej,
- pompy obiegowe systemu ciepłowniczego,
- rurociągi preizolowane, uwzględniając wykorzystanie istniejących rurociągów,
- wymienniki ciepła, uwzględniając możliwość wykorzystania istniejących,
- adaptacja istniejącej ciepłowni lub budowa nowego obiektu,
- armatura, aparatura kontrolno-pomiarowa.

Na podstawie przewidywanych nakładów inwestycyjnych określane są roczne odpisy amortyzacyjne wliczane do kosztów eksploatacji instalacji. Założono uproszczony sposób określania wysokości odpisów amortyzacyjnych, przy uwzględnieniu dwóch stawek amortyzacyjnych: 4,55%/rok dla otworów, rurociągów i budynku oraz 6,67%/rok dla pozostałych elementów instalacji. Poziom nakładów inwestycyjnych generował również koszty związane z przewidywanymi kosztami obsługi, konserwacji i remontów; ustalono je w sposób przybliżony jako 1%/rok prognozowanych nakładów inwestycyjnych.

Efekty społeczne wykorzystania wód termalnych wiążą się z powstaniem nowych miejsc pracy w rejonie uruchomienia inwestycji. Uwzględniając dotychczasowe doświadczenia funkcjonowania



Rys. 6.3.3. Prognozowane nakłady inwestycyjne związane z wykonaniem nowego lub rekonstrukcją istniejącego otworu (Barbacki i in. 2013)

Fig. 6.3.3. Projected capital expenditure associated with the drilling of a new well or the reconstruction of an existing one (Barbacki et al. 2013)

zakładów geotermalnych, liczba pracowników wymaganych do obsługi instalacji może być ustalana na zasadzie 1 pracownik na 1 MW mocy zainstalowanej. Kryterium tym kierowano się ustalając przewidywane efekty społeczne realizacji wytypowanych przedsięwzięć. Przy czym pamiętać należy o tym, że woda termalna to nie tylko źródło energii – a głównie tę problematykę omawiano dotychczas. Wody termalne są również źródłem mikro- i makroelementów wykorzystywanych w balneo-rekreacji i lecznictwie; co ważne – źródłem naturalnym. Dotychczasowe doświadczenia praktyczne, z miejsc gdzie uruchomiono instalacje geotermalne wykorzystujące te wody w celach balneo-rekreacyjnych, świadczą o dużym zainteresowaniu klientów tego typu usługami. Takie przedsięwzięcia stymulują lokalny rynek usług i znacząco wpływają na wzrost atrakcyjności turystycznej. Zyskuje na tym branża gastronomiczna, hotelarska, rozwija się rynek różnorodnych usług.

Summary – Research methodology for assessment of the prospect areas

In order to evaluate the potential of the selected prospect areas, the following tasks were carried out:

Numerical modelling of the exploitation of the geothermal reservoir. For each of the areas indicated in Chapter 7, a conceptual geological model was first created presenting the location and situation profiles of potential hydro-geothermal reservoirs as well as the geological structures situated above and below them. Based on detailed analysis of the publications and archive material available (mainly documentation relating to deep drilling, see chapter 5.2), as well as the mineralogical, petrographic (see chapter 5.3) and petrophysical (see chapter 5.4) evaluation of the rock strata conducted as part of the current study, accompanied by the re-interpretation of the archive seismic data (see chapter 5.5), perspective maps of the top of geological structure roof were created as well as geological cross-sections involving evaluation of the thickness of the rock structures. The hydrogeothermal parameters and lithostratigraphic data identified constituted the basis on which to develop the spatial numerical models. For the numerical modelling of the thermal characteristics of the rock mass, as well as the reservoir exploitation in a long-term, 50 year perspective, PetraSim software for the TOUGH2 code was used. The basic spatial dimensions of most areas to be modelled were assumed to be approximately 10 km × 10 km, considering local conditions in the horizontal plane and 1–5 km in the vertical direction. Such a size enabled exploitation of reservoir by means of the borehole doublet method to be simulated, with model boundaries shifted sufficiently apart to avoid the utilisation result becoming distorted by the geometry or influence of the model boundary conditions. However, the spatial dimensions of the model were most of all dictated by specific geological, tectonic or hydrogeological boundaries, allowing for correct assumptions of the boundary conditions, yet at the same time constraining the size of the test case (number of calculation elements) as much as possible.

Assessment of the impact of changes in the exploitation parameters on the results obtained for the operation of the binary installation. The following tasks were carried out:

- *an assessment was carried out of the operational parameters of a geothermal power plant,*
- *an algorithm was presented for evaluation of the operational parameters of a generator driven by a dry medium without overheating the operational medium,*
- *an algorithm was presented for evaluation of the operational parameters of a generator driven by a wet medium involving the superheated vapour of the operational medium,*

- assumptions were presented for impact assessment of changes in the parameters of the thermal water and the operational parameters of the installation on the operational performance of the binary system,
- details were prepared of the technological system assumed for the calculations,
- basic assumptions for evaluation of the energy indices were presented.

The detailed analyses of the geothermal power plants suggested for the prospect areas (see Chapter 7) were carried out for relevant thermal water temperatures at the installation inlet T_{g1} and outlet T_{g2}. Three different variants were considered:

- ***Variant A*** – refers to maximisation of the plant power resulting from minimisation of the temperature $T_{g2} = T_{g2}^{A}$.
- ***Variant B*** – refers to the case when the temperature of the thermal water leaving the installation equals $T_{g2} = T_{g2}^{B} = 60^{\circ}\mathrm{C}$.
- ***Variant C*** – refers to the case when the temperature of the thermal water leaving the installation equals $T_{g2} = T_{g2}^{C} = 47^{\circ}\mathrm{C}$.

The evaluation of the energy indices according to the above assumptions was carried out exclusively for areas/towns where definite data concerning the heat generated had been available based on previously conducted polling. Therefore, considering the data related to the total annual heat production, the indices presented in Chapters 7.X.2 (X – for specific areas, respectively) were listed for the locations detailed in Table 6.2.7.1.

Assessment of the impact of changes in the operational parameters and economic effects. The required level of investment related to the implementation of the solution being considered was evaluated, considering the main system components from Figure 6.3.1; these are:

- injection and production wells (based on Barbacki et al. 2013) – Figure 6.3.3, considering the potential possibility of reconstruction or adaptation of the wells,
- binary power plant, according to 6.3.4 and 6.3.5 (based on Pająk, Bujakowski 2013b), depending on the water temperature tx at the inlet to the binary generator,
- peak energy source (gas boilers with burners and chimneys), considering the use of previously existing source,
- geothermal pumps, i.e. a well pump in the production well and the injection installation pump,
- circulation pumps in the heating system,
- pre-insulated pipelines, considering use of the existing pipelines,
- heat exchangers, considering use of those already existing,
- adaptation of the existing heat production station or construction of a new site,
- fittings, monitoring and control equipment.

7. STREFY PERSPEKTYWICZNE DLA SKOJARZONEJ PRODUKCJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ I CIEPLNEJ PRZY ZASTOSOWANIU UKŁADÓW BINARNYCH W POLSCE

(Wiesław Bujakowski, Leszek Pająk, Antoni Barbacki, Robert Skrzypczak, Maciej Miecznik, Barbara Tomaszewska, Aleksandra Borsukiewicz-Gozdur, Władysław Nowak, Tomasz Operacz, Piotr Freiwald, Tomasz Kujawa, Aleksander A. Stachel)

7.1. Wprowadzenie

Na terenie Polski, za obszary perspektywiczne dla zastosowania systemów binarnych uznane zostały struktury Niżu Polskiego (jura dolna i lokalnie trias dolny), Karpat Wewnętrznych (niecka podhalańska) i Sudetów (pluton karkonoski) (Rozdział 4). Kluczowymi kryteriami, którymi kierowano się dokonując wskazania stref perspektywicznych dla skojarzonej produkcji energii elektrycznej i cieplnej przy zastosowaniu układów binarnych w Polsce, były: 1) charakterystyka hydrogeotermalna badanych struktur geologicznych, 2) stopień rozpoznania geologicznego z dostępnością i jakością informacji geologicznej, 3) obecność potencjalnych odbiorców energii (rejony większych miast) oraz 4) lokalizacja starych otworów wiertniczych/poszukiwawczych możliwych do rekonstrukcji.

Na Niżu Polskim wytypowano 8 stref, z których 7 obejmuje zbiornik jury dolnej uznany jako perspektywiczne złoże wód termalnych i 1 – zbiornik triasu dolnego. Do grupy 7 stref ukierunkowanych na wykorzystanie zbiornika jury dolnej zaliczono strefy położone na obszarze: a) niecki mogileńsko-łódzkiej, w rejonie miejscowości Koło, Turek, Ślesin, Żnin i Konin oraz b) niecki szczecińskiej, w rejonie Stargardu Szczecińskiego i Chociwla.

W odniesieniu do zbiornika triasowego, za strefę perspektywiczną uznano rejon miasta Łowicza, położonego w niecce warszawskiej. O potencjalnych możliwościach pozyskania wód i energii geotermalnej z triasowych utworów pstrego piaskowca świadczą wyniki opróbowania otworu Kompina 2 oraz wykonane w latach 2006 i 2007 zaawansowane badania sejsmiczne i magnetotelluryczne (por rozdz. 5.5), które wykazały występowanie w analizowanym rejonie systemu szczelin i uskoków drożnych dla przepływu wód o temperaturze powyżej 100°C. O potencjale hydrogeotermalnym tej strefy świadczą również wyniki badań przeprowadzonych w otworze Kompina 2. Podczas opróbowania utworów tej serii, z głębokości 4110–4115 m p.p.t. nastąpił samowypływ solanki, a ciśnienie na głowicy otworu osiągnęło wartość 140 atm (por. rozdział 7.7). Rejon Łowicza wytypowano jako jeden z dziesięciu rejonów perspektywicznych. Przeprowadzono dla niego szczegółowe analizy wskaźników energetycznych i ekonomicznych. W ramach tych analiz przyjęto wydajność otworu eksploatacyjnego na poziomie 50 m^3/h, wiążąc możliwości dopływu wód ze strefami uskoków. Rozpoznanie geologiczne i hydrogeologiczne zbiornika triasowego (por. rozdział 4.2.2) wskazuje jednak, że z uwagi na ograniczony stan rozpoznania warunków przepływu wód podziemnych oraz potencjalnych wydajności ujęć geotermalnych ocena rzeczywistej możliwości wykorzystania zbiornika triasowego każdorazowo winna być poprzedzana realizacją badań uzupełniających/uszczegóławiających, w szczególności z zakresu geofizyki powierzchniowej (sejsmiki 3D, magnetotelluryki).

Na obszarze Karpat Wewnętrznych, największe zasoby geotermalne (wydajność, temperatura) występują w północnej części niecki podhalańskiej i tutaj – z uwagi na istniejącą infrastrukturę geotermalną – wytypowano strefę Bańska Niżna. W Sudetach, zgodnie z analizą przedstawioną w rozdziale 4, potencjalne wykorzystanie energii geotermalnej w systemach binarnych może być wiązane z plutonem karkonoskim, a w tym ze strefą Cieplice Śląskie-Zdrój.

Dla każdej z dziesięciu wytypowanych stref opracowano model lokalnych warunków geologicznych i hydrogeologicznych, służący do konstrukcji modelu termiki górotworu oraz modelu pracy złoża w 50-letnim horyzoncie czasowym. Powierzchnię każdej strefy przyjęto na około 150 km^2, tak aby w jej obszarze znajdowała się wytypowana miejscowość, optymalne warunki hydrogeotermalne oraz kluczowe do analizy i/lub rekonstrukcji otwory wiertnicze.

W kolejnym kroku dla każdej z w.w. stref dokonano oceny możliwej do uzyskania energii i dostępnych mocy, poprzez wykorzystanie modeli numerycznych pracy złoża. Modele te określają wielkość produkcji energii przy zachowaniu odnawialności naturalnych zasobów energii geotermalnej. Do modelowań wykorzystano program TOUGH2, będący w posiadaniu IGSMiE PAN. Celem analizy było między innymi określenie warunków eksploatacji zapewniających bezpieczeństwo pracy systemu geotermalnego w szerokim horyzoncie czasowym. Dokonano rozpoznania potencjalnych użytkowników/odbiorców energii wraz z określeniem parametrów ciepłowniczych istniejących źródeł ciepła, odbiorców ciepła oraz systemów dystrybucji energii w analizowanych rejonach. Zebrano i przeanalizowano również dane o systemach elektro-energetycznych, które umożliwiałyby podłączenie systemu binarnego do sieci i wprowadzenie do niej wyprodukowanej energii elektrycznej. Dokonano wskaźnikowej oceny przewidywanych efektów: finansowych, energetycznych, ekologicznych i społecznych realizacji wytypowanych przedsięwzięć.

Szczegółowy opis metodyki badań wykorzystanej przy: 1) budowie modeli koncepcyjnych (geologicznych i hydrogeologicznych), 2) modelowaniu numerycznym termiki górotworu i pracy złoża, 3) ocenie wpływu zmian parametrów eksploatacyjnych i parametrów powierzchniowych na uzyskiwane efekty pracy instalacji binarnej oraz 4) ocenie przewidywanych efektów: finansowych, energetycznych, ekologicznych i społecznych realizacji wytypowanych przedsięwzięć zaprezentowano w rozdziale 6.

7.2. Koło

7.2.1. Ogólna charakterystyka strefy

Pod względem geologicznym, miasto Koło zlokalizowane jest na obszarze niecki mogileńsko-łódzkiej. Położone jest przy drodze krajowej nr 92 i linii kolejowej Poznań–Warszawa. Prawa miejskie otrzymało w 1362 roku. Obecnie uznawane jest za duży ośrodek przemysłu ceramicznego i spożywczego. Miasto liczy około 24 tysiące mieszkańców. O korzystnym położeniu Koła w samym centrum Polski decyduje fakt krzyżowania się tutaj ważnych szlaków komunikacyjnych: z północy na południe –

drogi państwowej relacji Włocławek–Kalisz i ze wschodu na zachód – międzynarodowej trasy E-30 relacji Moskwa–Berlin.

Koło położone jest we wschodniej części województwa wielkopolskiego nad rzeką Wartą, w granicach Kotliny Kolskiej, która wchodzi w skład makroregionu Niziny Południowowielkopolskiej (Kondracki 2002). Miasto sąsiaduje z gminami: Koło, Kościelec oraz Osiek Mały. Położone jest na średniej wysokości około 101 m n.p.m.

W Kole mają swoją siedzibę znane w kraju i poza granicami firmy z kapitałem zagranicznym: SANITEC KOŁO Sp. z o.o. – największy polski producent wyrobów wyposażenia łazienek, SAINT-GOBAIN ABRASIVES Sp. z o.o. – rynkowy lider w produkcji, sprzedaży materiałów i narzędzi ściernych, SOKOŁÓW S.A. – Oddział Zakłady Mięsne w Kole, Wood-Mizer Industries Sp. z o.o. – producent przewoźnych i stacjonarnych traków tartacznych oraz brzeszczotów do pił taśmowych, M & K Foam Gmbh Sp. z o.o. – producent materacy. Znaczące na rynku krajowym i zagranicznym są również firmy lokalne, m.in.: OKRĘGOWA SPÓŁDZIELNIA MLECZARSKA W KOLE – producent mleka w proszku, masła i galanterii nabiałowej, ANDRE ABRASIVE ARTICLES Zakład Wytwarzania Artykułów Ściernych, Zakład Produkcyjno-Handlowy „IZOMER" – producent Big Bag, Przedsiębiorstwo Produkcyjno-Handlowe AGRONAS Sp. z o.o.

Potrzeby cieplne miasta Koła zaspokajane są przez system ciepłowniczy, kotłownie lokalne i zakładowe oraz kotłownie w budownictwie indywidualnym (dane na podstawie wyników ankietyzacji – Miejski Zakład Energetyki Cieplnej Sp. z o. o. w Kole). Miejski system ciepłowniczy MZEC Sp. z o. o. w Kole pokrywa 18% zaopatrzenia w ciepło, 42% ciepła produkowane jest w kotłowniach węglowych, 37% w kotłowniach gazowych, 3% w kotłowniach olejowych.

MZEC Sp. z o. o. w Kole jest firmą komunalną (100% udziałów posiada Gmina Miejska Koło). Zaspokajanie potrzeb dla centralnego ogrzewania (c.o.) i ciepłej wody użytkowej (c.w.u.) realizuje kotłownia posiadająca 4 kotły opalane miałem węglowym o łącznej mocy 37 MW (ilość spalanego paliwa kształtuje się na poziomie 18 000 Mg). Roczna produkcja ciepła to około 300 000 GJ. Parametry znamionowej pracy: zimą 150/70°C (w funkcji temperatury zewnętrznej), latem 70/35°C.

Sieć przesyłowa o łącznej długości 16,6 km składa się z sieci magistralnej i rozdzielczej (4,1 km) oraz przyłączeniowej (12,5 km). Technologia wykonania w większości opiera się na zastosowaniu rurociągów preizolowanych ułożonych w gruncie (8,2 km) oraz rurociągów umieszczonych w kanałach betonowych/ceglanych z izolacją z waty mineralnej (8,3 km). Sieć napowietrzna izolowana watą mineralną z osłoną z blachy, prowadzona na podporach, stanowi tylko 0,1 km.

Zastosowane węzły ciepłownicze to jednofunkcyjne wymiennikowe (5 szt.) oraz dwufunkcyjne wymiennikowe (152 szt.). Odbiorcą ciepła scentralizowanego w większości jest budownictwo mieszkaniowe 90,3%, 7% przypada na odbiorców komunalnych (urzędy i instytucje), 1,7% na usługi/rzemiosło, a 1% stanowią pozostali odbiorcy. Główne zakłady pracy istniejące na terenie miasta Koła (Zakłady Mięsne Sokołów S.A., Okręgowa Spółdzielnia Mleczarska, Sanitec Koło Sp. z o. o., Saint Gobain Abrasives) posiadają własne źródła ciepła wykorzystujące gaz ziemny.

W tabeli 5.2.1. przedstawiono rzeczywiste średnie miesięczne temperatury powietrza dla miasta Koła (na bazie danych za rok 2012). Amplitudy temperatur są tutaj nieco niższe od przeciętnych w Polsce, zima jest dosyć chłodna, ale niezbyt długa (około 85 dni), z nietrwałą szatą śnieżną.

Tabela 7.2.1. Rzeczywiste średnie miesięczne temperatury powietrza dla miasta Koła (na bazie danych za rok 2012)

Table 7.2.1. Actual mean air temperatures for Koło city (based on data available for 2012)

Miesiąc	Temperatura [°C]
Styczeń	0,36
Luty	–4,34
Marzec	6,16
Kwiecień	10,73
Maj	17,15
Czerwiec	16,37
Lipiec	21,6
Sierpień	21,5
Wrzesień	15,11
Październik	9,21
Listopad	6,09
Grudzień	–1,49

7.2.2. Koncepcyjny model geologiczny i parametry hydrogeotermalne

Podstawowe informacje do utworzenia modelu budowy geologicznej i hydrodynamicznej strefy Koło przedstawiono w rozdziale 4 i 5 oraz uzupełniono je o materiały archiwalne, głównie niepublikowane, zawarte w dokumentacjach geologicznych/hydrogeologicznych (Lis-Martyniak 1973; Sas-Korczyński 1992; Pernal 1989; Marek, Feldman 1986; Wysocka-Kudła 1990; Dembowska, Marek (red.) 1990; Baran 1969).

W granicach analizowanej strefy, wykonane zostały w przeszłości następujące otwory wiertnicze: Dobrów IGH-1, Ponętów 1, Przybyłów 1 i Banachów IG-1, a w pobliżu niej otwór Ponętów 2 (zał. 7.2.1). Kilka kilometrów dalej zlokalizowane są otwory: Trześniew 1, Koło IG-3, Koło IG-4 oraz Uniejów 1 (pierwszy z wymienionych otworów znajduje się na NW od omawianej strefy, pozostałe – na SE od niej).

W 2012 r. omawiany obszar objęto reinterpretacją danych z profilowań sejsmicznych (por. rozdz. 5.5) co w połączeniu z analizą danych z w.w. otworów umożliwiło opracowanie strukturalnego modelu koncepcyjnego omawianej strefy (zał. 7.2.1 i 7.2.2).

Strefa Koła jest fragmentem niecki mogileńsko-łódzkiej, która powstała na miejscu tzw. garbu wielkopolskiego, istniejącego w jurze dolnej i środkowej. Występuje tam wyraźnie zredukowana miąższość osadów. Od NE garb sąsiadował z bruzdą kujawską – strefą szybkiego wzrostu miąższości osadów jury dolnej i środkowej, związaną prawdopodobnie z synsedymentacyjną dyslokacją Gopła-Lutomierska. Strefa Koła stanowi część regionalnej strefy dyslokacyjnej, która ma kierunek NW-SE, równoległy do większości uskoków w podłożu podpermskim oraz do strefy tektonicznej Teisseyre'a-Tornquista (T-T), i która spowodowała powstanie w obszarze niecki mogileńsko-łódzkiej szeregu antyklin, m.in. antykliny Ponętowa (por. rozdział 4.2.1 i 5.5).

Pionowe ruchy tektoniczne, które odżyły w obrębie bloków podpermskiego podłoża pod naciskiem grubego kompleksu osadów cechsztyńsko-mezozoicznych, uaktywniły działalność halokinetyczną. Najsilniejszy etap wypiętrzeń struktur solnych w strefach naruszeń tektonicznych nastąpił w czasie ruchów laramijskich. Rozwój zjawisk halotektonicznych wzdłuż uskoków lub na ich przecięciu powodował powstawanie struktur solnych o różnych kształtach i sile wypiętrzenia. Początki tego procesu prawdopodobnie sięgają okresu po sedymentacji osadów wapienia muszlowego (trias środkowy) i trwały do młodszego mezozoiku. Pełne uaktywnienie soli cechsztyńskich nastąpiło po sedymentacji utworów retyku (trias górny), na co duży wpływ miały orogeniczne ruchy starokimeryjskie (por. rozdział 4.2.1 i 5.5).

W obszarze niecki mogileńsko-łódzkiej niedojrzałe słupy solne i związane z nimi antykliny występują na linii Koło-Ponętów-Wartkowice. Ich efektem jest słup solny Ponętowa (zał. 7.2.2) oraz położona dalej na SE poduszka solna Uniejowa. W efekcie tych procesów, zwłaszcza w okresie ruchów laramijskich, centralna część omawianego obszaru została zrębowo wyniesiona, nawiązując do kierunku NW-SE (zał. 7.2.1 i 7.2.2), a triasowe podłoże utworów dolnojurajskich schodowo zrzucone w kierunku SE, poprzez system poprzecznych do zrębu uskoków o kierunku SW-NE. Struktura zrębowa Ponętowa dzieli Kotlinę Kolską na dwie części – zachodnią i wschodnią, które w dolnej jurze ulegały silniejszemu pogłębianiu.

W jurze górnej i w kredzie dolnej warunki sedymentacji w obrębie garbu wielkopolskiego i bruzdy kujawskiej były zbliżone (zał. 7.2.2). Od kredy górnej, w czasie ruchów tektonicznych orogenezy alpejskiej, zaczęły pojawiać się ruchy inwersyjne, które doprowadziły do powstania w miejscu bruzdy kujawskiej wału, a w miejscu garbu wielkopolskiego – niecki mogileńsko-łódzkiej. Duże miąższości osadów kredy w jej części SE (w niecce mogileńsko-łódzkiej zwłaszcza kredy górnej – rzędu 3000 m), związane były ze wzmożoną subsydencją dna zbiornika sedymentacyjnego.

Niecka mogileńsko-łódzka, o osi równoległej do wału kutnowskiego, jest asymetryczna. Jej bardziej strome skrzydło sąsiaduje bezpośrednio z wałem kujawskim. Wypełniają ją miąższe osady kredy, które przykrywają utwory jury, triasu i permu.

Osady tworzące się w dolnej jurze powstawały w basenie o silnie zróżnicowanej głębokości dna zbiornika. Odmienne pogłębianie i spłycanie dna zbiornika w jego różnych strefach wpływało na zmienną miąższość osadów i tworzenie utworów różnych facji. Sedymentacja odbywała się na przemian w środowisku lądowym i płytkomorskim. W fazach transgresywnych najczęściej osadzały się heterolity i piaskowce płytszego szelfu, a jedynie w pliensbachu ilasto-mułowcowe utwory głębszego szelfu klastycznego. W fazach regresywnych tworzyły się utwory deltowe, fluwialne i bagienne o zróżnicowanej litologii. W profilu jury dolnej dominują zatem miąższe kompleksy wodonośnych utworów piaskowcowych, od drobno- do gruboziarnistych (hetangu, synemuru, górnego pliensbachu i górnego toarku), oraz kompleksy nieciągłych serii osadów słabo przepuszczalnych i praktycznie nieprzepuszczalnych, wykształconych w postaci zwięzłych drobnoziarnistych piaskowców i mułowców (Górecki (red.) 1995). Przedzielają je dwa miąższe iłowcowe kompleksy izolujące. Starszy powstał we wczesnym pliensbachu, młodszy – na ogół zwarty kompleks szarozielonych iłowców i mułowców o stałej miąższości 70–90 m (Górecki (red.) 2006) – w toarku dolnym.

Spąg kompleksu wodonośnych utworów dolnojurajskich stanowią utwory różnych ogniw triasu, głównie bezwodne skały retyku. Według dokumentacji wynikowej otworu Ponętów 1 (Lis-Martyniak 1973) spąg zbiornika dolnojurajskiego tworzą piaskowce i mułowce toarku górnego (nawiercony interwał o miąższości 87 m).

Przez analogię do danych z otworu Przybyłów 1 (Pernal 1989), gdzie utwory dolnojurajskie są silnie zredukowane, spąg tych utworów w innych strefach omawianego rejonu mogą tworzyć utwory triasu górnego: kajpru dolnego i górnego oraz retyku. Według dokumentacji wynikowej w.w. otworu, są to piaskowce i iłowce o miąższości 614,5 m, a według informacji zaprezentowanych w rozdziale 4.2.1, o miąższości 645 m, łącznie z iłowcami mułowcowymi i mułowcami mikowymi o miąższości 120 m. Przez analogię do właściwości tych osadów występujących w otworze Koło IG-4 (Dembowska, Marek (red.) 1990) ich porowatość efektywna może wynosić 1–2% i tylko lokalnie może wzrastać do 5%. W miejscach, gdzie serię utworów górnotriasowych tworzą iłowce leżące na wapieniach, podobnie jak w otworze Trześniew 1 (na wschód od strefy Koła; Wysocka-Kudła, 1990), można przyjąć, że porowatości efektywne utworów triasu są niższe od 1% i tylko lokalnie, we wkładkach mułowcowych i piaskowcowych mogą wynosić około 1,6%, a więc są generalnie nieprzepuszczalne. W modelowaniu numerycznym dla utworów górnego triasu przyjęto porowatość 0,1%, a przepuszczalność 10–4 mD w kierunkach X i Y oraz 10–5 mD w kierunku Z.

Strop utworów dolnojurajskich tworzą bezwodne lub słabo wodonośne osady jury środkowej, przykryte głównie węglanowymi utworami jury górnej. Według dokumentacji wynikowej otworu Ponętów 1 (Lis-Martyniak, 1973) w stropie zbiornika dolnojurajskiego występują piaskowce, wapienie, mułowce i iłowce doggeru o miąższości 237,5 m. Tworzą one serię piaskowca wapnistego o miąższości 280 m (por. rozdział 4.2.1). Według w.w. danych otworowych, wartości porowatości efektywnej wynoszą tam od 4,17% w wapieniach do 9,47% w piaskowcach, natomiast przepuszczalności 3,2 mD w piaskowcach i 73,3 mD w wapieniach.

W otworze Przybyłów 1 strop jury dolnej tworzą utwory jury środkowej (bajosu, batonu i keloweju). Wapienie piaszczyste wykazują miąższość 170 m, w tym miąższość wkładek iłowcowych około 20 m (por. rozdz. 4.2.1). Ich porowatość efektywna wynosi 6,8% (Pernal 1989).

Według dokumentacji wynikowej otworu Banachów IG-1 (Marek, Feldman 1986), strop jury dolnej tworzą utwory jury środkowej (kujaw grn., kujaw-bajos grn., baton dln, śr. i grn. kelowej). Są to: piaskowce, mułowce, iłowce, piaskowce dolomityczne, wapienie piaszczyste, łupki mułowcowe, łupki ilasto-mułowcowe oraz łupki ilaste o łącznej miąższości 105 m. W strefie Koła tego typu utwory powinny dominować w rejonie potencjalnej lokalizacji systemu binarnego. Według danych otworowych z odwiertu Banachów IG-1, wartości porowatości efektywnej wynoszą od 1,31% w iłowcach do 4,42% w piaskowcach (przy przepuszczalności do 0,18 mD), a dla podobnych utworów w otworze Koło IG-4 od 1% w piaskowcach do 6% w mułowcach.

Według obecnego stanu rozpoznania, najkorzystniejsze warunki zbiornikowe stwierdzono w utworach dolnej jury w obrębie wschodniej części Kotliny Kolskiej, w otworze Banachów IG-1. Z powodu zagwożdżenia otworu w obrębie utworów dolnojurajskich (nie przewiercone) jego ewentualna rekonstrukcja wydaje się niemożliwa. Porównywalnych warunków, a być może bardziej korzystnych, należy oczekiwać w zachodniej części Kotliny Kolskiej.

Do modelowania numerycznego przyjęto porowatość 4%, a przepuszczalność 50mD w kierunkach X i Y oraz 5 mD w kierunku Z.

Parametry hydrogeotermalne serii złożowej podano na podstawie danych archiwalnych (por. rozdział 4.2.1) i publikowanych oraz dokumentacji wynikowych w.w. otworów.

Strop utworów jury dolnej zalega w strefie Koła od powyżej –2400 m n.p.m. na SE do ponad –3800 m n.p.m. na północy (zał. 7.2.1). Według dokumentacji wynikowej otworu Ponętów 1, strop występuje na głębokości 2910 m p.p.t., natomiast w otworze Przybyłów 1 na głębokości 2700 m.

Miąższość utworów dolnojurajskich wzrasta od ponad 50 m na SW strefy Koła do 800 m na NE strefy. Temperatury w stropie utworów dolnojurajskich wynoszą od ponad 100°C na SE do 130°C na północy strefy. W obrębie strefy zrębowej, o szerokości do 350 m, przecinającej omawianą strefę w kierunku NW-SE, temperatury są niższe. Z krzywej termicznej otworu Ponętów 1 wynika, że w utworach dolnojurajskich na głęb. 2250 m p.p.t. temperatury wynoszą około 71–72°C, a na głęb. 2262 m p.p.t. temperatury osiągają 73,8°C. Wyliczony z krzywej termicznej gradient geotermiczny ma wartość 2,66°C/100 m. Natomiast w pobliżu strefy zrębowej, w otworze Banachów IG-1 (Marek, Feldman 1986) po dwóch tygodniach stójki temperatura w stropie utworów dolnojurajskich na głębokości 3400 m p.p.t. wynosiła około 108°C (69°C na głęb. 2000 m p.p.t. i 100°C na głęb. 3140 m p.p.t.). Dane te pozwoliły określić wartość średnią gradientu jako 2,8°C/100 m.

Występują tutaj solanki zaliczane do typu hydrogeochemicznego Na-Cl. Ich mineralizacja wzrasta w serii złożowej od ponad 100 g/dm^3 na zachodzie strefy do ponad 200 g/dm^3 w kierunku słupa solnego Ponętowa.

W otworze Ponętów 1 odnotowano przypływ wody w ilości 1,4 m^3/h.

Parametry zbiornikowe piaskowców dolonojurajskich zestawiono na podstawie danych ujętych w rozdz. 5.4 oraz informacji archiwalnych, zawartych w rozdziale 4.2.1.

Porowatość efektywna (regionalna) wodonośnych utworów dolnojurajskich niecki mogileńsko-łódzkiej waha się od 7,95 do 25,35% (średnio 18,3%).

W omawianej strefie, w otworze Banachów IG-1 – poza strefą zrębową – pomierzone wartości porowatości utworów piaskowcowych wynoszą od kilku do 10,32%. Według danych otworowych występowały tam wartości od 3,26 do 4,84%. Badania próbek rdzeni (por. rozdział 5.4) wskazują na porowatość 7,18% dla głęb. 3344,5 m p.p.t. oraz 8,91% dla głęb. 3380,7 m p.p.t.

W otworze Uniejów 1 (Baran 1969), zlokalizowanym kilka kilometrów na SE od omawianej strefy, a przy tym także poza strefą zrębową, średnia porowatość wodonośnych warstw dolnej jury wynosi 10,95%.

Badania próbek rdzeni (por. rozdział 5.4) z otworu Koło IG-4 zlokalizowanego poza omawianą strefą, w pobliżu tej samej strefy zrębowej, pozwoliły określić wartości porowatości efektywnej skał liasu na: 7,62% dla głęb. 2732,4 m p.p.t. oraz 13,38% dla głęb. 2766,5 m p.p.t. Natomiast według danych z dokumentacji powykonawczej tego otworu w słabiej przepuszczalnych partiach utworów pliensbachu (interwały głębokości: 2732,5–2741,5 m p.p.t. i 2770,5–2771,7 m p.p.t.) średnia wartość porowatości to 1% (od 1 do 2%).

Badania rdzeni z otworu Koło IG-3, zlokalizowanego także poza omawianą strefą, lecz w obrębie strefy zrębowej, dla głęb. 3079,4 m p.p.t. wskazywały na porowatość 9,98% (por. rozdział 5.4). Według danych z dokumentacji powykonawczej tego otworu (Dembowska, Marek (red.) 1990), dla słabo przepuszczalnych utworów hettangu grn.-synemuru dln. (sześć stref w interwale głębokości 2984–3090,8 m p.p.t.) notowano wartość średnio 3% (od 0 do 7%), a dla utworów hettangu dln. (interwał głębokości 3107,9–3117,5 m p.p.t.) średnio także 3% (od 2 do 3%).

Niskie wartości porowatości wskazane w dokumentacjach otworów Koło IG-3 i Koło IG-4 korespondują z danymi zawartymi w dokumentacji wynikowej otworu Ponętów 1, zlokalizowanego w obrębie strefy zrębowej przecinającej omawianą strefę. Dla głęb. 2990 m p.p.t. wynosiła ona 2,81%, a dla interwału 3000–3003 m p.p.t. – 1,33%. Według danych otworowych najwyższą wartość porowatości, tj. 5,46%, odnotowano w tym otworze w piaskowcach stropowych, w interwale głębokości 2961,8–2963,4 m p.p.t.

Na podstawie powyższych informacji, dla modelowania numerycznego omawianej strefy przyjęto wartość 7%, biorąc pod uwagę usytuowanie strefy względem wskazanych otworów.

Współczynnik przepuszczalności (regionalny) dla niecki mogileńsko-łódzkiej wynosi od kilkudziesięciu mD do 1627,2 mD (średnio 285,35 mD).

Badania próbek rdzeni (por. rozdział 5.4) wskazują, że w otworze Banachów IG-1 na głęb. 3344,5 m p.p.t. przepuszczalność utworów wynosi 2,291 mD (w kierunku X); na głębokości 3380,7 m p.p.t. 0,981 mD (w kierunku X) i 0,141mD (w kierunku Z). W obrębie i sąsiedztwie struktury zrębowej jest ona albo zerowa (otwór Ponętów 1), albo dochodzi co najwyżej do kilkunastu mD. W przypadku otworu Koło IG-3 wartość ta wynosi 0,385 mD dla próby z głęb. 3079,4 m p.p.t. Dla otworu Koło IG-4 wartość 2,971 mD wykazano dla próby z głębokości 2732,4 m p.p.t., a 129,023 mD dla próby z głębokości 2766,5 m p.p.t.

Współczynnik filtracji (regionalny) dla niecki mogileńsko-łódzkiej wynosi od $9{,}48 \cdot 10^{-8}$ do $1{,}2 \cdot 10^{-5}$ m/s (średnio $2{,}11 \cdot 10^{-6}$ m/s).

Potencjalna wydajność otworów wiertniczych szacowana jest w omawianej strefie w zakresie od 100 m^3/h na południu do około 250 m^3/h na północy.

Przedstawiony koncepcyjny model geologiczny strefy Koła, obejmujący mapę ukształtowania stropu zbiornika jurajskiego, przekroje geologiczne z oszacowanymi miąższościami utworów, parametry hydrogeotermalne oraz dane litostratygraficzne – stanowił podstawę dla opracowania numerycznego modelu przestrzennego rozkładu temperatur i ciśnień w analizowanej strefie.

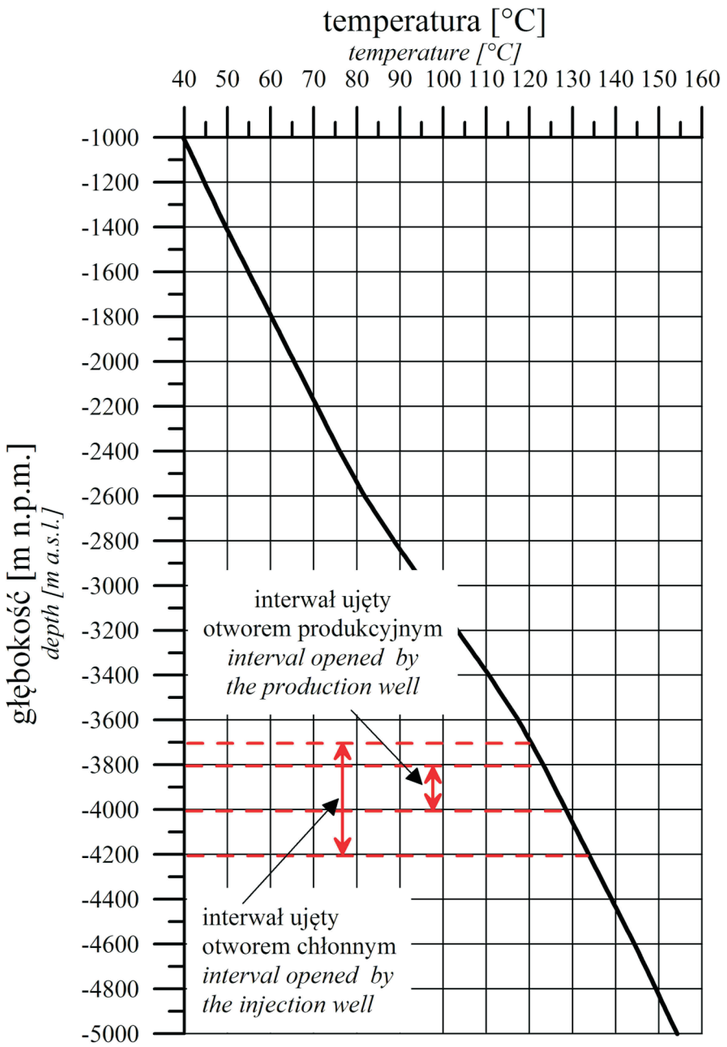
7.2.3. Model numeryczny termiki górotworu

Modelowanie numeryczne termiki górotworu wykonano w celu oceny warunków początkowych dla modelowania pracy systemu w długim horyzoncie czasowym (por. rozdział 7.2.5).

Modelowaniem numerycznym objęto obszar 10 km × 10 km, w przedziale głębokości od –1000 m n.p.m. do –5000 m n.p.m. Pionowy wymiar przestrzenny modelu wynosi 4 km. Model składa się z 22 warstw, natomiast każda warstwa składa się z 400 elementów o wymiarze powierzchniowym 500 × 500 m. Miąższość warstw wynosi 200 m, z wyjątkiem warstw leżących w stropie i spągu modelu, których miąższość wynosi 50 m. Łączna liczba elementów obliczeniowych tworzących model stanu stacjonarnego wynosi 8800 (zał. 7.2.3 – rys. 1). Główna miejscowość – Koło – znajduje się w północnej części modelowanego obszaru. Jego lokalizację w obszarze modelowania przedstawiono na załączniku 7.2.3 – rys. 1.

Głównym horyzontem geotermalnym w rozpatrywanej strefie jest zbiornik jury dolnej. Poziom zalegania stropu i spągu jury dolnej oraz pozostałych horyzontów określono na podstawie założeń zaprezentowanych w rozdziale 7.2.2. Podłoże modelowanego obszaru stanowią utwory triasu górnego. Bezpośrednio nad jurą dolną zalega jura środkowa i jura górna. Na podstawie danych otworowych domniemywa się, że jura górna na kontakcie z zalegającymi nad nią utworami kredy dolnej jest nieprzepuszczalna. W modelu założono, że około 200-metrowy kompleks jury górnej – poczynając od jej stropu ku dołowi – stanowią utwory nieprzepuszczalne. W tabeli 7.2.3.1 zestawiono parametry struktur geologicznych tworzące model numeryczny górotworu w rejonie Koła.

Prognozowany modelowaniem numerycznym profil temperatury w strefie miasta Koło przedstawia rysunek 7.2.3.1. Profil temperatury otrzymano przyjmując na powierzchni i spągu mode-



Rys. 7.2.3.1. Profil temperatury w strefie miasta Koło otrzymany w wyniku modelowania numerycznego wraz z naniesionymi interwałami ujętymi otworami eksploatacyjnymi

Fig. 7.2.3.1. Temperature profile in Koło area obtained by numerical modelling, including in production well intakes intervals

lowanego obszaru warunki brzegowe I-szego rodzaju (warunki brzegowe Dirichleta, $T(t)$ = const., $p(t)$ = const.). Temperatura na głębokości –1000 m n.p.m. wynosiła 39,7°C, a na głębokości –5000 m n.p.m. 154,3°C. Na brzegach modelowanego obszaru zastosowano warunki brzegowe II-go rodzaju (warunek brzegowy Neumanna) – przyjmując gęstość strumienia ciepła przepływającego przez powierzchnie boczne równą 0 W/m^2. Temperatura pomiędzy stropem i spągiem modelowanego obszaru została określona przy uwzględnieniu budowy geologicznej i lokalnych warunków hydrogeotermalnych, które szerzej opisano w rozdziale 7.2.2. i 7.2.5. Rozkład temperatury w modelowanej strefie nie wykazywał istotnych zmian na określonej głębokości. Przykładowo, w przekroju przechodzącym przez miejscowość Koło, równoległym do osi Y lokalnego układu współrzędnych (zał. 7.2.3 – rys. 1 – dla X = 1880 m), zmienność temperatury na głębokości –3900 m n.p.m. zawierała się w przedziale od 125,3°C do 125,9°C przy wartości średniej około 125,8°C. Dla przekroju przechodzącego przez miasto Koło, równoległego do osi X lokalnego układu współrzędnych (zał. 7.2.3 – rys. 1 – dla Y = 3350 m) zmienność temperatury na tej samej głębokości zawierała się w przedziale od 125,4°C do 125,9°C, przy wartości średniej około 125,6°C.

Tabela 7.2.3.1. Struktury geologiczne tworzące model i ich parametry geologiczne

Table 7.2.3.1. Geological structures constituting the model and their geological parameters

Nr	Formacja / Struktura	Opis	Oznaczenie w modelu	Porowatość efektywna [%]	Gęstość [kg/m^3]	Przepuszczalność [mD]		Ciepło właściwe [J/(kg·K)]	Współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m·K)]
						XY	Z		
1	T_3 Trias górny	piaskowce, iłowce		0,1	2 650	10^{-4}	10^{-5}	1 000	3,5
2	J_1 Jura dolna	piaskowce drobno- i gruboziarniste, iłowce, mułowce		7	2 650	50	5	1 000	3,5
3	J_2+J_3 Jura środkowa i górna	piaskowce, wapienie piaszczyste, mułowce, iłowce		4	2 650	50	5	1 000	3,5
4	J_3 Jura górna nieprzepuszczalna	mułowce, iłowce, wapienie, anhydryty		0,01	2 650	10^{-4}	10^{-5}	1 000	3,5
5	K_1 Kreda dolna	piaskowce drobno- i bardzo drobnoziarniste, mułowce piaszczyste, wapienie, łupki ilaste		2	2 650	50	5	1 000	3,5

Kalibracja modelu numerycznego termiki górotworu polegała na wykonaniu szeregu symulacji, mających na celu odtworzenie warunków termicznych w analizowanym rejonie Koła. Za punkt odniesienia przyjęto dane zawarte na mapach temperatury w stropie poszczególnych jednostek stratygraficznych, przedstawionych przez Góreckiego (red. 2006).

7.2.4. Program technologiczny zastosowania systemu binarnego

Zgodnie z informacją zawartą w rozdziale 7.2.2, w granicach analizowanej strefy wykonane zostały w przeszłości następujące otwory wiertnicze: Dobrów IGH-1, Ponętów 1, Przybyłów 1 i Banachów IG-1, a w pobliżu niego otwór Ponętów 2. Analizując lokalizację wymienionych głębokich wierceń oraz po dokładnym przestudiowaniu dokumentacji wynikowych, szczegółową analizą w zakresie oceny możliwości rekonstrukcji starych odwiertów objęto otwory: Ponętów 1 oraz Przybyłów 1.

7.2.4.1. Analiza możliwości rekonstrukcji starych otworów wiertniczych

Ponętów 1

Otwór dowiercony został do głębokości 3007 m p.p.t. Dokumentacja wynikowa otworu poszukiwawczego Ponętów 1 opracowana została w 1973 r. przez Przedsiębiorstwo Poszukiwań Naftowych w Krakowie. Otwór zlokalizowany był w miejscowości Powiercie (gmina Koło). Współrzędne geograficzne otworu wynoszą (wg dokumentacji):

długość: 18°42'35'',
szerokość: 52°11'18",
wysokość nad poziom morza: 111,0 m.

Wiercenie rozpoczęto w dniu 05.11.1972 r., a zakończono 24.05.1973 r. Otwór został zlikwidowany w dniu 18.06.1973 r.

Otwór Ponętów 1 wykonano w celu rozpoznania warunków złożowych i nasycenia węglowodorami kompleksu wapieni jury górnej i piaskowców jury środkowej. Wykonane próby złożowe w otworze Ponętów 1 pozwoliły na określenie rodzaju medium nasycającego poziomy malmu i doggeru.

Uproszczony profil litostratygraficzny (m p.p.t.):

0–47 m – czwartorzęd, trzeciorzęd, gliny, piaski,
47–1578 m – kreda górna, wapienie, margle, opoki,
1578–1929 m – kreda dolna, mułowce, piaskowce, łupki ilaste,
1929–2672,5 m – jura górna, wapienie, anhydryty, iłowce,
2672,5–2910 m – jura środkowa, piaskowce, wapienie, iłowce, mułowce,
2910–3007 m – jura dolna, piaskowce, mułowce.

Zarurowanie otworu (m p.p.t.):

0–138,6 m – rury 13 3/8" cementowane do wierzchu,
0–1346 m – rury 9 5/8" cementowane w interwale 500–1346 m,
0–2886 m – rury 6 5/8" cementowane w interwale 1240–2886 m.

Objawy w czasie wiercenia

W utworach kredy, podczas wiercenia obserwowano systematyczne ucieczki płuczki w ilości około 110 m^3 od głębokości 315 m p.p.t., przy głębokościach 660 m p.p.t. i 706 m p.p.t. zanik około 120 m^3 wody. Zanik wody 4–5 m^3/h, przy głębokości 802,6 m p.p.t. Przy głębokości otworu 1647,8 m p.p.t. zanik wody 30 m^3/h. Przy głębokości otworu 1692 m p.p.t. – samoczynny wypływ wody o temp. 50°C w ilości 50 l/sek. Przy głębokości 1700–1720 m p.p.t. – zanik płuczki. Przy głębokości około 1770 m p.p.t. i 1820 m p.p.t. stwierdzono zgazowanie płuczki.

Badania wykonane w otworze

W trakcie wiercenia wykonano jedną próbę złożową w głębokości:

- 2638–2720 m p.p.t. – jura górna + środkowa, wapienie, piaskowce. Opróbowanie przeprowadzono w jednym cyklu – czas oczekiwania na przypływ 90 min., czas oczekiwania na wzrost ciśnienia 45 min. Otrzymano przypływ solanki nagazowanej gazem ziemnym o wydajności 3 m^3/h. Analiza płynu wykazała, że jest to około 13,3% solanka. Wartość współczynnika siarczanowości (0,87) klasyfikuje ją jako wodę zbiornika hydraulicznie szczelnego – odizolowanego od wpływu wód powierzchniowych. Analiza gazu pobranego próbnikiem złoża z przewodu wykazała, że jest to gaz gazolinowy.

Po zakończeniu wiercenia przeprowadzono dwie próby złożowe, w głębokości

- 2830–2840 m p.p.t. – jura środkowa, piaskowce. Wykonano perforację interwału w głębokości 2830–2840 m p.p.t. i zapięto próbnik złożowy. Opróbowanie przeprowadzono w jednym cyklu – czas oczekiwania na przypływ 70 min., czas oczekiwania na wzrost ciśnienia 40 min. Otrzymano przypływ 130 l/h płuczki z solanką z objawami gazu niepalnego. Woda pobrana do analizy wykazała, że jest to solanka o mineralizacji 185,3 g/dm^3. Zmiany w chemizmie analizowanej wody (podwyższona zawartość jonów Cl i Ca) w stosunku do wody pobranej próbnikiem złoża w głęb. 2638–2720 m p.p.t. nie wydają się być wywołane czynnikami naturalnymi, lecz obecnością w niej dużej ilości filtratu płuczki wiertniczej. Analizowany gaz jest gazem bezgazolinowym.
- 2325–2340 m p.p.t. – jura górna, wapienie. Wykonano perforację interwału w głębokości 2325–2340 m p.p.t. i zapięto próbnik złożowy. Opróbowanie przeprowadzono w jednym cyklu – czas oczekiwania na przypływ 205 min., czas oczekiwania na wzrost ciśnienia 90 min. Stwierdzono przypływ 1,4 m^3/h solanki z objawami gazu ziemnego. Woda pobrana do analizy wykazała, że jest to solanka o mineralizacji 67 g/dm^3. Wysoki współczynnik siarczanowości klasyfikuje ją jako solankę z utworów o obniżonej szczelności hydrogeologicznej. Analizowany gaz jest gazem gazolinowym.

Likwidacja otworu

W dniu 18.06.1973 r. zakończono likwidację otworu. W ramach prac likwidacyjnych wykonano korki cementowe w głębokościach: 2850–2890 m p.p.t., 2800–2840 m p.p.t., 2295–2340 m p.p.t. oraz wykonano korek wierzchni w interwale 0–30 m p.p.t. Przestrzeń pomiędzy korkami została wypełniona gęstą płuczką.

Wstępne wskazanie zakresu prac rekonstrukcyjnych otworu Ponętów 1

Aktualna konstrukcja otworu Ponętów 1 uniemożliwia udostępnienie złoża występującego w jurze dolnej. Możliwe jest jedynie udostępnienie złoża występującego w utworach jury środkowej, górnej lub kredy dolnej. Na rysunku 7.2.4.1 zaprezentowano schemat konstrukcji otworu Ponętów 1 po zakończeniu wiercenia.

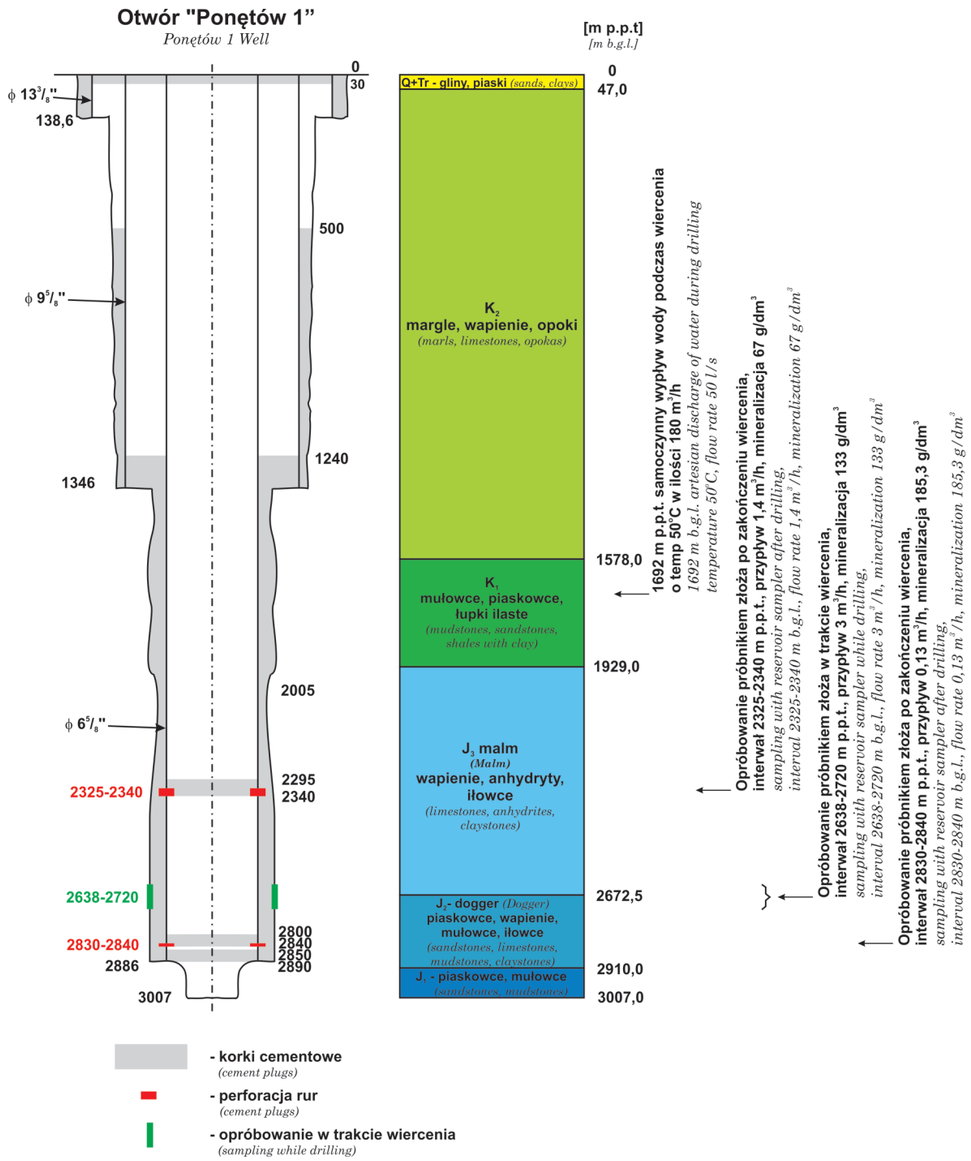
Przybyłów 1

Otwór dowiercony został do głębokości 3857 m p.p.t. Dokumentacja wynikowa otworu poszukiwawczego Przybyłów 1 opracowana została w 1989 r. przez Przedsiębiorstwo Poszukiwań Naftowych w Krakowie. Otwór zlokalizowany był w miejscowości Ladorudzek (gmina Grzegorzew). Współrzędne geograficzne otworu wynoszą (wg dokumentacji):

długość: 18°44'46'',
szerokość: 52°09'12",
wysokość nad poziom morza: 97,5 m.

Wiercenie rozpoczęto w dniu 11.12.1987 r., a zakończono 19.02.1988 r. Otwór został zlikwidowany w dniu 08.05.1989 r.

Wiercenie otworu Przybyłów 1 zrealizowane zostało w ramach poszukiwań złóż węglowodorów w obrębie rozległej struktury Ponętowa. Jego zadaniem było sprawdzenie rozwoju litologiczno-facjalnego oraz nasycenia całego profilu jury i triasu w strefie przewidywanych wyklinowań facjalnych i pułapek tektonicznych.



Rys. 7.2.4.1. Schemat konstrukcji otworu Ponętów 1 po zakończeniu wiercenia

Fig. 7.2.4.1. Diagram of the Ponętów 1 borehole design following the drilling

Uproszczony profil litostratygraficzny otworu Przybyłów 1 (m p.p.t.):

0–34 m – czwartorzęd, piaski, gliny,
34–1715,5 m – kreda górna, wapienie, opoki, margle,
1715,5–1890 m – kreda dolna, piaskowce, mułowce, iłowce,
1890–2540 m – jura górna, wapienie, anhydryty, margle,
2540–2700 m – jura środkowa, piaskowce, mułowce,
2700–2766,5 m – jura dolna, piaskowce, iłowce,
2766,5–3381 m – trias górny, piaskowce, iłowce,
3381–3672,5 m – trias środkowy, piaskowce, iłowce, mułowce,
3672,5–3857 m – trias dolny, wapienie, iłowce, mułowce.

Zarurowanie otworu (m p.p.t.):

0–34 m – rury 18 5/8" cementowane do wierzchu,
0–204 m – rury 13 3/8" cementowane do wierzchu,
0–2217 m – rury 9 5/8" cementowane w interwale 820–2217 m,
2100–3500 m – rury 6 5/8" cementowane w interwale 2618–3500 m.

Objawy w czasie wiercenia

Zaniki płuczki odnotowano podczas przewiercania kawernistych wapieni jury górnej w głębokościach: 2051–2053 m p.p.t. (8 m^3), 2206 m p.p.t. – (32 m^3), 2440–2454 m p.p.t. (ok. 90 m^3), 2454–2485 m p.p.t. (32 m^3), 2498–2521 m p.p.t. (34 m^3).

Przy głębokości 2498 m p.p.t. (jura górna) nastąpił samowypływ wody o wydajności około 6 m^3/h. Zrównoważono go po częściowym zatłoczeniu otworu płuczką (22 m^3) o ciężarze właściwym 1,15 g/cm^3. Objawów węglowodorów w płuczce nie stwierdzono.

Badania wykonane w otworze

W trakcie wiercenia wykonano jedną próbę złożową:

- 1895–1924 m p.p.t. – jura górna, wapienie. Przy głębokości otworu 1924 m p.p.t. zapięto próbnik złoża w głębokości 1895 m p.p.t. w celu opróbowania górnej części utworów portlandu (objawy ropy w szczelinach). Próba technicznie nieudana. Brak szczelności pakera, zatkanie dyszy próbnika.

Po zakończeniu wiercenia przeprowadzono pięć prób złożowych:

- 3360–3395 m p.p.t. – trias górny + środkowy, piaskowce. Wykonano perforację rur 6 5/8'' w interwale głębokości 3360–3395 m i zapięto próbnik złożowy. Po 120 min. oczekiwania nie stwierdzono żadnego przypływu,
- 2741–2747 m p.p.t. – jura dolna, piaskowce. Wykonano perforację rur 6 5/8'' w interwale głębokości 2741–2747 m p.p.t. i zapięto próbnik złożowy. Po 102 min. oczekiwania stwierdzono przypływ 7,2 m^3 solanki słabo zgazowanej gazem palnym o mineralizacji 157 g/dm^3,
- 2125–2147 m p.p.t. – jura górna, wapienie. Wykonano perforację rur 6 5/8'' i 9 5/8'' w interwale głębokości 2125–2147 m p.p.t. Przerobiono frezerem interwał perforacji i zapięto próbnik złożowy. Po 7,5 godz. oczekiwania stwierdzono przypływ 4,85 m^3 solanki bez śladów węglowodorów o mineralizacji około 90 g/dm^3,
- 1895–1945 m p.p.t. – jura górna, wapienie. Wykonano perforację rur 9 5/8'' w interwale głębokości 1925–1945 m i zapięto próbnik złożowy. Po 90 min. oczekiwania nie stwierdzono przypływu. Doperforowano interwał 1895–1925 m i opróbowano próbnikiem złoża. Po 4 godz. oczekiwania stwierdzono przypływ 400 l płuczki bez śladu bituminów. Wykonano powtórnie perforację w interwale 1895–1911 m p.p.t. Odpalono torpedę w głębokości 1910 m oraz generator prochowy w głębokości 1908 m p.p.t. Zapięto selektywny próbnik złoża. Próba technicznie nieudana – brak szczelności górnego pakera. Zapięto powtórnie próbnik w głębokości 1870 m p.p.t. (dolny paker odpiął się w czasie zabiegu). Po 38 godz. oczekiwania stwierdzono przypływ 1,4 m^3 płuczki z nieszczelności pakera oraz nagazowanie przybitki gazem palnym. Wykonano kwasowanie wtłaczając w otwarty perforacją interwał 1895–1945 m p.p.t. 6 m^3 15%-owego HCl – brak chłonności. Zapuszczono próbnik złoża zapinając paker w głę-

bokości 1860 m p.p.t. Po 19 godz. oczekiwania stwierdzono przypływ 6,5 m^3 wody złożowej bez śladów węglowodorów o mineralizacji około 9 g/dm^3. Woda może pochodzić z kredy dolnej z powodu złego stanu zacementowania rur 9 5/8'',

- 1751–1768 m p.p.t. – 1790–1807 m p.p.t. – kreda dolna, piaskowce. Wykonano perforację rur 9 5/8'' w interwałach 1751–1768 m p.p.t. i 1790–1807 m p.p.t. Opróbowano otwarty interwał próbnikiem złożowym. Po 50 min. oczekiwania uzyskano przypływ 5,6 m^3 wody złożowej. Po wyciągnięciu próbnika stwierdzono samowypływ wody z otworu. Obserwowano otwór wykonując pomiary samowypływu. Stwierdzono wodę złożową o mineralizacji 9 g/dm^3 w ilości 2,88 m^3/h. Temperatura w głębokości 1733 m – 69°C.

Likwidacja otworu

W dniu 08.05.1989 r. zakończono likwidację otworu. W ramach prac likwidacyjnych wykonano korki cementowe w głębokościach: 3400–3857 m p.p.t., 2600–2650 m p.p.t., 2000–2071 m p.p.t., 1740–1895 m p.p.t. oraz wykonano korek wierzchni w interwale 0–30 m p.p.t. Przestrzeń pomiędzy korkami została wypełniona gęstą płuczką.

Wstępne wskazanie zakresu prac rekonstrukcyjnych otworu Przybyłów 1

Ze względu na niewielką miąższość utworów jury dolnej w analizowanej lokalizacji oraz aktualną konstrukcję otworu Przybyłów 1, jak również zakres prac badawczych wykonanych w otworze po jego zarurowaniu (szczelinowania) nie przewiduje się prac rekonstrukcyjnych w celu udostępnienia złoża występującego w tym rejonie. Na rysunku 7.2.4.2 zaprezentowano schemat konstrukcji otworu Przybyłów 1 po zakończeniu wiercenia.

Biorąc pod uwagę powyższe analizy, zagospodarowanie energii geotermalnej w rejonie Koła będzie wymagało odwiercenia co najmniej jednego nowego otworu eksploatacyjnego i jednego otworu chłonnego. Uwzględniając głębokość zalegania warstwy wodonośnej, w niniejszej pracy przyjęto głębokość otworu eksploatacyjnego 4000 m i otworu chłonnego 4200 m.

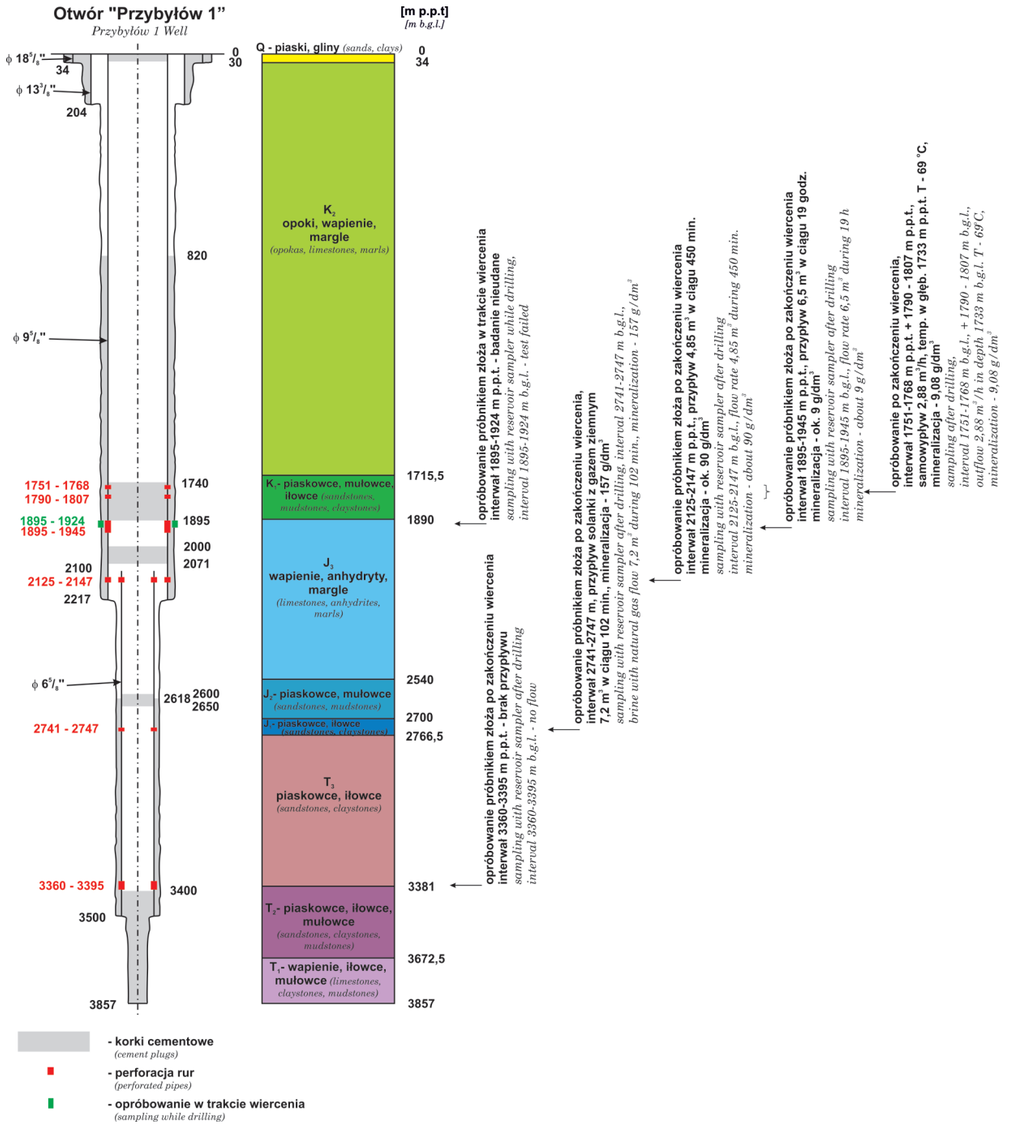
7.2.4.2. Modelowanie wpływu zmian parametrów eksploatacyjnych na uzyskiwane efekty pracy binarnej elektrociepłowni geotermalnej

Biorąc pod uwagę uwarunkowania geologiczne i technologiczne, opisane w poprzednich rozdziałach (por. rozdział 4, 6.2, 7.2.2, 7.2.3), za najlepsze i najprostsze we wdrożeniu rozwiązanie technologiczne uznano system ORC.

Obliczenia wykonano dla trzech oczekiwanych temperatur końcowych wody termalnej (woda schłodzona w systemie energetycznym) T_{g2}:

- **wariant A** – woda termalna zasila tylko elektrownię geotermalną (po zasileniu elektrowni będzie kierowana do odwiertu chłonnego) – wybrano te parametry pracy elektrowni, przy których moc elektrowni jest najwyższa,
- **wariant B** – woda termalna będzie wykorzystywana również na potrzeby ciepłownicze lub do innych procesów technologicznych – do obliczeń przyjęto T_{g2}^{B} = 60°C;
- **wariant C** – woda termalna będzie wykorzystywana na potrzeby technologii basenowej i/lub cele balneologiczne – do obliczeń przyjęto T_{g2}^{C} = 47°C.

W tabelach 7.2.4.1–7.2.4.3 przedstawiono szczegółowe wyniki obliczeń modelowych dla w.w. wariantów. Oznaczenia prezentowane w tabelach są zgodne z opisem przedstawionym w rozdziale 6.2. oraz ze schematem zaprezentowanym na rysunku 6.2.5.1.



Rys. 7.2.4.2. Schemat konstrukcji otworu Przybyłów 1 po zakończeniu wiercenia

Fig. 7.2.4.2. Diagram of the Przybyłów 1 borehole design following the drilling

Jak wynika z analizy danych zestawionych w tabeli 7.2.4.1, dla wody termalnej o temperaturze około 118°C, przy wydajności ujęcia na poziomie 200 m^3/h maksymalną moc elektrowni (1095 kW) uzyskuje się przy zastosowaniu czynnika R227ea i temperaturze jego odparowania 80°C. Przy założeniu, że woda termalna po zasileniu elektrowni zostanie schłodzona do temperatury 60°C (wariant B, tab. 7.2.4.2), najwyższą moc (1079 kW) osiągnie się również przy zastosowaniu czynnika R227ea w temperaturze odparowania 86°C. Dla wariantu C (tab. 7.2.4.3) moc maksymalna elektrowni wynosi 1040 kW, przy zastosowaniu tego samego czynnika roboczego, i jego odparowaniu w temperaturze 68°C.

Tabela 7.2.4.1. Parametry termiczne i kaloryczne czynników roboczych oraz wyniki obliczeń dla wariantu A – maksymalizacja mocy elektrowni geotermalnej dla lokalizacji KOŁO

Table 7.2.4.1. Thermal and calorific parameters of the operating media, as well as calculation results for the option A – maximization of the geothermal plant power for the KOŁO location

Lokalizacja KOŁO: T_{g1} = 118°C, $\dot{V}_g$ = 200 m^3/h, ΔT_1 = 5K ΔT_S = 3K, wariant A																				
Woda termalna					Parametry charakterystyczne czynnika											Układ ORC				
czynnik roboczy	T_{g2}	T_{g3}	T_{g4}	ΔT_2	T_{n1}	h_{n1}	T_{n2s}	h_{n2s}	T_{n3}	h_{n3}	T_{n4s}	h_{n4s}	$T_{n5} = T_{n6}$	h_{n5}	h_{n6}	m_n	N_t	N_p	N_{ORC}	Q_d	η_{ORC}
	°C	°C	°C	°C	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	kJ/kg	kg/s	kW	kW	kW	kW	%
R227ea	55,3	85,0	116,1	36,1	83,0	372,5	44,4	356,5	30,0	234,6	30,8	235,6	80,0	300,4	368,3	95,2	1 216,9	121,9	1 095,0	13 027,9	8,4
R1234ze	59,8	81,0	116,7	40,7	79,0	254,9	35,2	233,0	30,0	64,9	30,7	66,0	76,0	134,7	250,6	64,0	1 119,3	93,8	1 025,4	12 084,3	8,5
R236fa	58,9	79,0	116,9	42,9	77,0	410,9	43,2	392,1	30,0	237,3	30,3	237,9	74,0	296,7	407,6	70,9	1 067,9	53,9	1 014,1	12 271,4	8,3
Izobutan	62,4	79,0	117,0	43,0	77,0	657,4	40,6	614,2	30,0	271,2	30,4	272,7	74,0	387,5	650,5	30,0	1 036,9	57,6	979,3	11 548,2	8,5
MM	61,1	77,0	117,1	45,1	75,0	154,4	54,9	124,6	30,0	–141,1	30,0	–141,0	72,0	–58,3	149,5	40,1	953,0	2,6	950,2	11 830,6	8,0
Metanol	66,6	70,4	113,9	48,5	113,0	1 204,5	30,0	1 068,4	30,0	–92,8	30,0	–92,7	65,4	2,6	1 101,9	8,2	895,9	1,1	894,8	10 673,3	8,4

Tabela 7.2.4.2. Parametry termiczne i kaloryczne czynników roboczych oraz wyniki obliczeń dla wariantu B dla lokalizacji KOŁO

Table 7.2.4.2. Thermal and calorific parameters of the operating media, as well as calculation results for the option B for the KOŁO location

Lokalizacja KOŁO: T_{g1} = 118°C, T_{g2} = 60°C, $\dot{V}_g$ = 200 m^3/h, ΔT_S = 3K, wariant B																				
Woda termalna					Parametry charakterystyczne czynnika											Układ ORC				
czynnik roboczy	T_{g4}	ΔT_2	T_{g3}	ΔT_1	T_{n1}	h_{n1}	T_{n2s}	h_{n2s}	T_{n3}	h_{n3}	T_{n4s}	h_{n4s}	$T_{n5} = T_{n6}$	h_{n5}	h_{n6}	m_n	N_t	N_p	N_{ORC}	Q_d	η_{ORC}
	°C	°C	°C	°C	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	kJ/kg	kg/s	kW	kW	kW	kW	%
R227ea	116,0	30,0	91,0	5,0	89,0	374,3	44,9	356,9	30,0	234,6	30,9	235,8	86,0	309,8	369,5	86,9	1 212,1	132,2	1 079,9	12 050,2	9,0
R1234ze	116,7	40,7	81,1	5,1	79,0	254,9	35,2	233,0	30,0	64,9	30,7	66,0	76,0	134,7	250,6	63,8	1 116,1	93,5	1 022,6	12 050,2	8,5
R236fa	117,0	45,0	76,6	4,6	75,0	655,0	40,3	613,5	30,0	271,2	30,4	272,6	72,0	381,8	648,1	31,6	1 044,8	56,7	988,1	12 050,2	8,2
Izobutan	117,0	45,0	76,6	4,6	75,0	655,0	40,3	613,5	30,0	271,2	30,4	272,6	72,0	381,8	648,1	31,6	1 044,8	56,7	988,1	12 050,2	8,2
MM	117,0	47,0	75,6	5,6	73,0	151,3	53,8	122,9	30,0	–141,1	30,0	–141,0	70,0	–62,4	146,4	41,2	937,3	2,2	935,1	12 050,2	7,8
Metanol	114,2	55,6	63,5	4,9	96,0	1 178,3	30,0	1 068,4	30,0	–92,8	30,0	–92,7	58,6	–16,5	1 095,8	9,4	833,6	0,9	832,7	12 050,2	6,9

Tabela 7.2.4.3. Parametry termiczne i kaloryczne czynników roboczych oraz wyniki obliczeń dla wariantu C dla lokalizacji KOŁO

Table 7.2.4.3. Thermal and calorific parameters of the operating media, as well as calculation results for the option C for the KOŁO location

Lokalizacja KOŁO: T_{g1} = 118°C, T_{g2} = 47°C, $\dot{V}_g$ = 200 m^3/h, ΔT_S = 3K, wariant C																				
Woda termalna					Parametry charakterystyczne czynnika											Układ ORC				
czynnik roboczy	T_{g4}	ΔT_2	T_{g3}	ΔT_1	T_{n1}	h_{n1}	T_{n2s}	h_{n2s}	T_{n3}	h_{n3}	T_{n4s}	h_{n4s}	$T_{n5} = T_{n6}$	h_{n5}	h_{n6}	m_n	N_t	N_p	N_{ORC}	Q_d	η_{ORC}
	°C	°C	°C	°C	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	kJ/kg	kg/s	kW	kW	kW	kW	%
R227ea	116,1	48,1	72,7	4,7	71,0	367,5	42,5	354,8	30,0	234,6	30,5	235,3	68,0	283,2	363,9	111,6	1 135,5	95,3	1 040,3	14 751,1	7,1
R1234ze	116,6	58,6	62,8	4,8	61,0	246,9	34,8	232,7	30,0	64,9	30,4	65,4	58,0	105,8	243,3	81,3	927,8	60,4	867,5	14 751,1	5,9
R236fa	116,7	58,7	62,9	4,9	61,0	401,4	39,6	388,9	30,0	237,3	30,2	237,6	58,0	274,2	398,4	90,0	904,0	36,0	868,0	14 751,1	5,9
Izobutan	116,8	62,8	59,0	5,0	57,0	632,1	36,9	607,3	30,0	271,2	30,2	271,9	54,0	332,6	626,0	41,0	813,8	35,5	778,3	14 751,1	5,3
MM	116,7	62,7	59,4	5,4	57,0	126,8	45,1	109,3	30,0	–141,1	30,0	–141,0	54,0	–94,3	122,1	55,1	770,2	1,4	768,6	14 751,1	5,2
Metanol	115,6	71,4	49,2	4,9	60,0	1 123,0	30,0	1 068,4	30,0	–92,8	30,0	–92,8	44,2	–55,6	1 082,3	12,2	530,0	0,4	529,5	14 751,1	3,6

Rodzaj zastosowanego czynnika roboczego znacząco wpływa na wielkość mocy elektrowni, przy czym należy rozpatrywać zespół cech i właściwości czynnika roboczego zarówno termodynamicznych jak i eksploatacyjnych. Trudno jest określić, w jakim stopniu rodzaj czynnika pod kątem jego kształtu krzywych nasycenia (suchy, mokry) wpływa na efektywność pracy siłowni, gdyż tylko jeden z rozpatrywanych czynników zalicza się do grupy mokrych (metanol), natomiast zauważalny jest wpływ temperatury krytycznej czynnika. Dla czynników o niższych wartościach temperatury krytycznej zazwyczaj osiągano lepszą efektywność pracy elektrowni geotermalnej.

7.2.4.3. Wyniki obliczeń wskaźników energetycznych

W tabeli 7.2.4.4 przedstawiono wartości maksymalnego strumienia ciepła i maksymalnych ilości ciepła możliwych do pozyskania w ciągu roku z ujęcia geotermalnego w strefie Koła. Zestawienia dokonano przy założeniu, że system wykorzystania energii geotermalnej jest w stanie schłodzić wodę geotermalną do temperatury T_{g2T} = 30°C. Jest to jednoznaczne z tym, że temperatura wody termalnej zatłaczanej do górotworu T_{g2} = 30°C.

W obliczeniach tych, zgodnie z początkowym założeniem upraszczającym (por. rozdział 6.2), pominięto wielkość strat cieplnych związanych z przesyłem.

Tabela 7.2.4.4. Wartości maksymalnych strumieni ciepła i ilości ciepła możliwego do pozyskania w ciągu roku z ujęcia geotermalnego w strefie Koło

Table 7.2.4.4. Values of maximum heat fluxes and heat capacities available to be obtained annually from the geothermal source in Koło area

Lokalizacja	Parametry ujęcia geotermalnego					Ilość ciepła		
	$\dot{V}_g$	T_{g1}	ρ	$c_{p,g}$	$\dot{Q}_{g\,max}$	$Q_{g\,max}$	$Q_{g\,max}$	$Q_{g\,max}$
	m^3/h	°C	kg/m^3	kJ/(kg K)	kW	TJ	kWh	GWh
Koło	200	118	1 075,7	3,48	1 8301	577	160 316 760	160

Na podstawie przeprowadzonej ankietyzacji ustalono, że roczna rzeczywista produkcja ciepła w strefie Koła wynosi 300 TJ.

Niezbędnym parametrem do określenia wskaźników energetycznych instalacji geotermalnej jest całkowita produkcja ciepła w ciągu roku. W celu określenia zdefiniowanych wcześniej (por. rozdział 6.2.) wskaźników w obliczeniach przyjęto, że przekazywanie energii cieplnej z wody termalnej do wody sieciowej odbywa się z 10% stratami ciepła w wymienniku geotermalnym. Zatem sprawność wykorzystania pozyskanej energii geotermalnej w wymienniku ciepłowniczym wynosi 90%.

W pierwszej kolejności rozważono teoretyczny układ ciepłowni geotermalnej zakładając, że ciepłownia ta w ciągu całego roku wykorzystuje maksymalny strumień wody termalnej (stały, maksymalny strumień energii geotermalnej). W analizie uwzględniono następujące przypadki:

- pierwszy, kiedy w ciepłowni istnieje możliwość schłodzenia wody termalnej do temperatury granicznej wynoszącej $T_{g2} = T_{g2T}$ = 30°C,
- drugi, kiedy w ciepłowni istnieje możliwość schłodzenia wody termalnej do temperatury wynoszącej T_{g2} = 40°C (przypadek współpracy sieci ciepłowniczej z odbiornikami średnio- i niskotemperaturowymi lub podgrzew ciepłej wody użytkowej),
- trzeci, kiedy w ciepłowni istnieje możliwość schłodzenia wody termalnej do temperatury wynoszącej T_{g2} = 75°C (przypadek, kiedy temperatura powrotna z systemu grzewczego wynosi 70°C).

Wartości wskaźników dla potencjalnej ciepłowni w strefie Koła, dla trzech powyższych przypadków zestawiono w tabeli 7.2.4.5.

Tabela 7.2.4.5. Wartości wskaźników dla ciepłowni w strefie Koła, zgodnie z przyjętymi założeniami upraszczającymi

Table 7.2.4.5. Index values for the heating plants in Koło area, according to the accepted simplification assumptions

Lokalizacja	$\dot{V}_g$	T_{g1}	T_{g2}	Q_{CO}	$Q_{g\,max}$	Q_g	$Q_{CO\,g}$	E_g	Z_g	ξ_g
	m^3/h	°C	°C	TJ	TJ	TJ	TJ	–	–	–
Koło	200	118	30	300	577	577	519	**1,000**	**1,730**	**0,520**
			40			512	461	**0,887**	**1,537**	**0,520**
			75			282	254	**0,489**	**0,847**	**0,440**

W powyższej tabeli na szaro zaznaczono te wartości wskaźników, które po wyliczeniu zgodnie ze wzorami (E_g), (Z_g), (g) (por. rozdział 6.2) dają niemiarodajne wyniki. Spowodowane jest to tym, że w analizowanym przypadku ilość energii geotermalnej możliwej do pozyskania w ciągu roku jest większa od rzeczywistej produkcji energii cieplnej (zatem mamy do czynienia z nadwyżką energii geotermalnej). W takim przypadku ilość wykorzystanej energii geotermalnej w systemie ciepłowniczym jest równa rzeczywistej ilości wyprodukowanego ciepła. Po uwzględnieniu tego faktu wartości współczynników energetycznych dla analizowanej miejscowości zestawiono w tabeli 7.2.4.6.

Tabela 7.2.4.6. Skorygowane wartości wskaźników dla ciepłowni zlokalizowanej w miejscowości Koło, zgodnie z przyjętymi założeniami upraszczającymi

Table 7.2.4.6. Corrected index values for the heating plant located in Koło, according to the accepted simplification assumptions

Lokalizacja	$\dot{V}_g$	T_{g1}	T_{g2}	Q_{CO}	$Q_{g\,max}$	Q_g	$Q_{CO\,g}$	E_g	Z_g	ξ_g
	m^3/h	°C	°C	TJ	TJ	TJ	TJ	–	–	–
Koło	200	118	30	300	577	333	300	0,577	1,000	0,520
			40			333	300	0,577	1,000	0,520
			75			282	254	0,489	0,847	0,440

W tabelach 7.2.4.7–7.2.4.9 przedstawiono wyniki oceny wskaźników energetycznych dla elektrociepłowni, przy założeniu dla trzech wariantów: A, B i C. Dla wszystkich wariantów elektrociepłowni przyjęto, podobnie jak dla ciepłowni, że w ciągu całego roku wykorzystywany jest stały strumień energii geotermalnej zarówno na cele produkcji elektrycznej jak i produkcji ciepła. W przypadku określania wskaźników energetycznych dla elektrociepłowni przyjęto dwie wartości temperatury wody termalnej opuszczającej wymiennik ciepłowniczy tj.: 75°C oraz 40°C.

Tabela 7.2.4.7. Wartości wskaźników energetycznych dla wariantu A – lokalizacja w miejscowości KOŁO (na podstawie tabeli 7.2.4.1)

Table 7.2.4.7. Energy index values for the option A – KOŁO location (based on Table 7.2.4.1)

Lokalizacja – KOŁO: T_{g1} = 118°C, $\dot{V}_g$ = 200 m^3/h, Q_{CO} = 300 000 GJ, wariant A															
Układ ORC						Q_g		$Q_{CO\,g}$		Wskaźniki energetyczne					
										E_g		Z_g		ξ_g	
Czynnik	T_{g2}	N_{ORC}	Q_d	η_{ORC}	E_{el}	40	75	40	75	40	75	40	75	40	75
–	°C	kW	kW	%	TJ	TJ	TJ	TJ	TJ	–	–	–	–	–	–
R227ea	55,3	1095	13 027,9	8,4	26,3	512	411	90	0	0,901	0,724	0,356	0,044	0,205	0,046
R1234ze	59,8	1 025,4	12 084,3	8,5	24,6	512	382	117	0	0,901	0,673	0,436	0,042	0,249	0,043
R236fa	58,9	1 014,1	12 271,4	8,3	24,3	512	388	112	0	0,901	0,683	0,420	0,041	0,240	0,043
Izobutan	62,4	979,3	11 548,2	8,5	23,5	512	365	132	0	0,901	0,643	0,481	0,040	0,274	0,041
MM	61,1	950,2	11 830,6	8	22,8	512	373	125	0	0,901	0,657	0,458	0,039	0,260	0,040
Metanol	66,6	894,8	10 673,3	8,4	21,5	512	337	157	0	0,901	0,593	0,555	0,036	0,314	0,038

Tabela 7.2.4.8. Wartości wskaźników energetycznych dla wariantu B – lokalizacja w miejscowości KOŁO (na podstawie tabeli 7.2.4.2)

Table 7.2.4.8. Energy index values for the option B – KOŁO location (based on Table 7.2.4.2)

Lokalizacja – KOŁO: T_{g1} = 118°C, $\dot{V}_g$ = 200 m^3/h, Q_{CO} = 300 000 GJ, T_{g2} = 60°C , wariant B															
Układ ORC						Q_g		$Q_{CO\,g}$		Wskaźniki energetyczne					
										E_g		Z_g		ξ_g	
Czynnik	T_{g2}	N_{ORC}	Q_d	η_{ORC}	E_{el}	40	75	40	75	40	75	40	75	40	75
–	°C	kW	kW	%	TJ	TJ	TJ	TJ	TJ	–	–	–	–	–	–
R227ea	60	1 079,9	12 050,2	9,0	25,9	512	380	118	0	0,900	0,669	0,442	0,044	0,253	0,046
R1234ze	60	1 022,6	12 050,2	8,5	24,5	512	380	118	0	0,900	0,669	0,439	0,041	0,251	0,043
R236fa	60	988,1	12 050,2	8,2	23,7	512	380	118	0	0,900	0,669	0,438	0,040	0,249	0,042
izobutan	60	988,1	12 050,2	8,2	23,7	512	380	118	0	0,900	0,669	0,438	0,040	0,249	0,042
MM	60	935,1	12 050,2	7,8	22,4	512	380	118	0	0,900	0,669	0,436	0,038	0,247	0,039
metanol	60	832,7	12 050,2	6,9	20,0	512	380	118	0	0,900	0,669	0,431	0,034	0,243	0,035

Tabela 7.2.4.9. Wartości wskaźników energetycznych dla wariantu C – lokalizacja w miejscowości KOŁO (na podstawie tabeli 7.2.4.3)

Table 7.2.4.9. Energy index values for the option C – KOŁO location (based on Table 7.2.4.3)

Lokalizacja – KOŁO: T_{g1} = 118°C, $\dot{V}_g$ = 200 m^3/h, Q_{CO} = 300 000 GJ, T_{g2} = 47°C, wariant C															
Układ ORC						Q_g		$Q_{CO\,g}$		Wskaźniki energetyczne					
										E_g		Z_g		ξ_g	
Czynnik	T_{g2}	N_{ORC}	Q_d	η_{ORC}	E_{el}	40	75	40	75	40	75	40	75	40	75
–	°C	kW	kW	%	TJ	TJ	TJ	TJ	TJ	–	–	–	–	–	–
R227ea	47	1040,3	14 751,1	7,1	24,9	512	466	41	0	0,900	0,819	0,204	0,042	0,117	0,044
R1234ze	47	867,5	14 751,1	5,9	20,8	512	466	41	0	0,900	0,819	0,194	0,035	0,109	0,037
R236fa	47	868	14 751,1	5,9	20,8	512	466	41	0	0,900	0,819	0,194	0,035	0,109	0,037
Izobutan	47	778,3	14 751,1	5,3	18,7	512	466	41	0	0,900	0,819	0,188	0,032	0,106	0,033
MM	47	768,6	14 751,1	5,2	18,4	512	466	41	0	0,900	0,819	0,188	0,031	0,105	0,032
Metanol	47	529,5	14 751,1	3,6	12,7	512	466	41	0	0,900	0,819	0,173	0,022	0,095	0,022

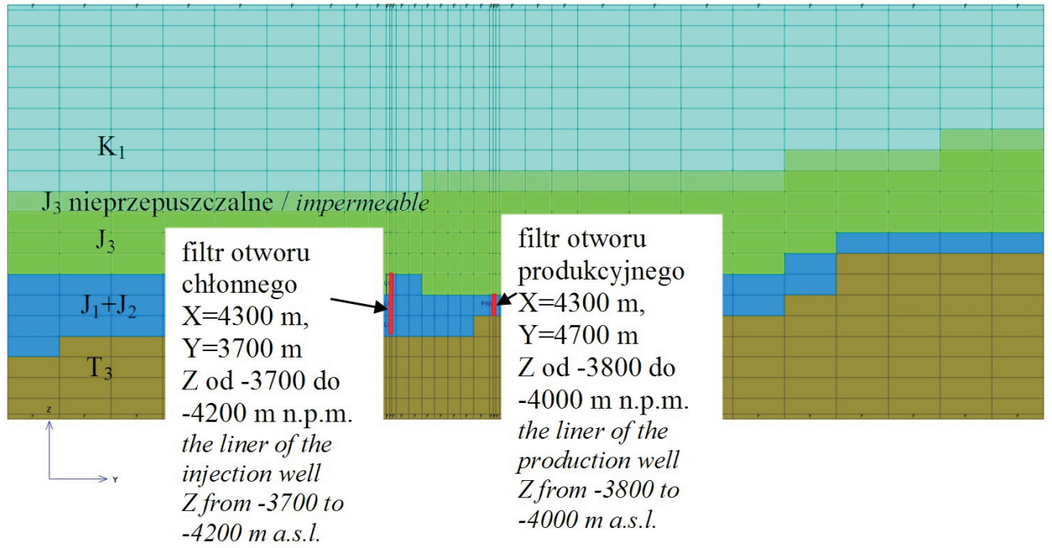
7.2.5. Model numeryczny pracy dubletu geotermalnego

Modelowanie numeryczne pracy dubletu geotermalnego wykonano w celu oceny zmian temperatury eksploatowanej wody termalnej oraz prognozy zmian ciśnienia eksploatacyjnego wymaganego dla zatłaczania wody schłodzonej w 50-letnim cyklu pracy systemu binarnego. Model eksploatacji energii jest kontynuacją modelu stanu stacjonarnego, tj. bazuje na uzyskanym rozkładzie temperatury i ciśnienia w warunkach przedeksploatacyjnych. Przebieg oraz parametry wydzielonych w obrębie modelu struktur geologicznych, jak również przyjęte warunki brzegowe pozostają niezmienne. Dokonano natomiast znacznego zagęszczenia siatki obliczeniowej w obrębie planowanych otworów, zwiększając liczbę komórek obliczeniowych do 20 944.

W modelowaniu procesów termodynamicznych założono, że płyny wypełniające szczeliny są wodą niezmineralizowaną, co stanowi uproszczenie modelu numerycznego. Wyniki rozpoznania hydrogeologicznego jednoznacznie stwierdzają występowanie solanek o mineralizacji około 175 g/dm^3. Powyższe założenie powoduje pewne błędy obliczeniowe związane głównie z procesem przepływu płynu przez złoże (oceną oporów przepływu i entalpii). Zróżnicowanie parametrów cieplnych wody i solanki ulega jednak pewnej kompensacji. Wartości strumienia energii niesionego przez strumień solanki i strumień wody są zbliżone, gdyż w formule określania strumienia energii występuje iloczyn: strumienia objętości, ciepła właściwego i gęstości [m^3/s · J/(kg · K) · kg/m^3 = W/K]. O ile gęstość solanki rośnie, to jej ciepło właściwe maleje ze wzrostem mineralizacji, w przypadku wody ciepło właściwe ma wartość wyższą od ciepła właściwego solanki, lecz gęstość wody jest mniejsza od gęstości solanki. Próby ilościowej oceny błędów wynikających z powyższego założenia dokonano w artykule (Miecznik 2013).

Na rysunku 7.2.5.1 przedstawiono schemat dyskretyzacji modelowanej przestrzeni na przekroju przechodzącym przez płaszczyznę przecinającą dublet otworów eksploatowanych. Otwór produkcyjny miał współrzędne według lokalnego układu współrzędnych X = 4300 m, Y = 4700 m i Z od –3800 do –4000 m n.p.m., natomiast otwór chłonny został umiejscowiony w odległości 1000 m od otworu produkcyjnego (X = 4300 m, Y = 3700). Interwał czynny otworu chłonnego wynosi 500 m (Z od –3700 do –4200 m n.p.m.).

Na załączniku 7.2.3 – rys. 2 przedstawiono rozkład temperatury na przekroju AA' przechodzącym przez otwór produkcyjny (X = 4300 m) w stanie stacjonarnym. Rozkład ten – wobec przyjętych warunków brzegowych oraz parametrów struktur geologicznych – charakteryzuje się praktycznie stałym gradientem oraz brakiem zróżnicowania wzdłuż przekroju, względem głębokości odniesienia. Model eksploatacji złoża został zasymulowany dla wydajności dubletu równej 200 m^3/h. Z wykresów zaprezentowanych na załączniku 7.2.3 – rys. 3 wynika, że przy słuszności założeń poczynionych przy opracowaniu modelu numerycznego, po 50 latach eksploatacji dubletu nie powinien być zauważalny spadek temperatury na filtrze otworu produkcyjnego (nie ma przebicia frontu chłodnego). Różnica ciśnienia między otworem produkcyjnym i chłonnym oszacowana została na 2,9 MPa. Przy wydajności 200 m^3/h potrzebna będzie zatem moc napędowa pomp obiegowych systemu geotermalnego na poziomie 200 kW. Na rysunku 4, zał. 7.2.3 przedstawiono zmiany temperatury i ciśnienia wzdłuż profilu łączącego filtry otworów produkcyjnego i chłonnego na głębokości –3900 m n.p.m. Na wykresie tym widoczny jest zasięg zmian termicznych spowodowanych eksploatacją wód termalnych. Analiza wykresu potwierdza wyciągnięte wcześniej wnioski dotyczące bezpieczeństwa pracy systemu.



Rys. 7.2.5.1. Schemat dyskretyzacji modelowanej przestrzeni na przekroju przechodzącym przez otwory planowanego dubletu otworów geotermalnych (X = 4300 m). Widok 2D pokazujący przebieg utworów geologicznych i otworów w lokalnym, kartezjańskim układzie współrzędnych X, Y, Z

Fig. 7.2.5.1. Diagram of the discretization of the modelled space at the cross-section through the wells of the planned geothermal doublets (X = 4300 m). 2D view presenting the location of the geological structures and holes in the local Cartesian coordinate system X, Y, Z

7.2.6. Prognoza efektów finansowych, energetycznych, ekologicznych i społecznych

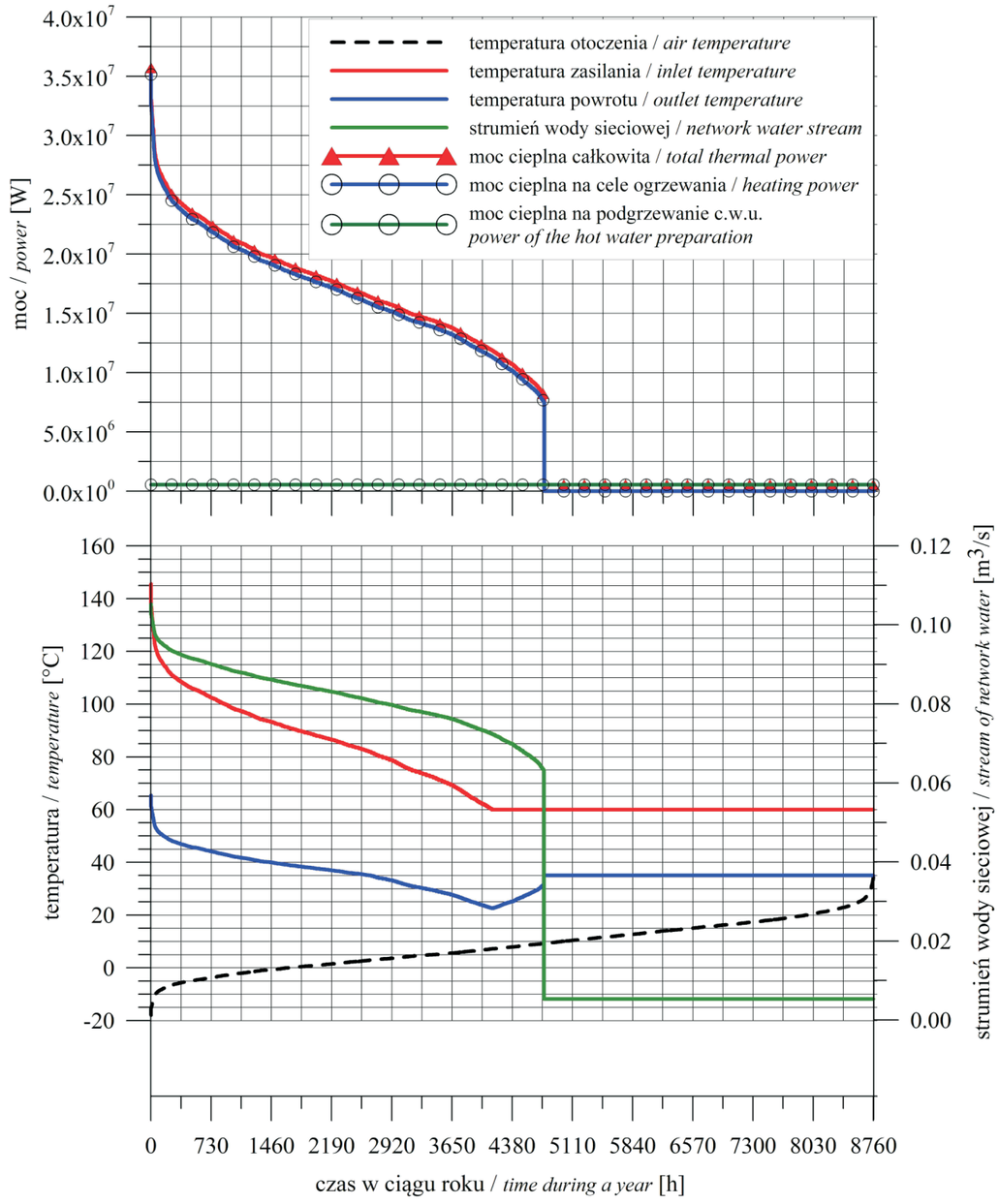
Potrzeby związane z gospodarką komunalną w rejonie miasta Koło zabezpieczane są przez Miejski Zakład Energetyki Cieplnej Sp. z o.o. Szerzej infrastrukturę energetyczną opisano w rozdziale 7.2.1. Założono (na podstawie rozdziału 7.2.1), że całkowite zapotrzebowanie na moc grzewczą (centralne ogrzewanie i przygotowanie ciepłej wody użytkowej) wynosi 37 MWth, a sieć dystrybucji energii jest zaprojektowana dla parametrów 150/70°C. Parametry ujęcia geotermalnego pozwalają osiągnąć maksymalną moc przyłączeniową rzędu 17 MWth. Parametry techniczne odbiorcy, źródła energii i sieci dystrybucyjnej zestawiono w tabeli 7.2.6.1, charakterystyka odbiorcy zaprezentowana jest na rysunku 7.2.6.1, a schemat zaspokojenia zapotrzebowania na moc chwilową przedstawiono na rysunku 7.2.6.2. Całkowita moc netto siłowni binarnej wykorzystującej ujęcie geotermalne do generacji energii elektrycznej oszacowana została na 850 kW (rys. 7.2.6.2), przy mocy elektrycznej zainstalowanej około 1047 kW (tab. 7.2.6.1).

Ze względu na wysoką prognozowaną temperaturę płynu geotermalnego na głowicy otworu (ok. 118°C – tab. 7.2.6.1) moc ujęcia geotermalnego wykazuje wyrównaną jego pracę w czasie (rys. 7.2.6.2) przy dużej ilości energii wytwarzanej z geotermii. Pozwala to skompensować znaczące nakłady inwestycyjne związane z uruchomieniem ujęcia energii geotermalnej (ok. 104 mln zł – tab. 7.2.6.2). Niewątpliwie uzyskaniu pozytywnego wyniku finansowemu sprzyja możliwość wykorzystania istniejącej infrastruktury dystrybucji energii cieplnej. Ostatecznie cena netto sprzedaży

Tabela 7.2.6.1. Parametry techniczne dla instalacji źródła energii dla lokalizacji Koło

Table 7.2.6.1. Technical parameters for the heat source installation in Koło location

Parametr	Wartość
Lokalizacja	Koło
Głębokość otworu produkcyjnego [m]:	4000
Średnica otworu produkcyjnego [m]:	0,244475
Stan otworu produkcyjnego:	nowy
Strumień nominalny (maksymalny) wody termalnej [m^3/h]:	200
Temperatura wody w warstwie wodonośnej [°C]:	120
Poziom zwierciadła statycznego w otworze produkcyjnym [m p.p.t.]:	100
Ciśnienie depresji [MPa]:	1,4
Głębokość otworu chłonnego [m]:	4200
Stan otworu chłonnego:	nowy
Poziom zwierciadła statycznego w otworze chłonnym [m p.p.t.]:	100
Ciśnienie represji [MPa]:	1,5
Projektowana temperatura schłodzenia wody termalnej w siłowni binarnej [°C]:	55,3
Projektowana temperatura wody termalnej na głowicy otworu produkcyjnego [°C]:	117,57
Temperatura minimalna (projektowa) powietrza zewnętrznego [°C]:	-18
Temperatura projektowa zasilania instalacji odbiorcy [°C]:	145,55
Temperatura projektowa powrotu z instalacji odbiorcy [°C]:	65,45
Nominalny (maksymalny) strumień czynnika dla instalacji odbiorcy [m^3/h]:	378,9
Moc cieplna całkowita odbiorcy [kW]:	35704,4
Moc cieplna centralnego ogrzewania dla odbiorcy [kW]:	35150
Moc cieplna przygotowania ciepłej wody użytkowej dla odbiorcy [kW]:	554,4
Całkowite zapotrzebowanie na energię cieplną odbiorcy [GJ/rok]:	296033,4
Całkowita moc cieplna zainstalowana w źródle energii (uwzględnia straty mocy na przesyle) [kW]:	45300,6
Całkowita ilość energii cieplnej wytworzonej przez źródło energii (uwzględnia straty na przesyle) [GJ/rok]:	369922,6
Całkowita moc cieplna zainstalowana w części geotermalnej [kW]:	16973,3
Całkowita ilość energii cieplnej wytworzonej z geotermii (uwzględnia straty na przesyle) [GJ/rok]:	305178,8
Całkowita moc cieplna zainstalowana w ciepłowni szczytowej [kW]:	28327,2
Całkowita ilość energii cieplnej wytworzonej przez kotłownię szczytową(uwzględnia straty na przesyle) [GJ/rok]:	64743,8
Całkowita moc elektryczna zainstalowana w geotermalnej siłowni binarnej [kW]:	1047,2
Całkowita ilość energii elektrycznej wytworzonej przez siłownię binarną brutto (uwzględnia potrzeby całej własne instalacji) [MWh/rok]:	4369,3
Ilość energii elektrycznej wytworzonej przez siłownię binarną netto (po odjęciu potrzeb własnych instalacji = energia sprzedana) [MWh/rok]:	3157,6
Długość całkowita rurociągu z wodą termalną (od głowic otworów do ciepłowni) [m]:	200
Średnica nominalna rury przewodowej dla rurociągu z wodą termalną (od głowic otworów do ciepłowni) [m]:	0,24279
Stan rurociągu z wodą termalną:	nowy
Długość całkowita rurociągu od ciepłowni geotermalnej do ciepłowni szczytowej [m]:	500
Średnica nominalna rury przewodowej dla rurociągu od ciepłowni geotermalnej do ciepłowni szczytowej [m]:	0,33418
Stan rurociągu od ciepłowni geotermalnej do ciepłowni szczytowej:	nowy
Długość całkowita rurociągu od ciepłowni szczytowej do odbiorcy energii cieplnej [m]:	16600
Średnica nominalna rury przewodowej dla rurociągu od ciepłowni szczytowej do odbiorcy energii [m]:	0,33418
Stan rurociągu od ciepłowni szczytowej do odbiorcy:	istnieje
Maksymalne opory przepływu na rurociągach ciepłowniczych przesyłowych (z wyłączeniem rurociągu z wodą termalną) [MPa]:	0,9297
Maksymalne opory przepływu na rurociągu zwodą termalną [MPa]:	0,0174
Maksymalne ciśnienie do pokonania przez pompy geotermalne (ciśnienie represji minus ciśnienie depresji) [MPa]:	2,9
Średnie roczne straty energii cieplnej na przesyle [ułamek energii cieplnej wytworzonej w źródle energii]:	0,20

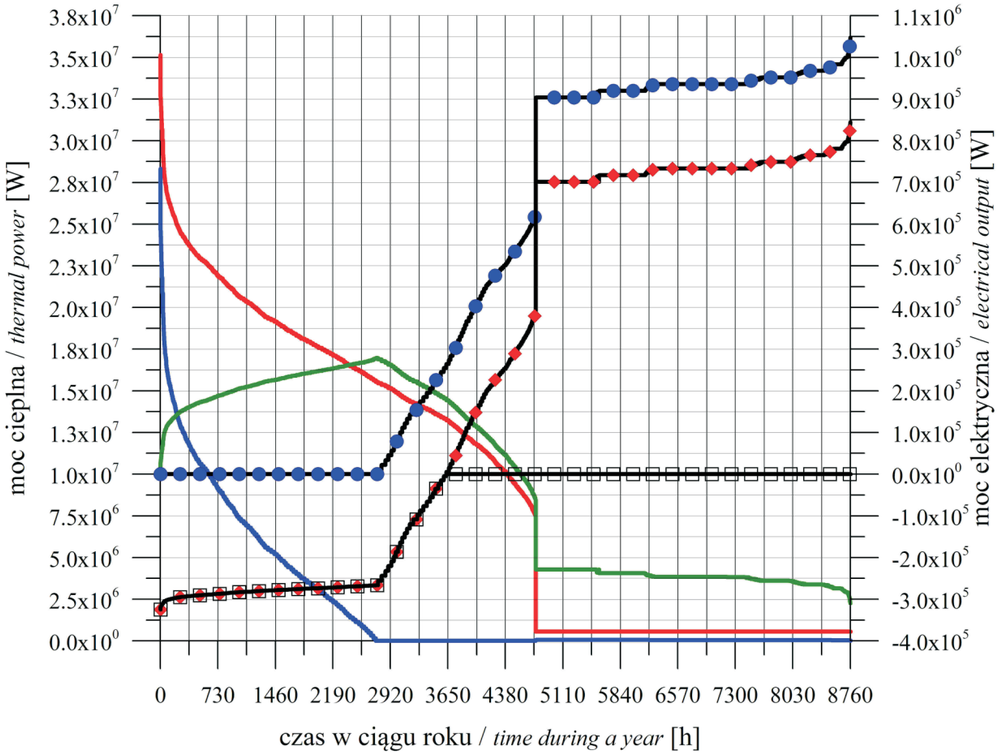


Rys. 7.2.6.1. Charakterystyka odbiorcy energii dla lokalizacji Koło

Fig. 7.2.6.1. Energy end-user characteristic for Koło location

energii cieplnej gwarantująca osiągnięcie pozytywnego efektu ekonomicznego została określona na poziomie 31,5 zł/GJ i uznać można ją za atrakcyjną w kontekście wartości charakterystycznych dla innych źródeł energii (Pająk, Bujakowski 2013a).

Prognozowane efekty ekologiczne w postaci redukcji emisji zanieczyszczeń zestawiono w tabeli 7.2.6.3.



Rys. 7.2.6.2. Moc cieplna i elektryczna wytwarzana przez źródło energii dla lokalizacji Koło

Fig. 7.2.6.2. Heat and electric power generated by the energy source in Koło location

Efekty społeczne wykorzystania wód termalnych w rejonie Koła wiązać się będą z powstaniem nowych miejsc pracy, w liczbie około 20, w rejonie uruchomienia inwestycji. Biorąc pod uwagę możliwość budowy na bazie analizowanych wód również obiektów balneo-rekreacyjnych, liczba miejsc pracy wzrosłaby znacząco. Miejsca, w których uruchomiono dotychczas instalacje geotermalne wykorzystujące te wody w celach balneo-rekreacyjnych, świadczą o dużym zainteresowaniu klientów tego typu usługami. Takie przedsięwzięcia stymulują lokalny rynek usług i znacząco wpływają na wzrost atrakcyjności turystycznej. Zyskuje na tym branża gastronomiczna, hotelarska, rozwija się rynek różnorodnych usług.

Tabela 7.2.6.2. Zestawienie parametrów ekonomicznych dla instalacji powierzchniowego źródła energii dla lokalizacji Koło

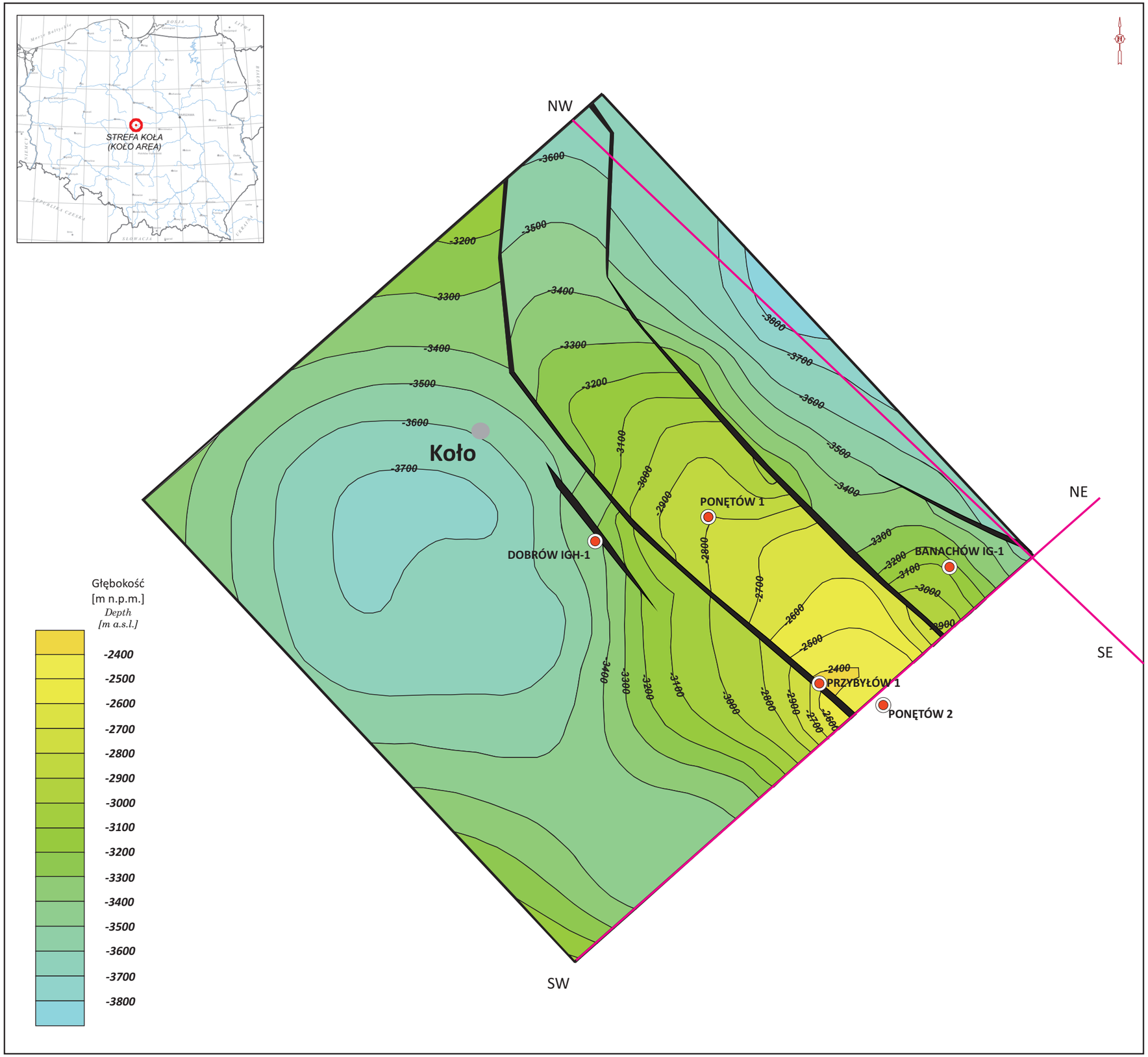
Table 7.2.6.2. List of the economic parameters for the surface energy source installation in Koło location

Parametr	Wartość
Cena netto zakupu energii elektrycznej [zł/kWh]:	0,488
Cena netto sprzedaży energii elektrycznej [zł/kWh]:	0,24
Cena netto zakupu gazu ziemnego wysokometanowego [zł/m^3]:	1,626
Cena netto sprzedaży energii cieplnej gwarantująca finansową rentowność inwestycji [zł/GJ]:	31,5
Całkowite prognozowane nakłady inwestycyjne (główne komponenty zestawiono poniżej) [tys. zł]:	104008
Nakłady inwestycyjne na otwór produkcyjny [tys. zł]:	35013
Nakłady inwestycyjne na otwór chłonny [tys zł]:	37364
Nakłady inwestycyjne na siłownię binarną [tys zł]:	8252
Nakłady inwestycyjne na szczytowe kotły gazowe [tys. zł]:	9915
Nakłady inwestycyjne na pompy geotermalne (głębinowa i stacja pomp zatłaczania) [tys zł]:	1151
Nakłady inwestycyjne na pompy obiegowe [tys zł]:	249
Nakłady inwestycyjne na wymienniki ciepła [tys zł]:	2703
Nakłady inwestycyjne na rurociągi połączeniowe [tys zł]:	1689
Nakłady inwestycyjne na budynek ciepłowni geotermalnej i szczytowej [tys. zł]:	4505
Całkowite koszty obsługi instalacji (główne składniki kosztów zestawiono poniżej) [tys zł/rok]:	10082
Amortyzacja środków trwałych [tys. zł/rok]:	5267
Koszty obsługi, remontów, konserwacji [tys. zł/rok]:	1040
Koszty zakupu nośników energii [tys. zł/rok]:	3775
Przychody z tytułu sprzedaży energii (szczegółowo zestawiono poniżej) [tys zł/rok]:	10082
Przychody z tytułu sprzedaży energii cieplnej [tys zł/rok]:	9324
Przychody z tytułu sprzedaży energii elektrycznej [tys. zł/rok]:	758

Tabela 7.2.6.3. Zestawienie parametrów ekologicznych dla instalacji powierzchniowego źródła energii dla lokalizacji Koło

Table 7.2.6.3. List of the ecological parameters for the surface energy source installation in Koło location

Parametr	Wartość
Roczna emisja B(a)P dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0
Roczna emisja sadzy dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0,016
Roczna emisja pyłu dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0,338
Roczna emisja CO_2 dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	23299,102
Roczna emisja CO dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	6,178
Roczna emisja NO_x w przeliczeniu na NO_2 dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	16,115
Roczna emisja SO_2 dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	5,737
Roczna emisja węglowodorów alifatycznych dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	2,163
Roczna emisja w. węglowodorów aromatycznych dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0,475
Roczne ograniczenie emisji B(a)P [Mg/rok]:	0,37
Roczne ograniczenie emisji sadzy [Mg/rok]:	190,181
Roczne ograniczenie emisji pyłu [Mg/rok]:	761,798
Roczne ograniczenie emisji CO_2 [Mg/rok]:	19113,096
Roczne ograniczenie emisji CO [Mg/rok]:	2115,073
Roczne ograniczenie emisji NO_x w przeliczeniu na NO_2 [Mg/rok]:	10,984
Roczne ograniczenie emisja SO_2 [Mg/rok]:	285,115
Roczne ograniczenie emisji węglowodorów alifatycznych [Mg/rok]:	107,386
Roczne ograniczenie emisji wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych [Mg/rok]:	105,698



Zał. 7.2.1

MAPA STROPU UTWORÓW DOLNEJ JURY W STREFIE KOŁA*

Encl. 7.2.1

MAP OF THE TOP OF THE LOWER JURASSIC IN THE KOŁO AREA

*na podstawie: Czerwińska i inni, 2013
(based on: Czerwińska et al., 2013)

LEGENDA:
LEGEND:

Główne miasto
Main city

Otwory
Boreholes

Uskoki
Faults

Linie przekrojów geologicznych wg danych sejsmicznych (Zał. 7.2.2)
Cross-section lines according to seismic data (Encl. 7.2.2)

-3300 Izohipsy stropu utworów jury dolnej [m n.p.m.]
Isohypses of the top of Lower Jurassic formation [m a.s.l.]

0 2 4 km

WYKONANO NA ZAMÓWIENIE MINISTRA ŚRODOWISKA ZA ŚRODKI FINANSOWE WYPŁACONE PRZEZ NARODOWY FUNDUSZ OCHRONY ŚRODOWISKA I GOSPODARKI WODNEJ

PRZEKROJE GEOLOGICZNE PRZEZ STREFĘ KOŁA
(przebieg na zał. 7.2.1)*

GEOLOGICAL CROSS-SECTIONS THROUGH THE KOŁO AREA
(line at encl. 7.2.1)

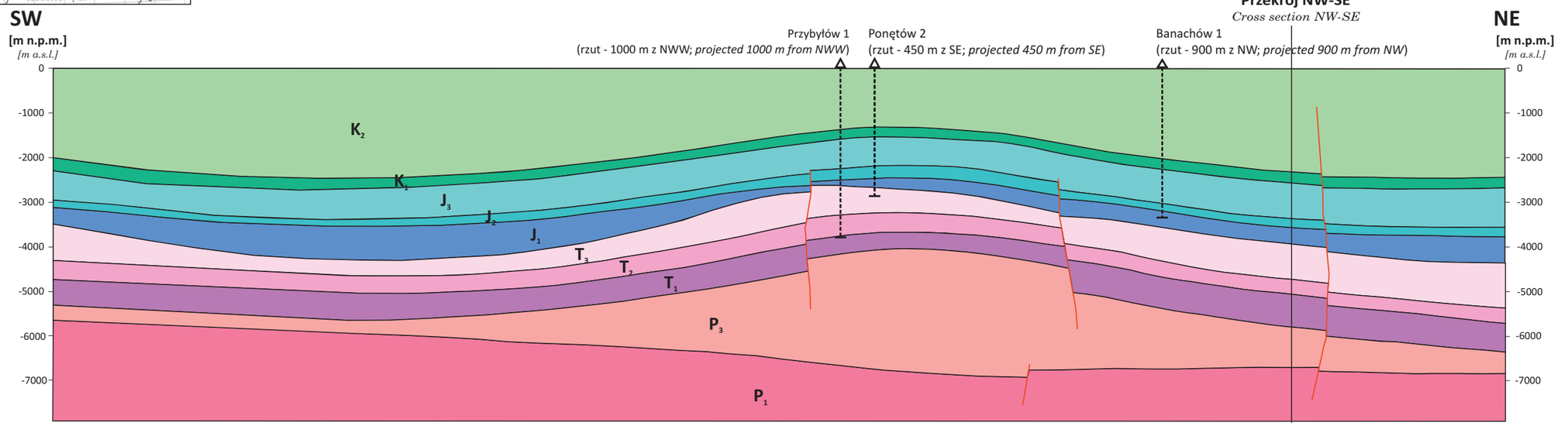
Zał. 7.2.2
Encl. 7.2.2



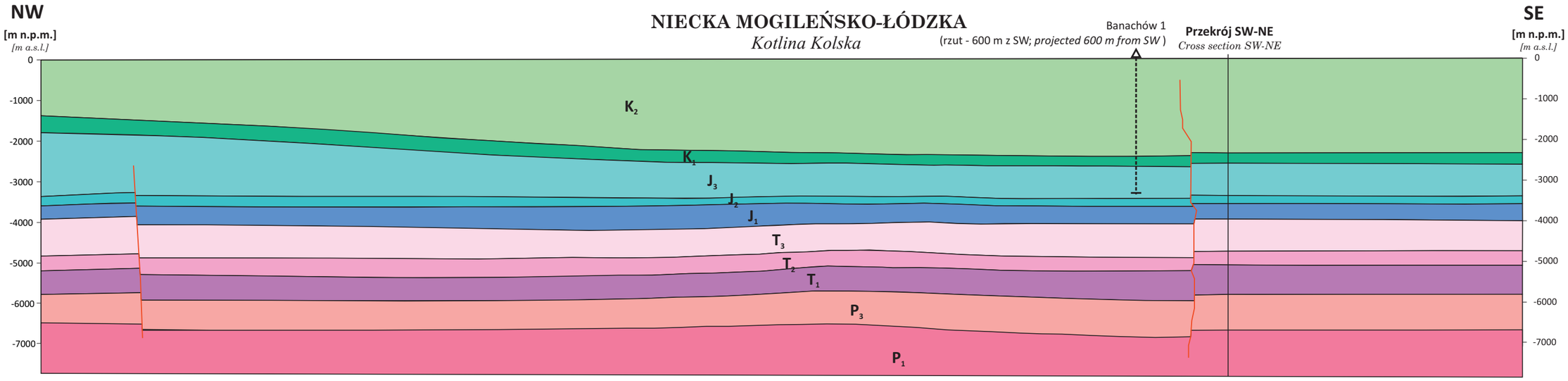
NIECKA MOGILEŃSKO-ŁÓDZKA

Kotlina Kolska — *Słup solny Ponętowa* — *Kotlina Kolska*

Przekrój NW-SE
Cross section NW-SE



Przekrój SW-NE
Cross section SW-NE



K_2	Kreda górna *Upper Cretaceous*	J_3	Jura górna *Upper Jurassic*	T_3	Trias górny *Upper Triassic*	P_3	Perm górny *Upper Permian*
K_1	Kreda dolna *Lower Cretaceous*	J_2	Jura środkowa *Middle Jurassic*	T_2	Trias środkowy *Middle Triassic*	P_1	Perm dolny *Lower Permian*
		J_1	Jura dolna *Lower Jurassic*	T_1	Trias dolny *Lower Triassic*		

otwory rzutowane *projected boreholes*

uskoki *faults*

0 1 2 km

*na podstawie: Marek i Feldman, 1986; Sas-Korczyński, 1992; Górecki (red.), 2006; Czerwińska i inni, 2013
(based on Marek & Feldman, 1986; Sas-Korczyński, 1992; Górecki (ed.), 2006; Czerwińska et al., 2013)

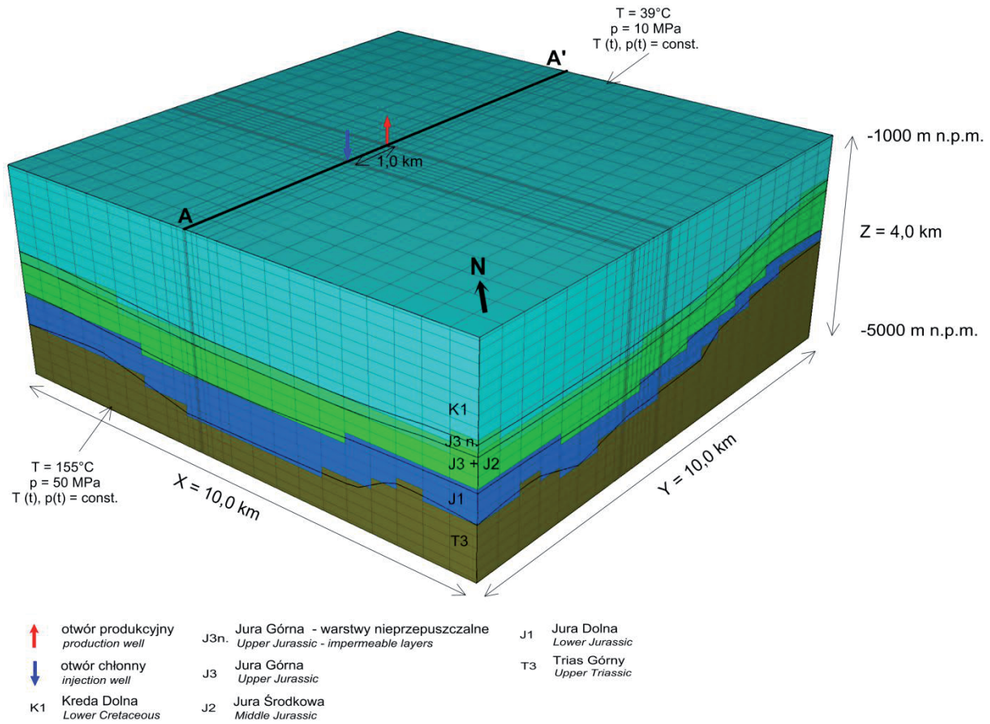
WYKONANO NA ZAMÓWIENIE MINISTRA ŚRODOWISKA ZA ŚRODKI FINANSOWE WYPŁACONE PRZEZ NARODOWY FUNDUSZ OCHRONY ŚRODOWISKA I GOSPODARKI WODNEJ

WYNIKI MODELOWANIA NUMERYCZNEGO W STREFIE KOŁA

Zał. 7.2.3

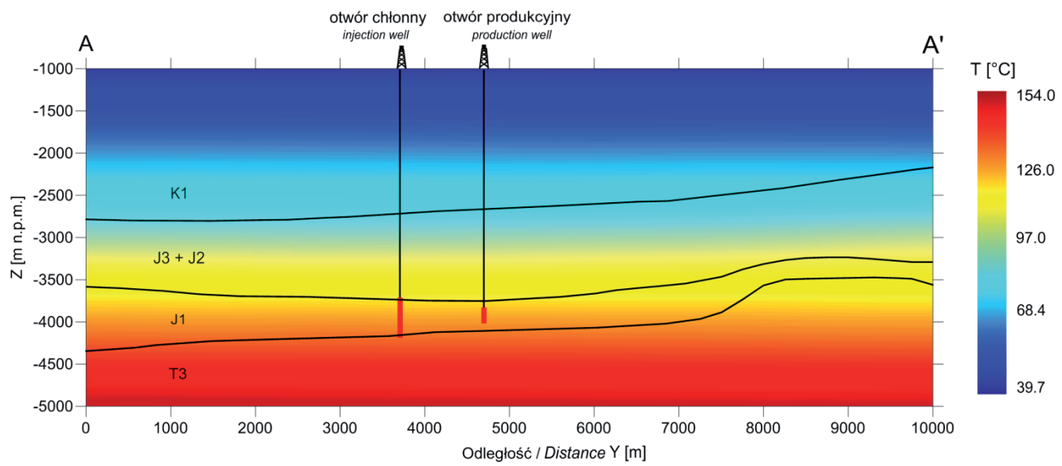
NUMERICAL MODELING RESULTS IN THE KOŁO AREA

Encl. 7.2.3



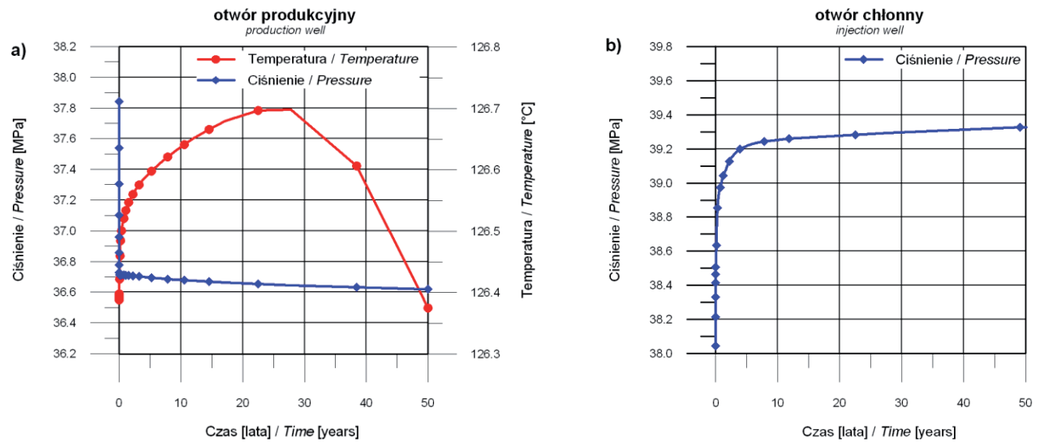
Rys. 1. Model numeryczny strefy Koła

Fig. 1. Numerical model of the Koło area



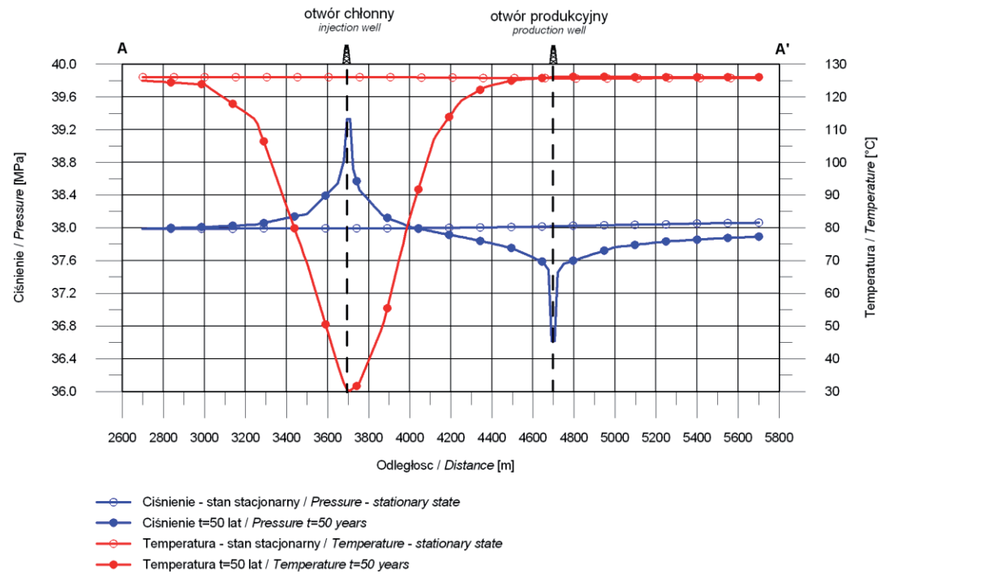
Rys. 2. Prognozowany rozkład temperatury w modelu stanu przedeksploatacyjnego wzdłuż przekroju AA'

Fig. 2. Forecasted temperature distribution prior to exploitation along the AA' cross section



Rys. 3. a) Zmiana temperatury i ciśnienia złożowego w funkcji czasu w otworze produkcyjnym, b) zmiana ciśnienia złożowego w otworze chłonnym na głębokości z = -3900 m n.p.m dla wydajności dubletu Q = 200 m^3/h

Fig. 3. a) Change of the reservoir temperature and pressure versus time in the production well, b) change of the reservoir pressure in the injection well at the depth z = -3900 m a.s.l. for the doublet flow rate Q = 200 m^3/h



Rys. 4. Zmiana temperatury złożowej oraz ciśnienia złożowego wzdłuż fragmentu przekroju AA' na głębokości z = -3900 m n.p.m. dla wydajności dubletu Q = 200 m^3/h

Fig. 4. Cross-sectional change of the reservoir temperature and pressure along part of the AA' cross section at the depth z = -3900 m a.s.l. for the doublet flow rate Q = 200 m^3

7.3. Turek

7.3.1. Ogólna charakterystyka strefy

Miasto Turek zlokalizowane jest w granicach niecki mogileńsko-łódzkiej. Miejscowość usytuowana jest we wschodniej części województwa wielkopolskiego, na Nizinie Wielkopolskiej – w pasie nizin zwanych Krainą Wielkich Dolin. Rzeźba terenu, pomimo niezbyt dużych deniwelacji, jest dość urozmaicona. Na jej ukształtowanie zasadniczy wpływ miały czynniki geomorfologiczne epoki lodowcowej oraz czynniki geologiczne okresów starszych. Rzeźba ta jest charakterystyczna dla krajobrazów staroglacjalnych, związanych ze zlodowaceniem środkowopolskim. Są to formy akumulacji glacjalnej i szczelinowej, typowe dla krajobrazu wysoczyzn morenowych – płaskich, urozmaiconych jedynie skupiskami wydm rozciętych dolinami rzek. Południową część strefy Turka stanowi Wysoczyzna Turecka. Miasto Turek położone jest na wys. 113 m n.p.m. (w zapadlisku w obrębie Wysoczyzny Tureckiej). Natomiast część północno-wschodnia strefy Turka położona jest w dolinie rzeki Warty, stanowiącej wschodnią granicę powiatu (www.powiat.turek.pl). Miasto Turek liczy około 29 tysięcy mieszkańców, a jego powierzchnia wynosi 16,17 km^2.

W Turku krzyżują się drogi o znaczeniu wojewódzkim (nr 470) i międzywojewódzkim (nr 72 i 83), łączące miasto z Koninem (35 km), Sieradzem (54 km), Kaliszem (40 km) i Łodzią (80 km).

Turek jest drugim co do wielkości ośrodkiem przemysłowym Konińskiego Zagłębia Węgla Brunatnego. Obecność złóż węgla brunatnego w pobliżu miasta zadecydowała o powstaniu Zespołu Elektrowni Pątnów-Adamów-Konin, który dostarcza około 8,5% wytwarzanej w Polsce energii elektrycznej. W granicach miasta znajduje się Turecka Strefa Inwestycyjna o pow. 200 ha uzbrojonych terenów aktywizacji gospodarczej.

Konwencjonalna Elektrownia Cieplna Adamów o mocy osiąganej 600 MW, opalana węglem brunatnym wydobywanym przez Kopalnię Węgla Brunatnego Adamów, jest jedną z czterech elektrowni wchodzących w skład Zespołu Elektrowni Pątnów–Adamów–Konin.

Oprócz produkcji energii elektrycznej Elektrownia Adamów dostarcza również ciepło dla części miasta i do zakładów przemysłowych usytuowanych w pobliżu elektrowni. Jest też dostawcą pary technologicznej do Zakładów Przemysłu Jedwabniczego „Miranda" w Turku.

Strefa Turka położona jest w obrębie Środkowowielkopolskiego regionu klimatycznego (Woś 1999). Klimat związany jest tam z ogólną cyrkulacją mas powierza napływającego głównie znad północnego Atlantyku, rzadziej z rejonu basenu Morza Śródziemnego. Na tle innych obszarów, częściej występują tutaj dni z pogodą bardzo ciepłą i zarazem pochmurną. Znaczna jest także liczba dni bardzo chłodnych, z przymrozkiem, w których jednocześnie występuje opad. Według danych IMGW w Kole, w skali makroregionalnej amplitudy temperatur są tutaj nieco mniejsze od przeciętnych w Polsce. Zima jest dość chłodna (średnia dla stycznia wynosi –2,4°C), ale niezbyt długa (ok. 85 dni) i z nietrwałą szatą śnieżną. Lato jest dłuższe (ok. 98 dni) i ciepłe (+18°C w lipcu). Opady średnioroczne wynoszą 500–550 mm, a długość okresu wegetacyjnego trwa niespełna 220 dni w roku. Przeważają wiatry zachodnie (ok. 50% wiatrów w ciągu roku). Wiosną i jesienią wzrasta ilość wiatrów wschodnich. Średnia ważona (bez rozbicia na kierunki wiatrów) wskazuje na prędkości sięgające 4,2 m/s (Plan Rozwoju... 2005).

W pobliżu NE granic strefy Turka znajduje się utworzony w 2004 r. obszar specjalnej ochrony ptaków PLB 300002-Dolina Środkowej Warty, stanowiący element systemu Obszarów Natura 2000.

7.3.2. Koncepcyjny model geologiczny i parametry hydrogeotermalne

Model budowy geologicznej strefy Turka opracowano na podstawie danych archiwalnych i publikowanych, wykorzystując m.in. informacje zawarte w rozdz. 4.2.1. i 5 oraz dokumentacje wynikowe istniejących otworów (Lis-Martyniak 1973; Sas-Korczyński 1992; Pernal 1989; Marek, Feldman 1986; Dembowska, Marek (red.) 1990).

W granicach wytypowanej strefy zlokalizowany jest otwór Turek 1 i Turek 2, lecz poza obszarem perspektywicznym, gdyż spodziewana temperatura wody w obrębie utworów jury dolnej jest tutaj zbyt niska (zał. 7.3.1). Poza wyznaczoną strefą Turka – na drugim skrzydle występującej w tym rejonie nieckowatej struktury dolnojurajskiej – zlokalizowane są także otwory: Koło IG-4 oraz Banachów IG-1 (strefa Koła). Dalej, kilka kilometrów poza omawianą strefą, w obrębie struktury zrębowej Koła sąsiadującej ze strefą Turka od NE oraz w przedłużeniu zrębu Ponętowa ku SE, zlokalizowane są otwory: Ponętów 1 i 2, Przybyłów 1, Koło IG-3.

W 2012 r. omawiany obszar objęto reinterpretacją danych z profilowań sejsmicznych (por. rozdz. 5.5), co w połączeniu z analizą danych z w.w. otworów umożliwiło opracowanie strukturalnego modelu badanej strefy (zał. 7.3.1 i 7.3.2).

Niecka mogileńsko-łódzka powstała na miejscu tzw. garbu wielkopolskiego, istniejącego w jurze dolnej i środkowej. Występowała tam wyraźnie zredukowana miąższość osadów. Od NE garb sąsiadował z bruzdą kujawską – strefą szybkiego wzrostu miąższości osadów jury dolnej i środkowej, związaną prawdopodobnie z synsedymentacyjną dyslokacją Gopła–Lutomierska. Strefa Turka stanowi NW peryferie w.w. regionalnej strefy dyslokacyjnej, która ma kierunek NW-SE, równoległy do większości uskoków w podłożu podpermskim oraz do strefy tektonicznej Teisseyre'a–Tornquista (T–T), i która spowodowała powstanie w obszarze niecki mogileńsko-łódzkiej szeregu antyklin, m.in. antykliny Turka.

Pionowe ruchy tektoniczne, które odżyły w obrębie bloków podpermskiego podłoża pod naciskiem grubego kompleksu osadów cechsztyńsko-mezozoicznych, uaktywniły działalność halokinetyczną. Najsilniejszy etap wypiętrzeń struktur solnych w strefach naruszeń tektonicznych nastąpił w czasie ruchów laramijskich. Rozwój zjawisk halotektonicznych wzdłuż uskoków lub na ich przecięciu powodował powstawanie struktur solnych o różnych kształtach i sile wypiętrzenia. Początki tego procesu prawdopodobnie sięgają okresu po sedymentacji osadów wapienia muszlowego (trias środkowy) i trwały do młodszego mezozoiku. Pełne uaktywnienie soli cechsztyńskich nastąpiło po sedymentacji utworów retyku (trias górny), na co duży wpływ miały orogeniczne ruchy starokimeryjskie.

W obszarze niecki mogileńsko-łódzkiej niedojrzałe słupy solne i związane z nimi antykliny występują na NE od strefy Turka na linii Koło–Ponętów–Wartkowice. Ich efektem jest m.in. słup solny Ponętowa (strefa Koła), czy położona dalej na SE poduszka solna Uniejowa. W efekcie tych procesów, zwłaszcza w okresie ruchów laramijskich, centralna część Kotliny Kolskiej została zrębowo wyniesiona, w kierunku NW-SE, a triasowe podłoże utworów dolnojurajskich schodowo zrzucone w kierunku SE, poprzez system poprzecznych do zrębu uskoków. Struktura zrębowa Ponętowa podzieliła Kotlinę Kolską na dwie części – zachodnią i wschodnią, które w dolnej jurze ulegały silniejszemu pogłębianiu. Strefa Turka znajduje się w zachodniej części Kotliny Kolskiej (zał. 7.3.1 i 7.3.2), tj. na SW obszaru gdzie zachodziły w.w. procesy.

W jurze górnej i w kredzie dolnej warunki sedymentacji w obrębie garbu wielkopolskiego i bruzdy kujawskiej były zbliżone (zał. 7.3.2). Od kredy górnej, w czasie ruchów tektonicznych orogenezy

alpejskiej, zaczęły pojawiać się ruchy inwersyjne, które doprowadziły do powstania w miejscu bruzdy kujawskiej – wału, a w miejscu garbu wielkopolskiego – niecki mogileńsko-łódzkiej. Duże miąższości osadów kredy w jej części SE (w niecce mogileńsko-łódzkiej zwłaszcza kredy górnej – rzędu 3000 m), związane były ze wzmożoną subsydencją dna zbiornika sedymentacyjnego.

Niecka mogileńsko-łódzka, o osi równoległej do wału kutnowskiego, jest asymetryczna. Jej bardziej strome skrzydło sąsiaduje bezpośrednio z wałem kujawskim. Wypełniają ją miąższe osady kredy, przykrywające utwory jury, triasu i permu.

W zachodniej części Kotliny Kolskiej (północna część strefy Turka) można się spodziewać w utworach dolnojurajskich warunków zbiornikowych porównywalnych do występujących w otworze Banachów IG-1 w obrębie strefy Koła (wschodniej części Kotliny Kolskiej; Marek, Feldman 1986).

Osady tworzące się w dolnej jurze powstawały w basenie o silnie zróżnicowanym dnie, gdyż rozwój struktur halokinetycznych powodował znaczne zmiany szybkości subsydencji w różnych strefach zbiornika. Zróżnicowane tempo pogłębiania i spłycania dna zbiornika wpływało na zmienną miąższość osadów i powstawanie utworów różnych facji. Sedymentacja odbywała się na przemian w środowisku lądowym i płytkomorskim. W fazach transgresywnych najczęściej osadzały się heterolity i piaskowce płytszego szelfu, a jedynie w pliensbachu ilasto-mułowcowe utwory głębszego szelfu klastycznego. W fazach regresywnych tworzyły się utwory deltowe, fluwialne i bagienne o zróżnicowanej litologii. W profilu jury dolnej dominują zatem miąższe kompleksy wodonośnych utworów piaskowcowych, od drobno- do gruboziarnistych (hetangu, synemuru, górnego pliensbachu i górnego toarku), oraz kompleksy nieciągłych serii osadów słabo przepuszczalnych i praktycznie nieprzepuszczalnych, wykształconych w postaci zwięzłych drobnoziarnistych piaskowców i mułowców (Górecki (red.) 1995). Przedzielają je dwa miąższe iłowcowe kompleksy izolujące. Starszy powstał we wczesnym pliensbachu. Młodszy – na ogół zwarty kompleks szarozielonych iłowców i mułowców o stałej miąższości 70–90 m (Górecki (red.) 2006) – w toarku dolnym.

Spąg kompleksu wodonośnych utworów dolnojurajskich w strefie Turka mogą tworzyć utwory zbliżone do stwierdzonych w otworze Przybyłów 1 (Pernal 1989), zlokalizowanym w strefie Koła, podobne do nawierconych w otworze Turek 2 (por. rozdział 4.2.1). W obu przypadkach są to utwory triasu górnego: karniku i noryku oraz retyku – piaskowce i iłowce, przypuszczalnie o miąższości co najmniej 600 m w centralnej części rejonu, a nawet około 1000 m na skłonach Wysoczyzny Tureckiej (na NWW i SEE). Przez analogię do danych dla podobnych osadów występujących w otworze Koło IG-4 (Dembowska, Marek (red.) 1990) ich porowatość efektywna może wynosić 1–2% i tylko lokalnie może wzrastać do 5%. W miejscach, gdzie serię utworów górnotriasowych tworzą iłowce leżące na wapieniach, podobnie jak w otworze Trześniew 1 (Wysocka-Kudła 1990) na wschód od strefy Koła, można przyjąć przez analogię, że porowatości efektywne są w nich niższe od 1% i tylko lokalnie, we wkładkach mułowcowych i piaskowcowych mogą wynosić około 1,6%, a utwory te są generalnie nieprzepuszczalne.

Strop utworów dolnojurajskich w strefie Turka tworzą utwory jury środkowej (wapienie piaszczyste o miąższości około 150 m stwierdzone w otworze Turek 2 na Wysoczyźnie Tureckiej por. rozdział 4.2.1).

Przez analogię do danych z dokumentacji wynikowej otworu Ponętów 1 (strefa Koła; Lis-Martyniak 1973) oraz analiz zamieszczonych w rozdz. 4.2.1, strop zbiornika dolnojurajskiego w strefie Turka tworzą przypuszczalnie piaskowce, wapienie, mułowce i iłowce serii piaskowca wapnistego jury środkowej o miąższości wzrastającej do 280 m w kierunku Kotliny Kolskiej. Wartości porowatości efektywnej i przepuszczalności byłyby tu porównywalne z danymi z otworu Ponętów 1, tj. od 4,17% w wapieniach do 9,47% w piaskowcach oraz 3,2 mD w piaskowcach i 73,3 mD w wapieniach.

W kierunku Wysoczyzny Tureckiej miąższość utworów jury środkowej maleje do około 100–150 m. Przez analogię do danych z otworu Przybyłów 1 (strefa Koła; Pernal 1989) strop mogą tu tworzyć utwory bajosu, batonu i keloweju, tj. piaskowce i mułowce (wg dokumentacji wynikowej otworu) lub wapienie piaszczyste (por. rozdział 4.2.1). Według informacji z otworu Przybyłów 1 wartości porowatości efektywnej w piaskowcach wynoszą tam 6,8%. Partie o najmniejszych miąższościach (ok. 100 m na Wysoczyźnie Tureckiej), przez analogię do danych z dokumentacji wynikowej otworu Banachów 1 (rejon Koła; Marek, Feldman 1986), mogły się tworzyć w kujawie grn., kujawie-bajosie grn., batonie dln., śr. i grn. oraz keloweju. Byłyby to zatem: piaskowce, mułowce, iłowce, piaskowce dolomityczne, wapienie piaszczyste, łupki mułowcowe, łupki ilasto-mułowcowe oraz łupki ilaste. Wartości porowatości efektywnej mogłyby być zatem porównywalne z danymi z otworu Banachów 1, tj. od 1,31% w iłowcach do 4,42% w piaskowcach (przy przepuszczalności do 0,18 mD), oraz dla podobnych utworów w otworze Koło IG-4 (Dembowska, Marek (red.) 1990) – od 1% w piaskowcach do 6% w mułowcach.

Parametry hydrogeotermalne serii złożowej podano na podstawie danych archiwalnych (zamieszczonych w rozdz. 4.2.1) oraz dokumentacji wynikowych w.w. otworów.

Strop utworów jury dolnej w strefie Turka zalega od głębokości ponad –2000 m n.p.m. na południu do ponad –3500 m n.p.m. na północy (zał. 7.3.1). Miąższość utworów dolnojurajskich zwiększa się w omawianej strefie od poniżej 50 m na NEE do ponad 350 m na SWW. Temperatury w stropie utworów dolnojurajskich wynoszą od ponad 90°C na południu omawianej strefy do poniżej 110°C na północy. W pobliżu strefy, na NE, w obrębie struktury zrębowej o przebiegu NW-SE, temperatury są niższe. Z krzywej termicznej wynika, że w usytuowanym tam otworze Ponętów 1 na głęb. 2250 m wynoszą one około 71–72°C, a na głęb. 2262 m p.p.t. 73,8°C (Lis-Martyniak 1973). Wyliczony z krzywej termicznej gradient geotermiczny ma wartość 2,66°C/100 m. Natomiast nieco dalej na NE, już poza strefą zrębową, w otworze Banachów IG-1 (Marek, Feldman 1986) po dwóch tygodniach stójki temperatura w stropie utworów dolnojurajskich na głębokości 3400 m wynosiła około 108°C (69°C na głęb. 2000 m p.p.t. i 100°C na głęb. 3140 m p.p.t.), a średnią wartość gradientu określono jako 2,8°C/100 m. Podobnych warunków można się spodziewać w północnej i NE części rejonu Turka.

Występują tutaj typowe solanki zaliczane do typu hydrogeochemicznego Na-Cl. Ich mineralizacja wzrasta w strefie Turka od ponad 75 g/dm^3 na zachodzie do około 150 g/dm^3 na wschodzie – w kierunku słupa solnego Ponętowa.

Parametry zbiornikowe piaskowców dolonojurajskich zestawiono poniżej na podstawie danych ujętych w rozdz. 5.4 oraz informacji archiwalnych, zawartych w rozdz. 4.2.1.

Porowatość efektywna (regionalna) wodonośnych utworów dolnojurajskich niecki mogileńsko-łódzkiej wynosi od 7,95 do 25,35% (średnio 18,3%). Przez analogię do obserwacji w strefie Koła (i w pobliżu tej strefy), w strefie Turka można się spodziewać porowatości efektywnych rzędu 7–13% w partiach silniej wodonośnych oraz 1–4% w partiach słabo zawodnionych (por. rozdział 4.2.1). Wartość 7,18% występuje w otworze Banachów IG-1 na głęb. 3344,5 m p.p.t. (por. rozdział 5.4), wartość 13,38% – w otworze Koło IG-4 na głęb. 2766,5 m p.p.t., wartość 1% – w otworze Koło IG-4 na głęb. 2770,5–2771,7 m p.p.t., a wartość 4% w otworze Koło IG-3 na głęb. 3080,5–3090,8 m p.p.t. (Dembowska, Marek (red.) 1990).

Współczynnik przepuszczalności (regionalny) dla niecki mogileńsko-łódzkiej wynosi od kilkudziesięciu mD do 1627,2 mD (średnio 285,35 mD). W strefie Turka współczynniki przepuszczalności skał dolnojurajskich w brzeżnych partiach nieckowatej struktury (zachodnia część Kotliny Kolskiej) mogą być porównywalne ze wskazanymi dla próbek rdzeni z otworu Banachów IG-1, zlokalizowanego w rejonie Koła poza strukturą zrębową: 2,291 mD (w kierunku X), 0,981 mD (w kierunku X) i 0,141 mD (w kierunku Z) (por. rozdział 5.4). Porównywalne wartości – 2,971 mD (w kierunku X) – stwierdzono w otworze Koło IG-4 dla próby z głęb. 2732,4 m p.p.t., podobnie usytuowanym w stosunku do struktury zrębowej jak otwór Banachów IG-1, lecz w obrębie zachodniej części Kotliny Kolskiej. Natomiast w otworze Koło IG-4 na głęb. 2766,5 m p.p.t. wartość przepuszczalności określono jako 129,023 mD. Można zatem przypuszczać, że w NNE części strefy Turka wartość przepuszczalności wzrasta do ponad 150 mD.

Współczynnik filtracji (regionalny) dla niecki mogileńsko-łódzkiej wynosi od $9{,}48 \cdot 10^{-8}$ do $1{,}2 \cdot 10^{-5}$ m/s (średnio $2{,}11 \cdot 10^{-6}$ m/s).

Potencjalna wydajność otworów wiertniczych szacowana jest w strefie Turka na około 150 m^3/h.

Przedstawiony koncepcyjny model geologiczny strefy Turka, obejmujący mapę ukształtowania stropu zbiornika jurajskiego, przekroje geologiczne z oszacowanymi miąższościami utworów, parametry hydrogeotermalne oraz dane litostratygraficzne – stanowił podstawę do opracowania numerycznego modelu przestrzennego rozkładu temperatur i ciśnień w analizowanej strefie.

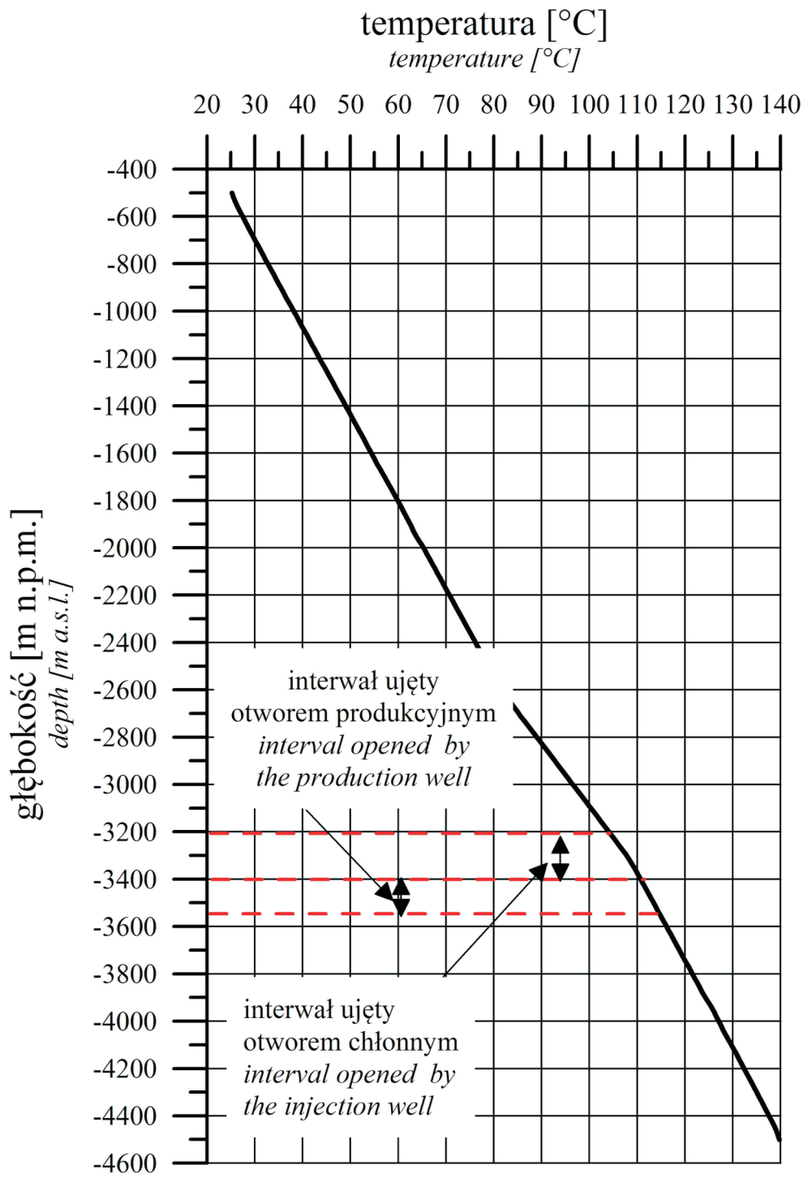
7.3.3. Model numeryczny termiki górotworu

Modelowanie numeryczne termiki górotworu wykonano, aby ocenić warunki początkowe dla modelowania systemu w szerokim horyzoncie czasowym (por. rozdział 7.3.5).

Modelowaniem numerycznym objęto obszar 13,4 km × 13,0 km, począwszy od głębokości –500 m n.p.m. do głębokości –4500 m n.p.m., zlokalizowany w strefie miasta Turek. Pionowy wymiar przestrzenny modelu wynosi 4 km. Miasto znajduje się w południowej części modelowanego obszaru, jego lokalizację w obszarze modelowania przedstawia załącznik 7.3.3 – rys. 1. Model składa się z 55 warstw, natomiast każda warstwa składa się z 506 elementów o zróżnicowanym wymiarze powierzchniowym (od 100 m × 100 m do 1340 m × 1340 m), wynikającym ze złożonej budowy geologicznej obszaru badań. Miąższość warstw jest zróżnicowana w zakresie od 50 do 200 m, co jest konsekwencją bardziej szczegółowego ujęcia warstwy jury dolnej. W sumie, łączna liczba elementów obliczeniowych tworzących model stanu stacjonarnego wynosi 27830 (zał. 7.3.3 – rys. 1).

Budowa geologiczna strefy wykazuje duże podobieństwo do wytypowanej nieopodal strefy miasta Koło. Głównym horyzontem geotermalnym w rozpatrywanej strefie była dolna jura. Poziom zalegania stropu jury dolnej oraz pozostałych horyzontów określono przy wykorzystaniu danych sejsmicznych (por. rozdz. 5.5 i 7.3.2). Podłoże modelowanego obszaru stanowią utwory triasu – w modelu założono, że jest to trias górny. Bezpośrednio nad jurą dolną zalega jura środkowa i jura górna. Na podstawie danych otworowych zakłada się, że jura górna w swej części kontaktu z zalegającymi nad nią utworami kredy dolnej jest nieprzepuszczalna. W modelu założono, że około 200-metrowy kompleks jury górnej – poczynając od jej stropu ku dołowi – jest nieprzepuszczalny. W tabeli 7.4.3.1 zestawiono parametry struktur geologicznych tworzące model numeryczny w rejonie Turka.

Prognozowany modelowaniem numerycznym profil temperatury w strefie miasta Turek przedstawia rysunek 7.3.3.1. Profil temperatury otrzymano, przyjmując na powierzchni i spągu modelowanego obszaru warunki brzegowe I-szego rodzaju (warunki brzegowe Dirichleta, $T(t)$ = const., $p(t)$ = const.).



Rys. 7.3.3.1. Profil temperatury w strefie miasta Turek otrzymany w wyniku modelowania numerycznego wraz z naniesionymi interwałami ujętymi otworami eksploatacyjnymi

Fig. 7.3.3.1. Temperature profile in Turek area obtained by numerical modelling, including intervals in production well intakes

Temperatura na głębokości –500 m n.p.m. wynosiła 23,2°C, a na głębokości –4500 m n.p.m. 139,8°C. Na brzegach modelowanego obszaru zastosowano warunki brzegowe II-go rodzaju (warunek brzegowy Neumanna) – przyjmując gęstość strumienia ciepła przepływającego przez powierzchnie boczne równą 0 W/m^2. Temperatura pomiędzy stropem i spągiem modelowanego obszaru została określona przy uwzględnieniu budowy geologicznej i lokalnych warunków hydrotermalnych, które szerzej opisano w rozdziale 7.3.5.

Zmiany temperatury na określonej – stałej głębokości w analizowanym obszarze nie były znaczące i zawierały się w przedziale +/– 1°C. Przykładowo, zmiany temperatury w profilu przechodzącym przez otwór produkcyjny równolegle do osi Y lokalnego układu współrzędnych (zał. 7.3.3 – rys. 1 – dla X = 4900 m) na głębokości –3400 m n.p.m. zawierały się w przedziale od 110°C do 110,75°C, przy wartości średniej około 110,6°C. Dla profilu przechodzącego przez ten sam otwór, równoległego do osi X (Y = 11000 m – zał. 7.3.3. – rys. 1), zmiany temperatury na tej samej głębokości zawierały się w przedziale od 110,57°C do 110,76°C, przy wartości średniej około 110,66°C.

Kalibracja modelu numerycznego termiki górotworu polegała na wykonaniu szeregu symulacji, mających na celu odtworzenie warunków termicznych w analizowanym rejonie miasta Turek. Za punkt odniesienia przyjęto dane zawarte na mapach temperatury w stropie poszczególnych jednostek stratygraficznych, przedstawione przez Góreckiego (red. 2006).

Tabela 7.3.3.1. Struktury geologiczne tworzące model i ich parametry geologiczne

Table 7.3.3.1. Geological structures constituting the model and their geological parameters

Nr	Formacja / Struktura	Opis	Oznaczenie w modelu	Porowatość efektywna [%]	Gęstość [kg/m^3]	Przepuszczalność [mD]		Ciepło właściwe [J/(kg·K)]	Współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m·K)]
						XY	Z		
1	T_3 Trias górny	piaskowce, iłowce		0,1	2650	10^{-4}	10^{-5}	1000	3,5
2	J_1 Jura dolna	piaskowce drobno- i grubo ziarniste, iłowce, mułowce		7	2650	50	5	1000	3,5
3	J_2+J_3 Jura środkowa i górna	piaskowce, wapienie, mułowce, iłowce		4	2650	50	5	1000	3,5
4	J_3 Jura górna	nieprzepuszczalna mułowce, iłowce, wapienie, anhydryty		0,01	2650	10^{-4}	10^{-5}	1000	3,5
5	K_1 Kreda dolna	piaskowce drobno- i bardzo drobno-ziarniste, mułowce piaszczyste, wapienie, łupki ilaste		2	2650	50	5	1000	3,5

7.3.4. Program technologiczny zastosowania systemu binarnego

Zgodnie z danymi przedstawionymi w rozdziale 7.3.2, w granicach analizowanej strefy, wykonane zostały w przeszłości tylko dwa głębokie otwory wiertnicze: Turek 1 i Turek 2. Jednakże ich lokalizacja nie może być brana pod uwagę jako otworów potencjalnie możliwych do wykorzystania w systemach binarnych. Wykorzystanie energii geotermalnej do generacji prądu i ciepła wymagałaby zatem wykonania nowego dubletu geotermalnego, obejmującego otwór eksploatacyjny i chłonny.

Biorąc pod uwagę głębokość zalegania głównego zbiornika hydrogeotermalnego jury dolnej w niniejszej strefie przyjęto głębokość otworu eksploatacyjnego 3550 m p.p.t. i otworu chłonnego 3400 m p.p.t.

7.3.4.1. Modelowanie wpływu zmian parametrów eksploatacyjnych na uzyskiwane efekty pracy binarnej elektrociepłowni geotermalnej

Uwzględniając specyfikę występowania złoża geotermalnego i zbliżone warunki hydrogeotermalne do prezentowanych dla strefy Koła (por. rozdział 7.2), przeprowadzono analizę doboru najlepszych parametrów pracy systemu ORC. Wyniki przeprowadzonej analizy zaprezentowano w tabelach 7.3.4.1–7.3.4.3. Obliczenia wykonano dla trzech oczekiwanych temperatur końcowych wody termalnej (woda schłodzona w systemie energetycznym) T_{g2}:

- **wariant A** – woda termalna zasila tylko elektrownię geotermalną (po zasileniu elektrowni będzie kierowana do odwiertu chłonnego) – wybrano te parametry pracy elektrowni, przy których moc elektrowni jest najwyższa;
- **wariant B** – woda termalna będzie wykorzystywana również na potrzeby ciepłownicze lub do innych procesów technologicznych – do obliczeń przyjęto T_{g2}^{B} = 60°C;
- **wariant C** – woda termalna będzie wykorzystywana na potrzeby technologii basenowej i/lub cele balneologiczne – do obliczeń przyjęto T_{g2}^{C} = 47°C.

Oznaczenia prezentowane tabelach są zgodne z opisem przedstawionym w rozdziale 6.2. oraz ze schematem zaprezentowanym na rysunku 6.2.5.1.

Na podstawie analizy przedstawionej w tabeli 7.3.4.1, dla wody termalnej o temperaturze około 98°C, przy wydajności ujęcia na poziomie 150 m^3/h maksymalną moc elektrowni (481,3 kW) uzyskuje się przy zastosowaniu czynnika R227ea i temperaturze jego odparowania 64°C. Woda termalna schładzana jest w takim przypadku do temperatury 55°C. Przy założeniu, że woda termalna po zasileniu elektrowni zostanie schłodzona do temperatury 60°C (wariant B, tab. 7.3.4.2), najwyższą moc (476,2 kW) osiągnie się również przy zastosowaniu czynnika R227ea w temperaturze odparowania 70°C. Dla wariantu C (tab. 7.3.4.3) moc maksymalna elektrowni wyniosła 439 kW, przy zastosowaniu tego samego czynnika roboczego i jego odparowaniu w temperaturze 54°C.

Rodzaj zastosowanego czynnika roboczego znacząco wpływa na wielkość mocy elektrowni, przy czym należy rozpatrywać zespół cech i właściwości czynnika roboczego zarówno termodynamicznych jak i eksploatacyjnych. Trudno jest określić, w jakim stopniu rodzaj czynnika pod kątem jego kształtu krzywych nasycenia (suchy, mokry) wpływa na efektywność pracy siłowni, gdyż tylko jeden z rozpatrywanych czynników zalicza się do grupy mokrych (metanol), natomiast zauważalny jest wpływ temperatury krytycznej czynnika. Dla czynników o niższych wartościach temperatury krytycznej zazwyczaj osiągano lepszą efektywność pracy elektrowni geotermalnej.

Tabela 7.3.4.1. Parametry termiczne i kaloryczne czynników roboczych oraz wyniki obliczeń dla wariantu A –maksymalizacja mocy elektrowni geotermalnej dla strefy TUREK

Table 7.3.4.1. Thermal and calorific parameters of the operating media, as well as calculation results for the option A – maximization of the geothermal plant power for the TUREK location

Lokalizacje TUREK: T_{g1} = 98°C, $\dot{V}_g$ = 150 m^3/h, ΔT_1 = 5K ΔT_S = 3K, wariant A																				
Woda termalna					Parametry charakterystyczne czynnika											Układ ORC				
czynnik roboczy	T_{g2}	T_{g3}	T_{g4}	ΔT_2	T_{n1}	h_{n1}	T_{n2s}	h_{n2s}	T_{n3}	h_{n3}	T_{n4s}	h_{n4s}	$T_{n5}=T_{n6}$	h_{n5}	h_{n6}	m_n	N_t	N_p	N_{ORC}	Q_d	η_{ORC}
	°C	°C	°C	°C	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	kJ/kg	kg/s	kW	kW	kW	kW	%
R227ea	55,0	69,0	96,9	32,9	67,0	365,5	41,7	354,0	30,0	234,6	30,5	235,2	64,0	277,7	362,1	56,7	522,9	41,5	481,3	7 389,0	6,5
R1234ze	58,3	69,0	97,2	33,2	67,0	249,9	35,1	232,9	30,0	64,9	30,5	65,6	64,0	115,2	246,1	37,0	501,2	35,4	465,7	6 810,6	6,8
R236fa	58,4	69,0	97,3	33,3	67,0	405,1	41,0	390,1	30,0	237,3	30,2	237,7	64,0	282,5	402,0	40,6	487,0	21,1	465,9	6 799,4	6,9
Izobutan	58,2	67,0	97,3	35,3	65,0	642,5	38,4	610,1	30,0	271,2	30,3	272,2	62,0	354,1	636,0	18,4	478,5	23,1	455,4	6 833,2	6,7
MM	58,1	67,0	97,3	35,3	65,0	139,0	49,4	116,0	30,0	–141,1	30,0	–141,0	62,0	–78,4	134,2	24,5	450,5	1,1	449,6	6 854,2	6,6
Metanol	60,3	62,4	95,6	38,2	93,0	1 173,8	30,0	1 068,4	30,0	–92,8	30,0	92,7	57,4	–19,7	1094,7	5,2	431,5	0,4	431,0	6 480,4	6,7

Tabela 7.3.4.2. Parametry termiczne i kaloryczne czynników roboczych oraz wyniki obliczeń dla wariantu B dla strefy TUREK

Table 7.3.4.2. Thermal and calorific parameters of the operating media, as well as calculation results for the option B for the TUREK location

Lokalizacje TUREK: T_{g1} = 98°C, T_{g2} = 60°C, $\dot{V}_g$ = 150 m^3/h, ΔT_S = 3K, wariant B																				
Woda termalna					Parametry charakterystyczne czynnika											Układ ORC				
czynnik roboczy	T_{g4}	ΔT_2	T_{g3}	ΔT_1	T_{n1}	h_{n1}	T_{n2s}	h_{n2s}	T_{n3}	h_{n3}	T_{n4s}	h_{n4s}	$T_{n5}=T_{n6}$	h_{n5}	h_{n6}	m_n	N_t	N_p	N_{ORC}	Q_d	η_{ORC}
	°C	°C	°C	°C	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	kJ/kg	kg/s	kW	kW	kW	kW	%
R227ea	97,0	27,0	74,5	4,5	73,0	368,4	42,9	355,1	30,0	234,6	30,6	235,3	70,0	286,0	364,8	49,0	521,2	45,1	476,2	6 523,6	7,3
R1234ze	97,2	31,2	70,8	4,8	69,0	250,8	35,2	233,0	30,0	64,9	30,5	65,6	66,0	118,3	247,0	35,2	502,1	36,5	465,6	6 523,6	7,1
R236fa	97,3	33,3	68,9	4,9	67,0	645,0	38,8	610,7	30,0	271,2	30,3	272,3	64,0	359,6	638,5	17,6	479,9	23,8	456,1	6 523,6	7,0
Izobutan	97,3	33,3	68,9	4,9	67,0	645,0	38,8	610,7	30,0	271,2	30,3	272,3	64,0	359,6	638,5	17,6	479,9	23,8	456,1	6 523,6	7,0
MM	97,4	33,4	68,9	4,9	67,0	142,1	50,5	117,7	30,0	–141,1	30,0	–141,0	64,0	–74,4	137,2	23,0	449,3	0,9	448,3	6 523,6	6,9
Metanol	95,7	38,6	62,2	5,1	92,0	1 172,2	30,0	1 068,4	30,0	–92,8	30,0	–92,8	57,0	–20,8	1 094,3	5,2	428,2	0,4	427,8	6 523,6	6,6

Tabela 7.3.4.3. Parametry termiczne i kaloryczne czynników roboczych oraz wyniki obliczeń dla wariantu C dla strefy TUREK

Table 7.3.4.3. Thermal and calorific parameters of the operating media, as well as calculation results for the option C for the TUREK location

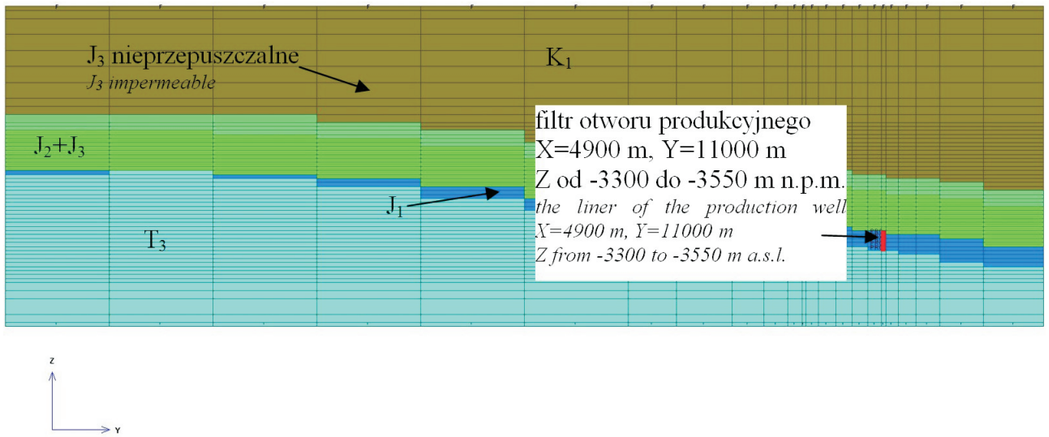
Lokalizacje TUREK: T_{g1} = 98°C, T_{g2} = 47°C, $\dot{V}_g$ = 150 m^3/h, ΔT_S = 3K, wariant C																				
Woda termalna					Parametry charakterystyczne czynnika											Układ ORC				
czynnik roboczy	T_{g4}	ΔT_2	T_{g3}	ΔT_1	T_{n1}	h_{n1}	T_{n2s}	h_{n2s}	T_{n3}	h_{n3}	T_{n4s}	h_{n4s}	$T_{n5}=T_{n6}$	h_{n5}	h_{n6}	m_n	N_t	N_p	N_{ORC}	Q_d	η_{ORC}
	°C	°C	°C	°C	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	kJ/kg	kg/s	kW	kW	kW	kW	%
R227ea	96,7	42,7	59,0	5,0	57,0	360,3	39,3	351,9	30,0	234,6	30,3	235,0	54,0	264,5	357,1	69,8	470,7	31,7	439,0	8 755,4	5,0
R1234ze	97,0	47,0	55,2	5,2	53,0	242,7	34,4	232,2	30,0	64,9	30,2	65,2	50,0	93,7	239,3	49,3	414,1	24,0	390,0	8 755,4	4,5
R236fa	97,1	47,1	55,3	5,3	53,0	396,3	37,6	387,1	30,0	237,3	30,1	237,5	50,0	263,4	393,4	55,1	405,3	14,7	390,6	8 755,4	4,5
izobutan	97,1	49,1	53,5	5,5	51,0	624,2	35,8	605,3	30,0	271,2	30,1	271,7	48,0	316,8	618,2	24,8	376,2	15,3	360,9	8 755,4	4,1
MM	97,1	47,1	54,6	4,6	53,0	120,8	43,0	106,1	30,0	–141,1	30,0	–141,0	50,0	–102,2	116,1	33,5	392,3	0,9	391,3	8 755,4	4,5
metanol	96,4	53,0	48,5	5,1	58,0	1 119,8	30,0	1 068,4	30,0	–92,8	30,0	–92,8	43,4	–57,8	1 081,5	7,3	296,8	0,2	296,6	8 755,4	3,4

7.3.5. Model numeryczny pracy dubletu geotermalnego

Modelowanie numeryczne pracy dubletu geotermalnego wykonano, aby ocenić zmiany temperatury eksploatowanej wody termalnej oraz prognozy zmian ciśnienia eksploatacyjnego i wymaganego dla zatłaczania wody schłodzonej, w 50-letnim cyklu pracy systemu binarnego. Model eksploatacji energii jest kontynuacją modelu stanu stacjonarnego, tj. bazuje na uzyskanym rozkładzie temperatury i ciśnienia w warunkach przed-eksploatacyjnych. Przebieg oraz parametry wydzielonych w obrębie modelu struktur geologicznych, jak również przyjęte warunki brzegowe pozostają niezmienione. Nie dokonano modyfikacji siatki obliczeniowej.

W modelowaniu procesów termodynamicznych założono, że płyny wypełniające szczeliny są wodą niezmineralizowaną. Zróżnicowanie parametrów cieplnych wody i solanki ulega jednak pewnej kompensacji, co uzasadniono w rozdziale 7.2.5, odpowiednio dla strefy Koło.

Na rysunku 7.3.5.1 przedstawiono schemat dyskretyzacji modelowanej przestrzeni na przekroju przechodzącym przez płaszczyznę przecinającą dublet otworów eksploatowanych. Otwór produkcyjny ma współrzędne, według lokalnego układu współrzędnych X = 4900 m, Y = 11 000 m i Z od –3300 m n.p.m. do –3550 m n.p.m. Otwór chłonny ma współrzędne lokalne X = 5400 m, Y = 10 000 m i Z od –3200 m n.p.m. do –3400 m n.p.m.



Rys. 7.3.5.1. Schemat dyskretyzacji modelowanej przestrzeni na przekroju przechodzącym przez otwór produkcyjny planowanego dubletu otworów geotermalnych (X = 4900 m). Widok 2D pokazujący przebieg utworów geologicznych i otworów w lokalnym, kartezjańskim układzie współrzędnych X, Y, Z

Fig. 7.3.5.1. Diagram of the discretization of the modelled space at the cross-section through the production well of the planned geothermal doublets (X = 4900 m). 2D view presenting the location of the geological structures and holes in the local Cartesian coordinate system X, Y, Z

Na załączniku 7.3.3 – rys. 2 przedstawiono rozkład temperatury na przekroju AA' przechodzącym przez otwór produkcyjny (Y = 11 000 m) w stanie stacjonarnym. Rozkład ten – wobec przyjętych warunków brzegowych oraz parametrów struktur geologicznych – charakteryzuje się praktycznie stałym gradientem oraz niewielkim zróżnicowaniem wzdłuż przekroju, względem głębokości odniesienia (potencjalnie nieznacznie wyższe temperatury we wschodniej części analizowanego obszaru).

Model eksploatacji złoża został zasymulowany dla wydajności dubletu równej 150 m^3/h. Z wykresów zaprezentowanych na załączniku 7.3.3. – rys. 3 wynika, że zakładając słuszność założeń poczynionych przy opracowaniu modelu numerycznego po 50 latach eksploatacji dubletu nie powinien być zauważalny spadek temperatury na filtrze otworu produkcyjnego (nie ma przebicia frontu chłodnego). Różnica ciśnienia między otworem produkcyjnym i chłonnym oszacowana została na 3,2 MPa. Przy wydajności 150 m^3/h potrzebna będzie zatem moc napędowa pomp obiegowych systemu geotermalnego na niewielkim poziomie 167 kW. Na rysunku 4 z załącznika 7.3.3 zaprezentowano zmiany ciśnienia i wydajności jakie zaszły w górotworze na przekroju przechodzącym przez otwory produkcyjny i chłonny po 50 latach nieprzerwanej eksploatacji wody termalnej z wydajnością 150 m^3/h. Rysunek potwierdza brak dotarcia frontu chłodnego od otworu chłonnego do produkcyjnego w analizowanym interwale czasowym.

7.3.6. Prognoza efektów finansowych, energetycznych, ekologicznych i społecznych

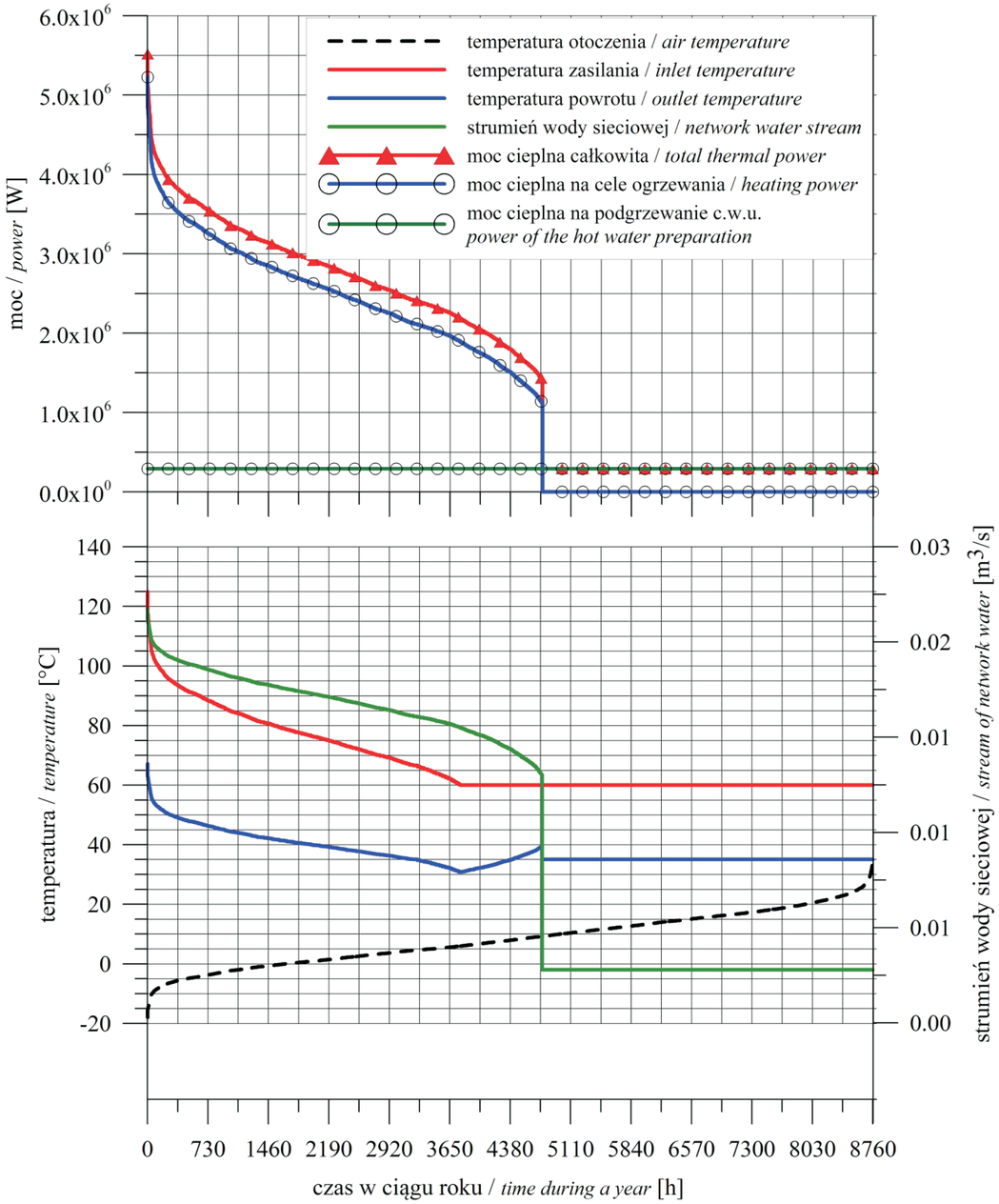
Definicję odbiorcy, dla którego prowadzono obliczenia, zaprezentowano na rysunku 7.3.6.1. Założono, że geotermalne źródło energii współpracować będzie z istniejącą siecią dystrybucji energii. Moc całkowita odbiorcy oszacowana została na około 5,5 MW. Założono, że sieć ciepłownicza zaprojektowana jest dla nominalnych parametrów roboczych 130/70°C. Ze względu na przewidywaną temperaturę głowicową wody geotermalnej, wynoszącą około 98°C, konieczne jest krótkotrwałe wspomaganie instalacji źródła geotermalnego źródłem szczytowym o mocy 2448 kW (tab. 7.3.6.1). Zdecydowaną większość energii cieplnej, na którą istnieje zapotrzebowanie można dostarczyć ze źródła geotermalnego. Nadwyżka mocy cieplnej ujęcia pozwala również na wytwarzanie energii elektrycznej w systemie binarnym przez większą część roku – za wyjątkiem kilkuset godzin w roku, w których przypada szczytowe zapotrzebowanie na moc cieplną (rys. 7.3.6.2). Parametry techniczne systemu i źródła energii zestawiono w tabeli 7.3.6.1.

Moc elektryczna zainstalowana systemu binarnego szacowana jest na około 450 kW (rys. 7.3.6.2). Odprowadzana do sieci elektroenergetycznej ilość energii elektrycznej wynosić będzie około 1,7 GWh/rok (tab. 7.3.6.1).

Całkowite nakłady inwestycyjne dla źródła energii i systemu jej dystrybucji oszacowano na około 69 mln zł (tab. 7.3.6.2). Cenę energii cieplnej gwarantującą osiągnięcie rentowności inwestycji w źródło energii i system dystrybucji oszacowano na 78 zł/GJ. Jest to wartość charakterystyczna dla energii pozyskiwanej z gazu ziemnego (na podstawie Pająk, Bujakowski 2013a).

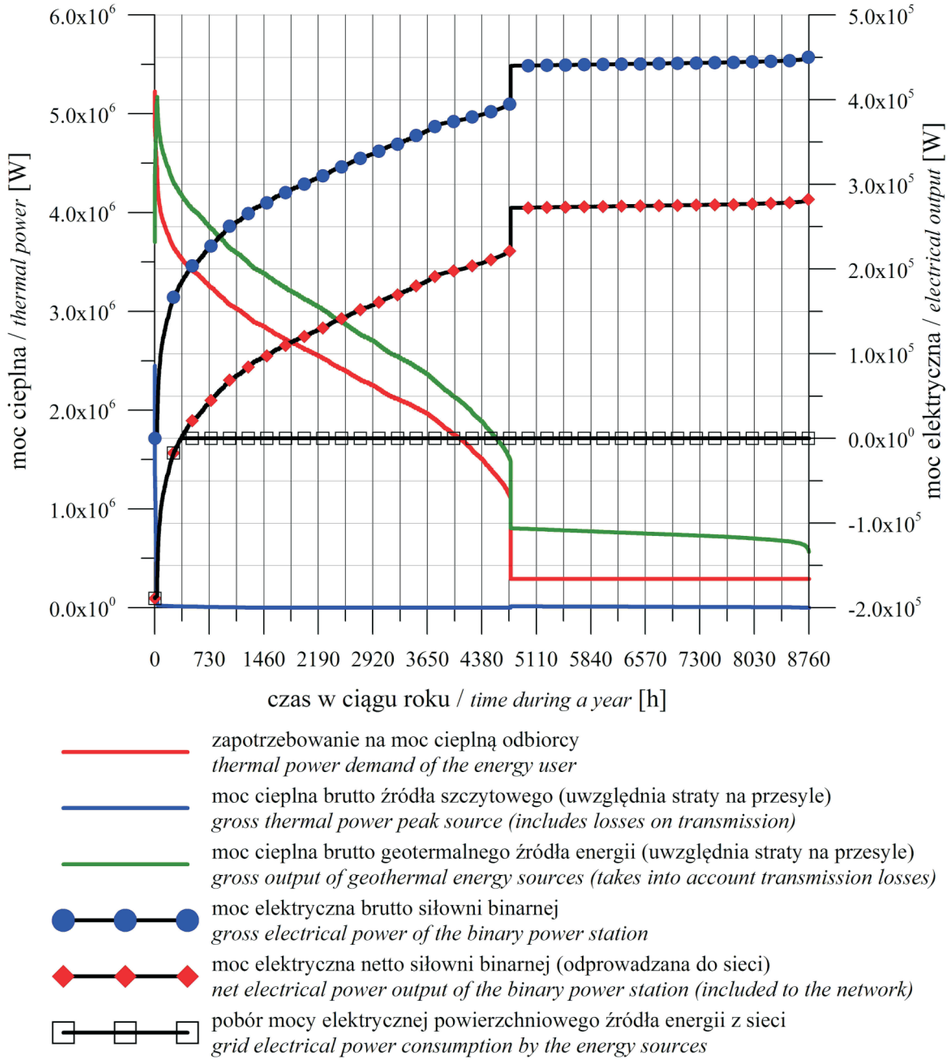
Przewidywane do osiągnięcia efekty ekologiczne w postaci redukcji emisji zanieczyszczeń związanej z wdrożeniem geotermalnego źródła energii cieplnej i elektrycznej zestawiono w tabeli 7.3.6.3.

Efekty społeczne wykorzystania wód termalnych w rejonie Turka wiązać się będą z powstaniem nowych miejsc pracy, w liczbie około 10, w rejonie uruchomienia inwestycji. Biorąc pod uwagę możliwość budowy na bazie analizowanych wód również obiektów balneo-rekreacyjnych, liczba miejsc pracy wzrosłaby znacząco. Miejsca, w których uruchomiono dotychczas instalacje geotermalne wykorzystujące te wody w celach balneo-rekreacyjnych, świadczą o dużym zainteresowaniu klientów tego typu usługami. Takie przedsięwzięcia stymulują lokalny rynek usług i znacząco wpływają na wzrost atrakcyjności turystycznej. Zyskuje na tym branża gastronomiczna, hotelarska, rozwija się rynek różnorodnych usług.



Rys. 7.3.6.1. Definicja odbiorcy energii dla lokalizacji Turek

Fig. 7.3.6.1. Energy end-user characteristic for Turek location



Rys. 7.3.6.2. Moc cieplna i elektryczna wytwarzana przez źródło energii dla lokalizacji Turek

Fig. 7.2.6.2. Heat and electric power generated by the energy source in Turek location

Tabela 7.3.6.1. Parametry techniczne dla instalacji źródła energii dla lokalizacji Turek

Table 7.3.6.1. Technical parameters for the heat source installation in Turek location

Parametr	Wartość
Lokalizacja	Turek
Głębokość otworu produkcyjnego [m p.p.t.]:	3550
Średnica otworu produkcyjnego [m]:	0,244475
Stan otworu produkcyjnego:	nowy
Strumień nominalny (maksymalny) wody geotermalnej [m^3/h]:	150
Temperatura wody w warstwie wodonośnej [°C]:	100
Poziom zwierciadła statycznego w otworze produkcyjnym [m p.p.t.]:	100
Ciśnienie depresji [MPa]:	0,9
Głębokość otworu chłonnego [m p.p.t.]:	3400
Stan otworu chłonnego:	nowy
Poziom zwierciadła statycznego w otworze chłonnym[m p.p.t.]:	100
Ciśnienie represji [MPa]:	2,3
Projektowana temperatura schłodzenia wody geotermalnej w siłowni binarnej [°C]:	55
Projektowana temperatura wody geotermalnej na głowicy otworu produkcyjnego [°C]:	97,65
Temperatura minimalna (projektowa) powietrza zewnętrznego [°C]:	-18
Temperatura projektowa zasilania instalacji odbiorcy [°C]:	124,9
Temperatura projektowa powrotu z instalacji odbiorcy [°C]:	67,1
Nominalny (maksymalny) strumień czynnika dla instalacji odbiorcy [m^3/h]:	78,1
Moc cieplna całkowita odbiorcy [kW]:	5516
Moc cieplna centralnego ogrzewania dla odbiorcy [kW]:	5225
Moc cieplna przygotowania ciepłej wody użytkowej dla odbiorcy [kW]:	291
Całkowite zapotrzebowanie na energię cieplną odbiorcy [GJ/rok]:	47004,1
Całkowita moc cieplna zainstalowana w źródle energii (uwzględnia straty mocy na przesyle) [kW]:	7619,3
Całkowita ilość energii cieplnej wytworzonej przez źródło energii (uwzględnia straty na przesyle) [GJ/rok]:	62092,7
Całkowita moc cieplna zainstalowana w części geotermalnej [kW]:	5170,6
Całkowita ilość energii cieplnej wytworzonej z geotermii (uwzględnia straty na przesyle) [GJ/rok]:	61843,7
Całkowita moc cieplna zainstalowana w ciepłowni szczytowej [kW]:	2448,7
Całkowita ilość energii cieplnej wytworzonej przez kotłownię szczytową (uwzględnia straty na przesyle) [GJ/rok]:	249,0
Całkowita moc elektryczna zainstalowana w geotermalnej siłowni binarnej [kW]:	451,2
Całkowita ilość energii elektrycznej wytworzonej przez siłownię binarną brutto (uwzględnia potrzeby całej własne instalacji) [MWh/rok]:	3204,4
Ilość energii elektrycznej wytworzonej przez siłownię binarną netto (po odjęciu potrzeb własnych instalacji = energia sprzedana) [MWh/rok]:	1699,7
Długość całkowita rurociągu z wodą geotermalną (od głowic otworów do ciepłowni) [m]:	200
Średnica nominalna rury przewodowej dla rurociągu z wodą geotermalną (od głowic otworów do ciepłowni) [m]:	0,21026
Stan rurociągu z wodą geotermalną:	nowy
Długość całkowita rurociągu od ciepłowni geotermalnej do ciepłowni szczytowej [m]:	1000
Średnica nominalna rury przewodowej dla rurociągu od ciepłowni geotermalnej do ciepłowni szczytowej [m]:	0,15167
Stan rurociągu od ciepłowni geotermalnej do ciepłowni szczytowej:	nowy
Długość całkowita rurociągu od ciepłowni szczytowej do odbiorcy energii cieplnej [m]:	5000
Średnica nominalna rury przewodowej dla rurociągu od ciepłowni szczytowej do odbiorcy energii [m]:	0,15167
Stan rurociągu od ciepłowni szczytowej do odbiorcy:	istnieje
Maksymalne opory przepływu na rurociągach ciepłowniczych przesyłowych (z wyłączeniem rurociągu z wodą geotermalną) [MPa]:	0,7809
Maksymalne opory przepływu na rurociągu z wodą geotermalną [MPa]:	0,0206
Maksymalne ciśnienie do pokonania przez pompy geotermalne (ciśnienie represji minus ciśnienie depresji) [MPa]:	3,2
Średnie roczne straty energii cieplnej na przesyle [ułamek energii cieplnejwytworzonej w źródle energii]:	0,24

Tabela 7.3.6.2. Zestawienie parametrów ekonomicznych dla instalacji powierzchniowego źródła energii dla lokalizacji Turek

Table 7.3.6.2. List of the economic parameters for the surface energy source installation in Turek location

Parametr	Wartość
Cena netto zakupu energii elektrycznej [zł/kWh]:	0,488
Cena netto sprzedaży energii elektrycznej [zł/kWh]:	0,24
Cena netto zakupu gazu ziemnego wysokometanowego [zł/m^3]:	1,626
Cena netto sprzedaży energii cieplnej gwarantująca finansową rentowność inwestycji [zł/GJ]:	77,06
Całkowite prognozowane nakłady inwestycyjne (główne komponenty zestawiono poniżej) [tys zł]:	69291
Nakłady inwestycyjne na otwór produkcyjny [tys zł]:	29831
Nakłady inwestycyjne na otwór chłonny [tys zł]:	28138
Nakłady inwestycyjne na siłownię binarną [tys zł]:	4130
Nakłady inwestycyjne na szczytowe kotły gazowe [tys zł]:	857
Nakłady inwestycyjne na pompy geotermalne (głębinowa i stacja pomp zatłaczania) [tys zł]:	952
Nakłady inwestycyjne na pompy obiegowe [tys zł]:	43
Nakłady inwestycyjne na wymienniki ciepła [tys zł]:	843
Nakłady inwestycyjne na rurociągi połączeniowe [tys zł]:	2138
Nakłady inwestycyjne na budynek ciepłowni geotermalnej i szczytowej [tys zł]:	1405
Całkowite koszty obsługi instalacji (główne składniki kosztów zestawiono poniżej) [tys zł/rok]:	4030
Amortyzacja środków trwałych [tys zł/rok]:	3315
Koszty obsługi, remontów, konserwacji [tys zł/rok]:	693
Koszty zakupu nośników energii [tys zł/rok]:	23
Przychody z tytułu sprzedaży energii (szczegółowo zestawiono poniżej) [tys zł/rok]:	4030
Przychody z tytułu sprzedaży energii cieplnej [tys zł/rok]:	3622
Przychody z tytułu sprzedaży energii elektrycznej [tys zł/rok]:	408

Tabela 7.3.6.3. Zestawienie parametrów ekologicznych dla instalacji powierzchniowego źródła energii dla lokalizacji Turek

Table 7.3.6.3. List of the ecological parameters for the surface energy source installation in Turek location

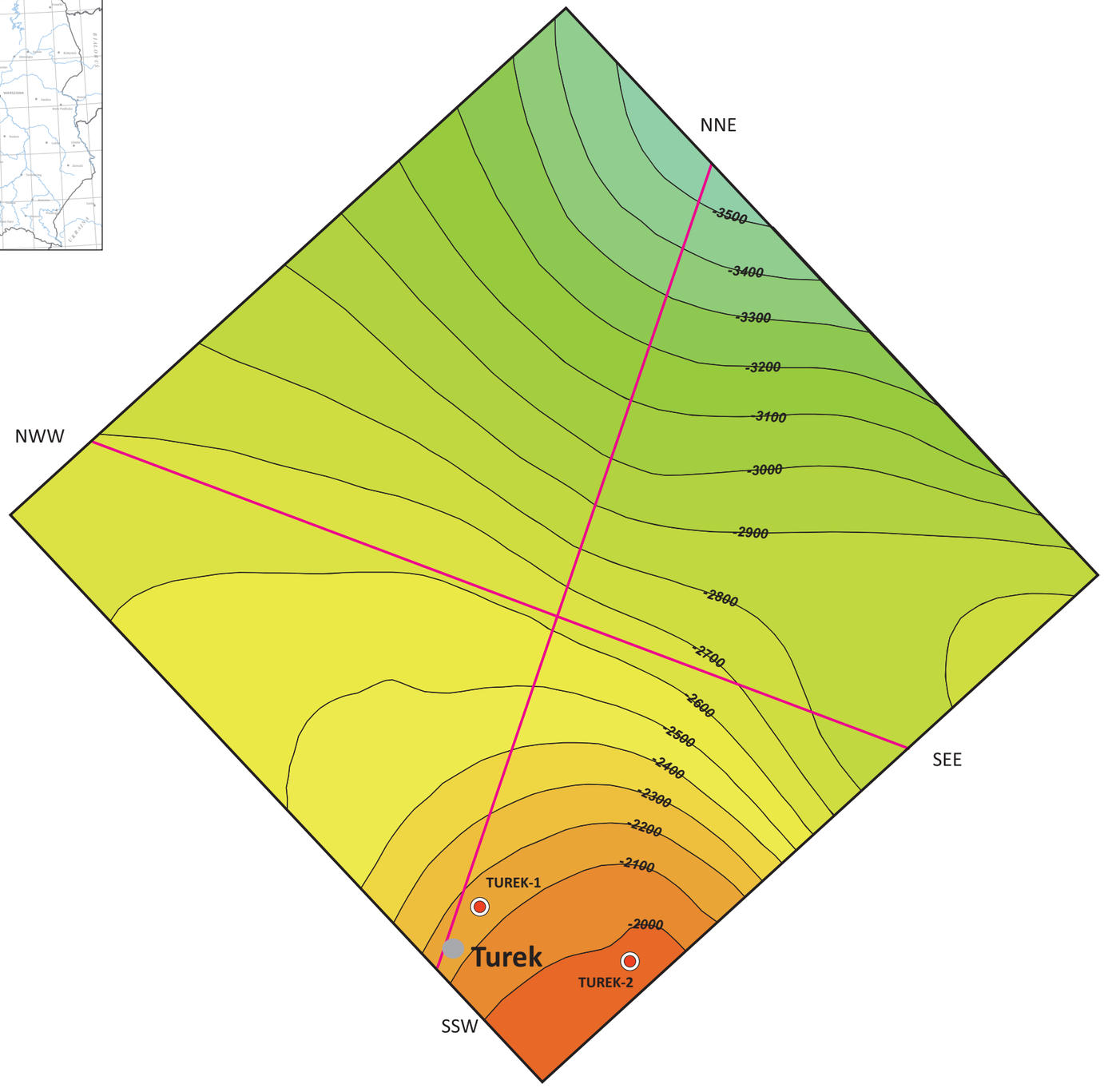
Parametr	Wartość
Roczna emisja B(a)P dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0
Roczna emisja sadzy dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0
Roczna emisja pyłu dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0,008
Roczna emisja CO_2 dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	3776,327
Roczna emisja CO dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0,731
Roczna emisja NO_x w przeliczeniu na NO_2 dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	2,46
Roczna emisja SO_2 dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0,131
Roczna emisja węglowodorów alifatycznych dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0,21
Roczna emisja w. węglowodorów aromatycznych dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0,065
Roczne ograniczenie emisji B(a)P [Mg/rok]:	0,062
Roczne ograniczenie emisji sadzy [Mg/rok]:	31,946
Roczne ograniczenie emisji pyłu [Mg/rok]:	128,366
Roczne ograniczenie emisji CO_2 [Mg/rok]:	4567,398
Roczne ograniczenie emisji CO [Mg/rok]:	358,111
Roczne ograniczenie emisji NO_x w przeliczeniu na NO_2 [Mg/rok]:	4,316
Roczne ograniczenie emisja SO_2 [Mg/rok]:	56,26
Roczne ograniczenie emisji węglowodorów alifatycznych [Mg/rok]:	19,567
Roczne ograniczenie emisji wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych [Mg/rok]:	17,896

MAPA STROPU UTWORÓW DOLNEJ JURY W STREFIE TURKA*

Encl. 7.3.1

MAP OF THE TOP OF THE LOWER JURASSIC IN THE TUREK AREA





Głębokość
[m n.p.m.]
Depth
[m a.s.l.]

-2000
-2100
-2200
-2300
-2400
-2500
-2600
-2700
-2800
-2900
-3000
-3100
-3200
-3300
-3400
-3500

*na podstawie: Czerwińska i inni, 2013
(based on: Czerwińska et al., 2013)

LEGENDA:
LEGEND:

Główne miasto
Main city

Otwory
Boreholes

Linie przekrojów geologicznych wg danych sejsmicznych (Zał. 7.3.2)
Cross-section lines according to seismic data (Encl. 7.3.2)

-3300
Izohipsy stropu utworów jury dolnej [m n.p.m.]
Isohypses of the top of Lower Jurassic formation [m a.s.l.]

0 2 4 km

WYKONANO NA ZAMÓWIENIE MINISTRA ŚRODOWISKA ZA ŚRODKI FINANSOWE WYPŁACONE
PRZEZ NARODOWY FUNDUSZ OCHRONY ŚRODOWISKA I GOSPODARKI WODNEJ



PRZEKROJE GEOLOGICZNE PRZEZ STREFĘ TURKA (przebieg na zał. 7.3.1)*

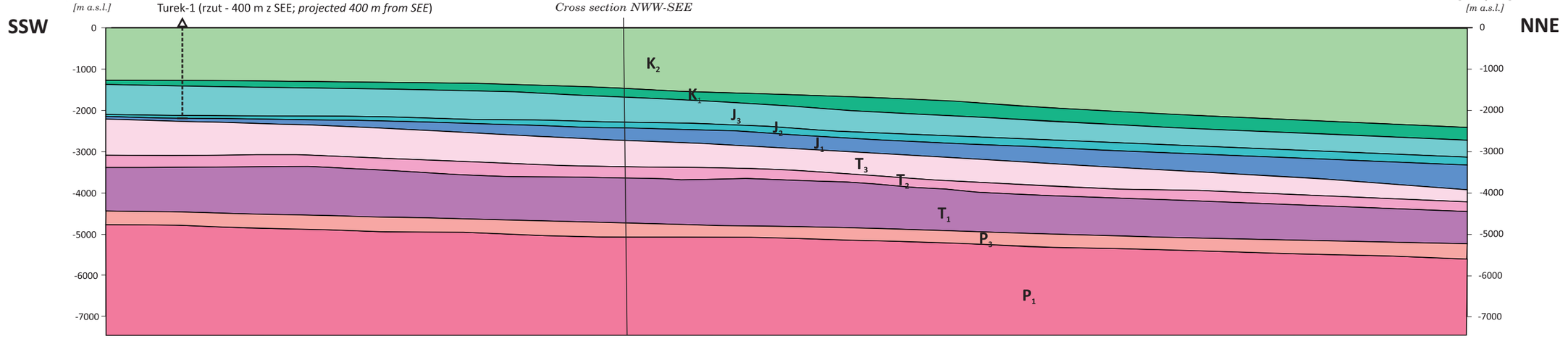
GEOLOGICAL CROSS-SECTIONS THROUGH THE TUREK AREA (line at encl.7.3.1)

Zał. 7.3.2
Encl. 7.3.2

NIECKA MOGILEŃSKO-ŁÓDZKA

Wysoczyzna Turecka — *Kotlina Kolska*

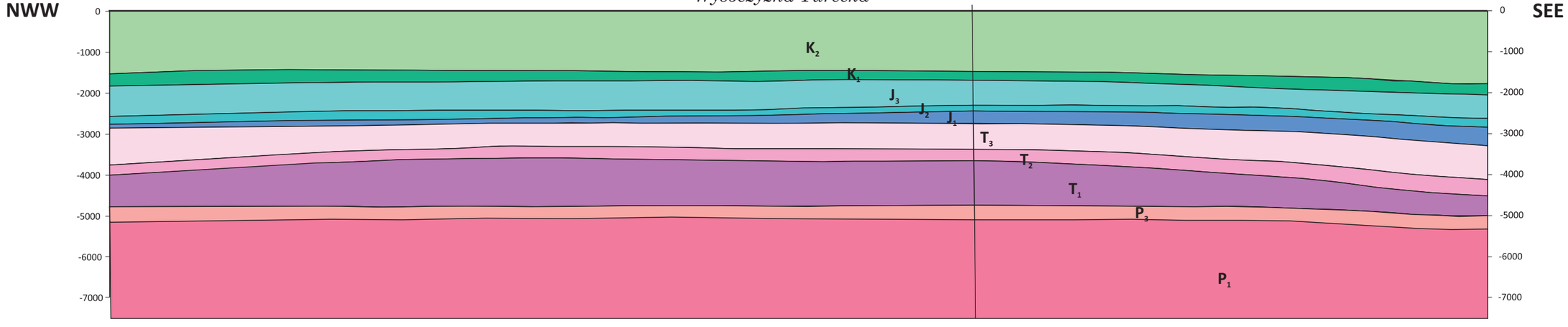
Przekrój NWW-SEE
Cross section NWW-SEE



NIECKA MOGILEŃSKO-ŁÓDZKA

Wysoczyzna Turecka

Przekrój SSW-NNE
Cross section SSW-NNE



K_2	Kreda górna *Upper Cretaceous*	J_3	Jura górna *Upper Jurassic*	T_3	Trias górny *Upper Triassic*	P_3	Perm górny *Upper Permian*
K_1	Kreda dolna *Lower Cretaceous*	J_2	Jura środkowa *Middle Jurassic*	T_2	Trias środkowy *Middle Triassic*	P_1	Perm dolny *Lower Permian*
		J_1	Jura dolna *Lower Jurassic*	T_1	Trias dolny *Lower Triassic*		

otwory rzutowane
projected boreholes

0 1 2 km

*na podstawie: Czerwińska i inni, 2013
(based on: Czerwińska et al., 2013)

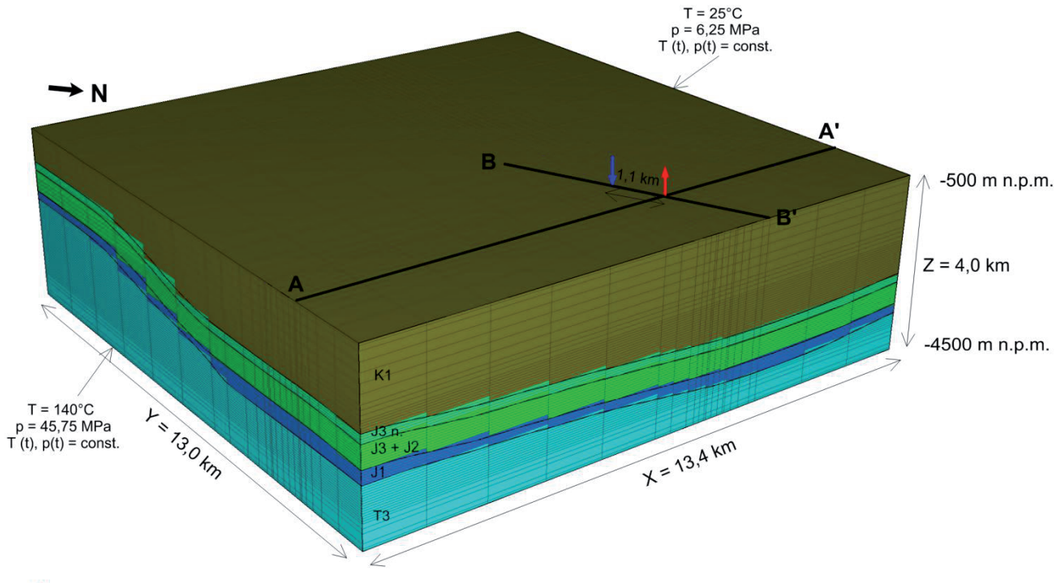
WYKONANO NA ZAMÓWIENIE MINISTRA ŚRODOWISKA ZA ŚRODKI FINANSOWE WYPŁACONE PRZEZ NARODOWY FUNDUSZ OCHRONY ŚRODOWISKA I GOSPODARKI WODNEJ

WYNIKI MODELOWANIA NUMERYCZNEGO W STREFIE TURKA

Zał. 7.3.3

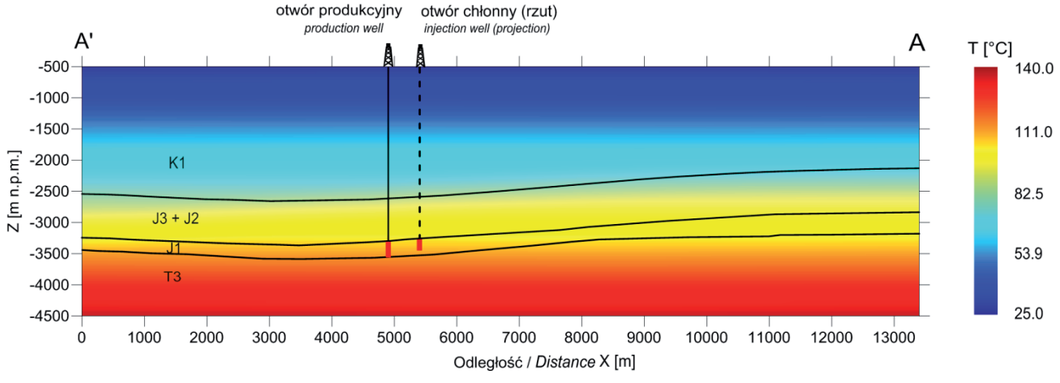
NUMERICAL MODELING RESULTS IN THE TUREK AREA

Encl. 7.3.3



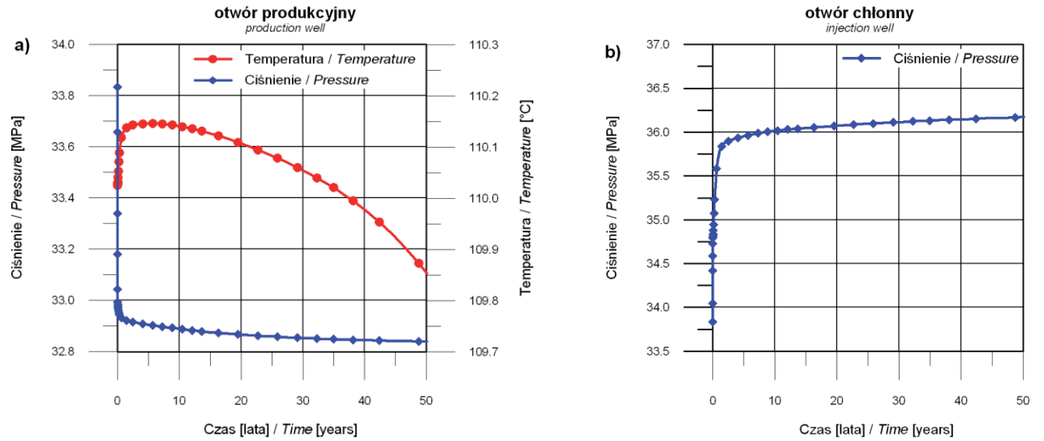
Rys. 1. Model numeryczny strefy Turka

Fig. 1. Numerical model of the Turek area



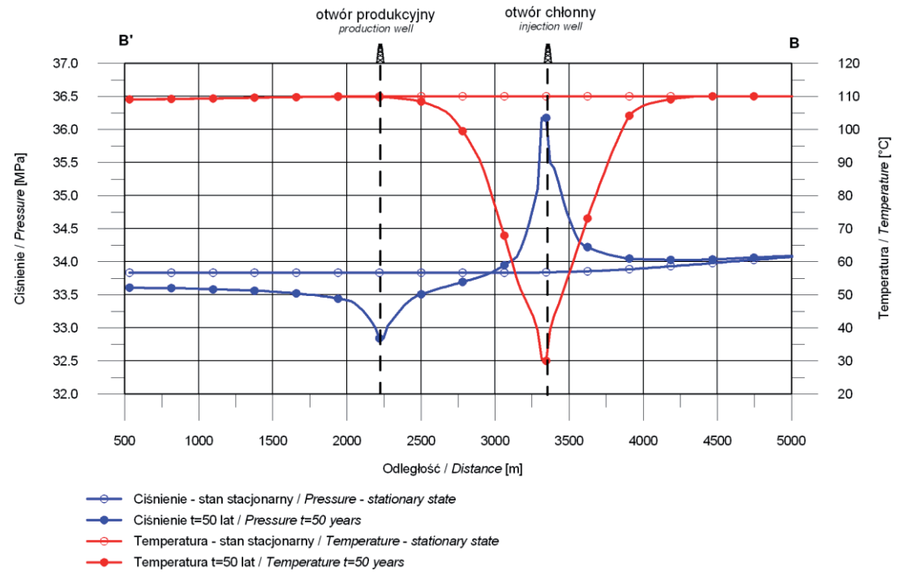
Rys. 2. Prognozowany rozkład temperatury w modelu stanu przedeksploatacyjnego wzdłuż przekroju A'A

Fig. 2. Forecasted temperature distribution prior to exploitation along the A'A cross section



Rys. 3. a) Zmiana temperatury i ciśnienia złożowego w funkcji czasu w otworze produkcyjnym, b) zmiana ciśnienia złożowego w otworze chłonnym na głębokości z = -3375 m n.p.m dla wydajności dubletu Q = 150 m^3/h

Fig. 3. a) Change of the reservoir temperature and pressure versus time in the production well, b) change of the reservoir pressure in the injection well at the depth z = -3375 m a.s.l. for the doublet flow rate Q = 150 m^3/h



Rys. 4. Zmiana temperatury złożowej oraz ciśnienia złożowego wzdłuż fragmentu przekroju B'B na głębokości z = -3375 m n.p.m. dla wydajności dubletu Q = 150 m^3/h

Fig. 4. Cross-sectional change of the reservoir temperature and pressure along part of the B'B cross section at the depth z = -3375 m a.s.l. for the doublet flow rate Q = 150 m^3

7.4. Konin

7.4.1. Ogólna charakterystyka strefy

Konin położony jest w geologicznych granicach niecki mogileńsko-łódzkiej. Jest miastem na prawach powiatu (siedziba powiatu konińskiego), położonym w środkowej Polsce, w województwie wielkopolskim, w Dolinie Konińskiej, nad rzeką Wartą. Miasto liczy około 78 tysięcy mieszkańców.

Konin jest największym ośrodkiem przemysłowym Konińskiego Zagłębia Węgla Brunatnego. Obecność złóż węgla brunatnego w pobliżu miasta zadecydowała o powstaniu Zespołu Elektrowni Pątnów-Adamów-Konin, który dostarcza około 8,5% wytwarzanej w Polsce energii elektrycznej (http://zepak.com.pl/). Trzy spośród czterech elektrowni należących do Zespołu położone są na obszarze Konina. W mieście znajduje się również huta aluminium, która wykorzystuje znaczną część energii elektrycznej produkowanej przez konińskie elektrownie. Wytwarza ona ponad 80 tys. ton wyrobów walcowanych rocznie (www.aluminium-konin.pl).

Zapotrzebowanie na moc cieplną, na cele grzewcze i zaopatrzenie w ciepłą wodę użytkową na terenie Konina, w 97% zaspokajane jest przez Miejskie Przedsiębiorstwo Energetyki Cieplnej – Konin Sp. z o.o., pozostałe 3% to indywidualne instalacje grzewcze oparte na piecach węglowych, olejowych oraz gazowych (dane na podstawie wyników ankietyzacji – Miejskie Przedsiębiorstwo Energetyki Cieplnej oraz Urząd Miasta w Koninie).

Miejskie Przedsiębiorstwo Energetyki Cieplnej – Konin Sp. z o.o. jest firmą komunalną. Zaspokajanie potrzeb dla centralnego ogrzewania i ciepłej wody użytkowej oparte jest na dwóch źródłach:

- Zespole Elektrowni Pątnów-Adamów-Konin: moc zainstalowana 336 MW na potrzeby ciepłownictwa, a moc zamówiona przez MPEC KONIN na rok 2013 – 127,45 MW. Zespół zaspokaja potrzeby prawie całego miasta; stosowane paliwo to węgiel; zakup ciepła rocznie –1 300 354 GJ; parametry znamionowe pracy w okresie grzewczym 130/71°C. Sieć przesyłowa: magistralna o długości 35 346 m, rozdzielcza o długości 73 225 m, przyłączeniowa o długości 46 921 m – łącznie 155 492 m. Rurociągi preizolowane o długości 71 370 m ułożone w gruncie, sieć napowietrzna izolowana watą mineralną z osłoną z blachy, prowadzoną na podporach o długości 34 973 m, rurociągi w kanałach betonowych/ceglanych o długości 49 149 m z izolacją z waty mineralnej; węzły ciepłownicze: jednofunkcyjne bezpośrednie (21 szt.+ 1 dwufunkcyjny), jednofunkcyjne wymiennikowe (907 szt.), jednofunkcyjne hydroelewatorowe (7 szt. + 4 dwufunkcyjne), dwufunkcyjne wymiennikowe (1241 szt.);
- lokalnej kotłowni na osiedlu Cukrownia Gosławice, której moc zainstalowana wynosi 1,54 MW, a moc zamówiona przez odbiorców – 1,4902 MW. Zaspokaja ona tylko potrzeby osiedla; stosowane paliwo to węgiel (ilość spalanego węgla rocznie na poziomie 593,7 t); produkcja ciepła rocznie 11 529 GJ; parametry znamionowe pracy w okresie grzewczym 90/70°C. Sieć przesyłowa: rozdzielcza o długości 1 106 m, przyłączeniowa o długości 915 m – łącznie 2 021 m. Rurociągi preizolowane o długości 809 m ułożone w gruncie, rurociągi w kanałach betonowych/ceglanych o długości 1212 m z izolacją z waty mineralnej; jako sieć niskoparametrowa nie posiada węzłów ciepłowniczych.

Wykaz odbiorców ciepła scentralizowanego w mieście Konin wraz z parametrami przedstawiono w tabeli 7.4.1.1. Główne zakłady pracy w Koninie, które zasilane są przez MPEC Konin, zestawiono w tabeli 7.4.1.2.

Tabela 7.4.1.1. Wykaz odbiorców ciepła scentralizowanego dla miasta Konin dane (na podstawie wyników ankietyzacji – Miejskie Przedsiębiorstwo Energetyki Cieplnej oraz Urząd Miasta w Koninie)

Table 7.4.1.1. List of the central heating end-users for the city of Konin (data based on the poll results – Municipal Heat Supply Company in Konin and Municipality of Konin)

Typ odbiorcy	Moc zamówiona na potrzeby c.o. [MW]	Moc zamówiona na potrzeby wentylacji [MW]	Moc zamówiona na potrzeby c.w.u. [MW]	Moc zamówiona SUMA [MW]	Węzeł [szt.]
Banki	0,886	0	0,071	0,957	6
Instytucje	7,7862	0,619	1,3788	9,784	56
Komunalni	1,3952	0	0,3918	1,787	12
Mieszkalnictwo	1,232	0	0,674	1,906	13
MPEC-Konin	0,425	0	0,075	0,5	11
Przedsiębiorstwa-firmy	11,8863	0,818	0,997	13,7013	139
Przemysł	9,18	0	0,87	10,05	6
PGKiM	1,294	0	0,197	1,491	6
Prywatni	13,0245	0	0,056	13,0805	1443
Drobne firmy-rzemiosło	1,6935	0	0,081	1,7745	85
Spółdzielnie mieszkaniowe	38,199	0	7,2971	45,4961	187
Szkolnictwo	10,9269	0,5533	2,159	13,6392	59
Służba zdrowia	1,731	0,65	0,557	2,938	11
Wspólnoty mieszkaniowe	21,8791	0	4,1655	26,0446	136
Wyznaniowe	0,464	0	0,056	0,52	11
Suma	**122,0027**	**2,6403**	**19,0262**	**143,6692**	2181

Tabela 7.4.1.2. Główne zakłady pracy w Koninie zasilane przez MPEC Konin (na podstawie wyników ankietyzacji – Miejskie Przedsiębiorstwo Energetyki Cieplnej oraz Urząd Miasta w Koninie)

Table 7.4.1.2. Main companies in Konin supplied by MPEC Konin (based on the poll results – Municipal Heat Supply Company in Konin and Municipality of Konin)

Najwięksi odbiorcy zasilani z sieci nr 1 przez MPEC Konin	Moc zamówiona [MW]
Aluminium Konin – Impexmetal S.A.	4,2
Fabryka Urządzeń Górnictwa Odkrywkowego FUGO S.A. w Koninie ul. Przemysłowa 85	3,25
Wojewódzki Szpital Zespolony	1,3
Przedsiębiorstwo Komunikacji Samochodowej w Koninie Spółka Akcyjna	1,3
Pradera Galeria Konin Spółka z o.o. z siedzibą w Warszawie	1,14

7.4.2. Koncepcyjny model geologiczny i parametry hydrogeotermalne

Model budowy geologicznej strefy Konina opracowano na podstawie danych archiwalnych i publikowanych wykorzystując m.in. prace Góreckiego (red. 2006), informacje zawarte w rozdziale 4 i 5 oraz dokumentacje wynikowe istniejących otworów.

Strefa Konina znajduje się w obrębie SW skrzydła nieckowatej struktury dolnojurajskiej, w obrębie której wytypowano również strefę Ślesina (w części północnej) i strefę Turka (od strony SE). W obszarze wytypowanej strefy Konina nie wykonano w przeszłości otworów wiertniczych. Od strony wschodniej, poza granicami strefy, w dalszej części analizowanej struktury geologicznej zlokalizowany jest otwór Trześniew 1 (Wysocka-Kudła 1990). Model koncepcyjny badanej strefy oparto na regionalnym rozpoznaniu budowy geologicznej, przekrojach geologicznych, uwzględniających dane z nielicznych i odległych otworów wiertniczych oraz profili sejsmicznych, a także map stropów poszczególnych serii stratygraficznych (Górecki (red.) 2006). Elementy strukturalne modelu geologicznego tej strefy zostały przedstawione na załącznikach 7.4.1 i 7.4.2.

Strefa Konina stanowi fragment niecki mogileńsko-łódzkiej, która powstała na miejscu tzw. garbu wielkopolskiego, istniejącego w jurze dolnej i środkowej. Występowała tam wyraźnie zredukowana miąższość osadów. Od NE garb sąsiadował z bruzdą kujawską – strefą szybkiego wzrostu miąższości osadów jury dolnej i środkowej, związaną prawdopodobnie z synsedymentacyjną dyslokacją Gopła––Lutomierska. Strefa Konina stanowi peryferyjną, SW część regionalnej strefy dyslokacji, przebiegającej w kierunku NW-SE, równolegle do większości uskoków w podpermskim podłożu oraz do strefy tektonicznej Teisseyre'a–Tornquista (T–T), która spowodowała powstanie w obszarze niecki mogileńsko-łódzkiej szeregu antyklin.

Pionowe ruchy tektoniczne, które odżyły w obrębie bloków podpermskiego podłoża pod naciskiem grubego kompleksu osadów cechsztyńsko-mezozoicznych, uaktywniły działalność halokinetyczną. Najsilniejszy etap wypiętrzeń struktur solnych w strefach naruszeń tektonicznych nastąpił w czasie ruchów laramijskich. Rozwój zjawisk halotektonicznych wzdłuż uskoków lub na ich przecięciu powodował powstawanie struktur solnych o różnych kształtach i sile wypiętrzenia. Początki tego procesu prawdopodobnie sięgają okresu po sedymentacji osadów wapienia muszlowego (trias środkowy) trwającego do młodszego mezozoiku. Pełne uaktywnienie soli cechsztyńskich nastąpiło po sedymentacji utworów retyku (trias górny), na co duży wpływ miały orogeniczne ruchy starokimeryjskie.

W obszarze niecki mogileńsko-łódzkiej, oprócz dojrzałych struktur solnych występują niedojrzałe słupy solne oraz poduszki solne i związane z nimi antykliny. Jedną z takich struktur jest antyklina związana z poduszką solną Trzemżala, na NW od strefy Konina, której dolnojurajskie osady pogrążają się na NE w kierunku wału kujawskiego. Niewykluczone, że podobne poduszki solne występują w okolicach Konina i Turka. W efekcie, w omawianej strefie Konina miąższość osadów dolnojurajskich zwiększa się do ponad 300 m – także w kierunku NE (zał. 7.4.2).

W jurze górnej warunki sedymentacji w obrębie garbu wielkopolskiego i bruzdy kujawskiej były zbliżone. W omawianym rejonie mobilność zbiornika sedymentacyjnego i początek ruchów inwersyjnych zaznaczyły się już w kredzie dolnej (zał. 7.4.2). Od kredy górnej, w czasie ruchów tektonicznych orogenezy alpejskiej, pojawiające się ruchy inwersyjne doprowadziły do powstania w miejscu bruzdy kujawskiej – wału, a w miejscu garbu wielkopolskiego – niecki mogileńsko-łódzkiej. Duże miąższości osadów kredy w jej części SE (zwłaszcza kredy górnej), związane były ze wzmożoną subsydencją dna zbiornika sedymentacyjnego.

Niecka mogileńsko-łódzka, o osi równoległej do wału kutnowskiego na NE, jest asymetryczna, a jednocześnie pogłębia się w tym kierunku. Wypełniają ją miąższe osady kredy, które przykrywają utwory jury, triasu i permu.

Tworzące się wówczas osady powstawały w basenie o silnie zróżnicowanym dnie, gdyż rozwój struktur halokinetycznych powodował znaczne zmiany szybkości subsydencji. W strefie Konina efekty tych procesów są mniej wyraźnie zaznaczone w obrębie utworów jury dolnej niż w innych częściach niecki mogileńsko-łódzkiej, lecz wyraźnie widoczne w odniesieniu do utworów kredy dolnej. Niemniej i tutaj ewolucyjne pogłębianie i spłycanie dna zbiornika musiało wpływać na zmienną miąższość i powstawanie utworów dolnojurajskich różnych facji. Przypuszczalnie, tak jak w innych częściach niecki, sedymentacja odbywała się na przemian w środowisku lądowym i płytkomorskim. W fazach transgresywnych zapewne najczęściej osadzały się heterolity i piaskowce płytszego szelfu, a jedynie lokalnie być może ilasto-mułowcowe utwory głębszego szelfu klastycznego. W fazach regresywnych mogły się tworzyć utwory deltowe, fluwialne i bagienne o zróżnicowanej litologii. W profilu jury dolnej powinny tutaj dominować relatywnie miąższe kompleksy wodonośnych utworów piaskowcowych, od drobno- do gruboziarnistych (hetangu, synemuru, górnego pliensbachu i górnego toarku), którym mogą towarzyszyć kompleksy nieciągłych serii osadów słabo przepuszczalnych i praktycznie nieprzepuszczalnych, wykształcone w postaci zwięzłych drobnoziarnistych piaskowców i mułowców (Górecki (red.) 1995). Powinny je przedzielać dwa miąższe iłowcowe kompleksy izolujące. Starszy, który powstał w niecce we wczesnym pliensbachu. Młodszy, powstały w toarku dolnym, na ogół zwarty kompleks szarozielonych iłowców i mułowców o stałej miąższości 70–90 m (Górecki (red.) 2006).

Spąg kompleksu wodonośnych utworów dolnojurajskich w strefie Konina mogą tworzyć utwory różnych ogniw triasu, głównie niezawodnione skały retyku. Mogą to być utwory zbliżone do stwierdzonych w otworze Przybyłów 1 (Pernal 1989), zlokalizowanym w obrębie strefy Koła, podobne do nawierconych w otworze Turek 2 (por. rozdział 4.2.1) w strefie Turka, czy też w otworze Wilczna-1 (Wróbel 1970) na SW od strefy Ślesina. Mogą to być zatem piaskowce i iłowce, o miąższości mniejszej niż w Wilcznej (gdzie wynosi ona ponad 1000 m), lecz nie mniejszej niż 700 m (zał. 7.4.2). Przez analogię do danych dla podobnych osadów występujących w otworze Koło IG-4 (Dembowska, Marek (red.) 1990) ich porowatość efektywna może wynosić 1–2% i tylko lokalnie może wzrastać do 5%. Natomiast w miejscach, gdzie serię utworów górnotriasowych tworzą iłowce leżące na wapieniach, podobnie jak w otworze Trześniew 1 (Wysocka-Kudła 1990) na wschód od strefy Koła, można przyjąć przez analogię, że porowatości efektywne są w nich niższe od 1% i tylko lokalnie, we wkładkach mułowcowych i piaskowcowych mogą wynosić około 1,6%. Utwory te można uznać za generalnie nieprzepuszczalne.

Strop utworów dolnojurajskich w strefie Konina mogą tworzyć niezawodnione lub słabo-wodonośne osady jury środkowej. Przez analogię do danych z dokumentacji wynikowej otworu Ponętów 1 (strefa Koła; Lis-Martyniak 1973) oraz zawartych w rozdziale 4.2.1, mogą to być piaskowce, wapienie, mułowce i iłowce serii piaskowca wapnistego o miąższości około 300 m (zał. 7.4.2). Według danych z otworu Ponętów 1, wartości porowatości efektywnej wynoszą tam od 4,17% w wapieniach do 9,47% w piaskowcach, natomiast przepuszczalności 3,2 mD w piaskowcach i 73,3 mD w wapieniach. Jeśli w strefie Konina, w stropie serii złożowej występują także utwory analogiczne do stwierdzonych w otworze Banachów 1 (Marek, Feldman 1986) w strefie Koła (piaskowce, mułowce, iłowce, piaskowce dolomityczne, wapienie piaszczyste, łupki mułowcowe, łupki ilasto-mułowcowe oraz łupki ilaste), to

w nawiązaniu do danych z tego otworu, wartości porowatości efektywnej mogą wówczas wynosić od około 1,31% w iłowcach do 4,42% w piaskowcach (przy przepuszczalności do 0,18 mD) lub jak dla podobnych utworów w otworze Koło IG-4 – od 1% w piaskowcach do 6% w mułowcach.

Według obecnego stanu rozpoznania najkorzystniejsze warunki zbiornikowe w strefie Konina powinny występować w utworach dolnej jury w NE części strefy.

Parametry hydrogeotermalne serii złożowej podano na podstawie danych archiwalnych i zawartych w rozdziałach 4.2.1 i 5.4 oraz dokumentacji wynikowych analizowanych otworów.

Strop utworów jury dolnej w strefie Konina zalega na głębokościach od ponad –2200 m n.p.m. na SW do ponad –2700 m n.p.m. na NE (zał. 7.4.2). Miąższość utworów dolnojurajskich w części perspektywicznej analizowanej strefy (temperatura w stropie ponad 90°C) jest niższa od 100 m. Miąższość badanych utworów rośnie w kierunku NE i maleje w kierunku wschodnim. W otworze Trześniew 1 (znajdującym się poza omawianą strefą; Wysocka-Kudła 1990) wynosi około 10 m, a jednocześnie około 30% miąższości stanowią tutaj iłowce, występujące w spągu.

Temperatury w stropie utworów dolnojurajskich mieszczą się w interwale pomiędzy 90 i 110°C, wzrastając w kierunku NE. Występują tutaj solanki typu Na-Cl, o mineralizacji około 75 g/dm^3. Zasolenie wód rośnie w kierunku północnym.

Parametry zbiornikowe piaskowców dolnojurajskich zestawiono poniżej na podstawie danych ujętych w rozdziałach 4.2.1 i 5.4 oraz archiwalnych danych otworowych.

Porowatość efektywna (regionalna) wodonośnych utworów dolnojurajskich niecki mogileńsko-łódzkiej wynosi od 7,95 do 25,35% (średnio 18,3%). Przez analogię do obserwacji w strefie Koła (i w pobliżu tego rejonu), tj. w obrębie tej samej rozległej nieckowatej struktury wypełnionej osadami dolnojurajskimi, w której wskazano także strefy Turka i Ślesina, w strefie Konina można się spodziewać porowatości efektywnych rzędu 7–13% w partiach silniej wodonośnych oraz 1–4% w partiach słabo zawodnionych. Wartość 7,18% występuje w strefie Koła w otworze Banachów IG-1 na głęb. 3344,5 m p.p.t. (por. rozdział 5.4), wartość 13,38% – w otworze Koło IG-4 na głęb. 2766,5 m p.p.t., wartość 1% – w otworze Koło IG-4 na głęb. 2770,5–2771,7 m p.p.t., a wartość 4% w otworze Koło IG-3 (Dembowska, Marek (red.) 1990) na głęb. 3080,5–3090,8 m p.p.t.

Współczynnik przepuszczalności (regionalny) dla niecki mogileńsko-łódzkiej wynosi od kilkudziesięciu mD do 1627,2 mD (średnio 285,35 mD). W strefie Konina współczynniki przepuszczalności skał dolnojurajskich w brzeżnych partiach utworzonej nieckowatej struktury (w strefie poduszki solnej Trzemżala) mogą być porównywalne z przedstawionymi w rozdz. 5.4 dla próbek rdzeni z otworu Banachów IG-1, zlokalizowanego w strefie Koła poza strukturą zrębów, (wschodnia część Kotliny Kolskiej), a mianowicie: 2,291 mD (w kierunku X), 0,981 mD (w kierunku X) i 0,141 mD (w kierunku Z). Porównywalne wartości – 2,971 mD (w kierunku X) – stwierdzono w otworze Koło IG-4 dla próby z głęb. 2732,4 m p.p.t., podobnie usytuowanym w stosunku do struktury zrębowej jak otworze Banachów IG-1, lecz w obrębie zachodniej części Kotliny Kolskiej. Natomiast w otworze Koło IG-4 na głęb. 2766,5 m p.p.t. wartość przepuszczalności określono jako 129,023 mD (por. rozdział 5.4). Można zatem przypuszczać, że w NE części strefy Konina wartość przepuszczalności może wzrastać do co najmniej 150 mD.

Współczynnik filtracji (regionalny) dla niecki mogileńsko-łódzkiej wynosi od $9{,}48 \cdot 10^{-8}$ do $1{,}2 \cdot 10^{-5}$ m/s (średnio $2{,}11 \cdot 10^{-6}$ m/s). W strefie Konina potencjalna wydajność otworów wiertniczych szacowana jest na poniżej 150 m^3/h. Jednak na NE mogą wystąpić wydajności przekraczające nawet 200 m^3/h.

Przedstawiony koncepcyjny model geologiczny strefy Konina, obejmujący mapę ukształtowania stropu zbiornika jurajskiego, przekroje geologiczne z oszacowanymi miąższościami utworów, wskazanymi parametrami hydrogeotermalnymi oraz danymi litostratygraficznymi – stanowił podstawę do opracowania numerycznego modelu przestrzennego rozkładu temperatur i ciśnień w analizowanej strefie.

7.4.3. Model numeryczny termiki górotworu

Model numeryczny został podzielony na 20 poziomych warstw – 14 o miąższości około 80 m i 6 warstw o miąższości 25 m – w najbardziej perspektywicznej, spągowej części utworów jury dolnej (rys. 7.4.3.1). Elementy obliczeniowe, o kształcie nieregularnym, skoncentrowano w sąsiedztwie założonej lokalizacji otworów produkcyjnego oraz chłonnego.

W modelu wykorzystano warunek brzegowy I rodzaju ($T(t)$, $p(t)$ = const. – warunek Dirichleta) oraz warunek brzegowy II rodzaju (gęstość strumienia cieplnego q = const. – warunek Neumanna). W części stropowej modelu założono stałe w czasie wartości ciśnienia złożowego oraz temperatury. Natomiast w najniższej warstwie modelu, na głębokości –3300 m n.p.m., założono stały dopływ ciepła o gęstości strumienia równej 70 mW/m^2 (Szewczyk, Gientka 2009) (zał. 7.4.3 – rys. 1). Przyjęto, że wpływ eksploatacji złoża, tj. zmiana temperatury oraz ciśnienia złożowego w warstwach wodonośnych, nie będzie zaznaczał się w warstwach granicznych modelu. Założenie to jest wynikiem uwzględnienia relatywnie dużej miąższości oraz niskiej lub bardzo niskiej przepuszczalności warstw, które oddzielają złożowe warstwy wodonośne od warstw granicznych modelu numerycznego. Średnią temperaturę dla stropu modelu o rzędnej –2000 m n.p.m. (około 2100 m p.p.t.) przyjęto według Góreckiego (red.) 2006.

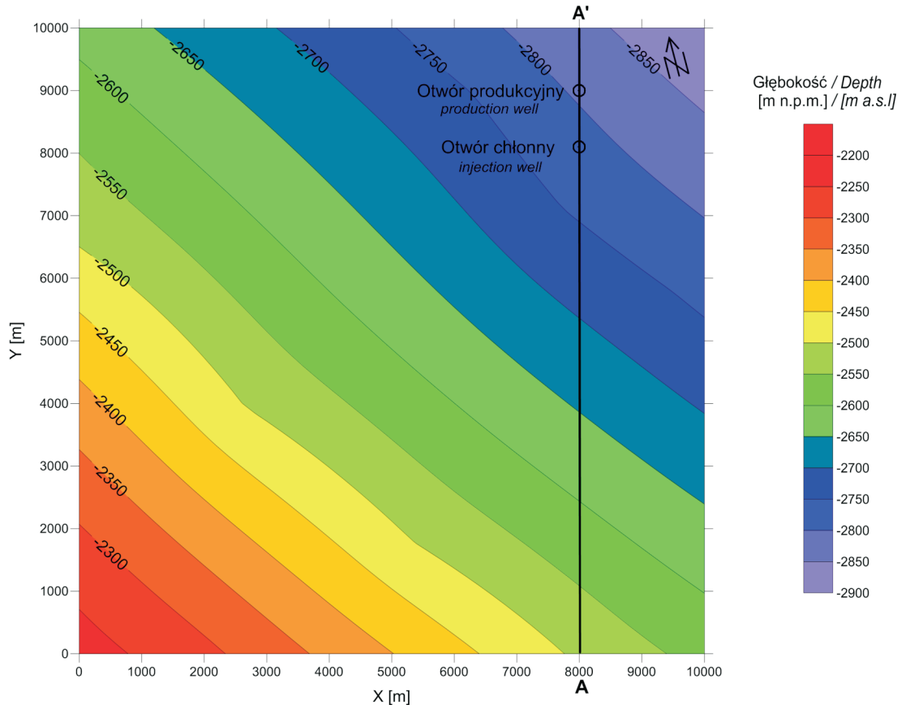
Ukształtowanie powierzchni strukturalnych utworów triasu, jury oraz kredy zaczerpnięto m.in. z *Atlasu zasobów geotermalnych formacji mezozoicznej na Niżu Polskim* (Górecki (red.) 2006). W modelowanym rejonie spąg utworów jury dolnej zalega najgłębiej na NE, na głębokości od około –2800 do około –2900 m n.p.m. (rys. 7.4.3.1). Obszar ten charakteryzuje się również najwyższymi temperaturami. Całkowita miąższość utworów jury dolnej w modelowanym rejonie jest poniżej 100 m, natomiast w miejscach proponowanej lokalizacji dubletu otworów wynosi około 75–80 m.

W tabeli 7.4.3.1 zaprezentowano zestawienie parametrów petrofizycznych kompleksów skalnych wydzielonych dla modelu rejonu Konina.

Kalibracja modelu numerycznego termiki górotworu polegała na wykonaniu szeregu symulacji, mających na celu odtworzenie warunków termicznych w analizowanym rejonie Konina. Za punkt odniesienia przyjęto dane zawarte na mapach temperatury w stropie poszczególnych jednostek stratygraficznych, przedstawiony przez Góreckiego (red. 2006).

W stropie modelu na rzędnej –2000 m n.p.m. przyjęto stałą temperaturę 76°C. Temperatura w spągu modelu stymulowana była przez dopływ ziemskiego strumienia ciepła o gęstości 70 mW/m^2. Znając gęstość powierzchniowego strumienia ciepła oraz prognozowany gradient geotermiczny w jednostkach stratygraficznych (kompleksach) objętych modelowaniem, wyznaczono przewodności cieplne skał, korzystając z prawa Fouriera.

Na załączniku 7.4.3 – rys. 2 przedstawiono rozkład temperatury według modelu stanu stacjonarnego, wzdłuż przekroju A'A (rys. 7.4.3.1). Temperatury spodziewane w poziomach perspektywicznych,



Rys. 7.4.3.1. Szkic strukturalny spągu utworów jury dolnej w modelowanym rejonie Konina wraz z zakładaną lokalizacją otworów eksploatacyjnego oraz chłonnego

Fig. 7.4.3.1. Structural diagram of the bottom of the lower Jurassic structures in the modelled Konin region, including the assumed production and injection well locations

tj. w pobliżu spągu utworów jury dolnej przedstawiono na rysunku 7.4.3.2. Maksymalna prognozowana temperatura na głębokości około –2800 m n.p.m. (ok. 2900 m p.p.t.) powinna wynieść około 100°C.

7.4.4. Program technologiczny zastosowania systemu binarnego

Zgodnie z informacjami z rozdziału 7.4.2. w wytypowanej strefie Konina brak głębokich otworów wiertniczych. W odległości około 15–20 km od miasta Konin (poza obszarem badań) znajdują się dwa otwory, w których nawiercono utwory triasu dolnego: otwór Wilczna 1 (Wróbel 1970) na zachód od miasta, o głębokości 3205,2 m p.p.t., oraz znajdujący się na wschód od modelowanego rejonu otwór Trześniew 1 o głębokości 4532 m p.p.t. (Wysocka-Kudła 1990). Oddalenie wskazanych wierceń wyklucza możliwość ich rekonstrukcji/adaptacji dla potrzeb pozyskania energii geotermalnej w systemach binarnych. Stąd pozyskanie tej energii wymaga w rozpatrywanej strefie wykonania co najmniej jednego nowego dubletu geotermalnego, obejmującego otwór eksploatacyjny i chłonny.

Biorąc pod uwagę głębokość zalegania głównego zbiornika hydrogeotermalnego tzn. jury dolnej w niniejszej pracy przyjęto głębokość otworu eksploatacyjnego 2897 m p.p.t. i otworu chłonnego 2873 m p.p.t.

Tabela 7.4.3.1. Struktury geologiczne tworzące model i ich parametry geologiczne

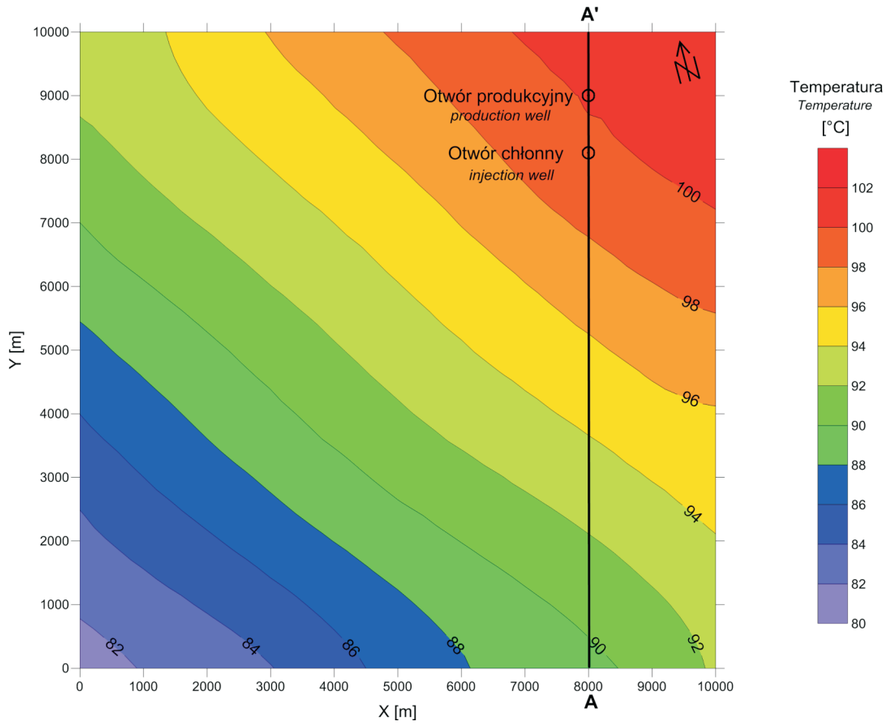
Table 7.4.3.1. Geological structures constituting the model and their geological parameters

Nr	Formacja/ Struktura	Opis	Oznaczenie w modelu	Porowatość efektywna [%]	Gęstość [kg/m^3]	Przepuszczalność [mD]		Ciepło właściwe [J/(kg·K)]	Współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m·K)]
						XY	Z		
1	T1	nieprzepuszczalne utwory triasu dolnego		2	2600	0,1	0,1	900	2,3
2	T2	iłowce, mułowce oraz wapienie triasu środkowego		2	2600	0,1	0,1	900	2,3
3	T3	iłowce i mułowce triasu górnego		2	2600	0,1	0,1	900	2,3
4	J1	dominujące kompleksy piaskowców; mniejszościowe udziały mułowców oraz iłowców		12	2600	150	15	900	3,2
5	J2	mułowce i piaskowce jury środkowej		5	2600	1	1	900	2,3
6	J3	wapienie i mułowce jury górnej		1	2600	0,1	0,1	900	2,3
7	K1	kompleksy piaskowców z wkładkami iłowców kredy dolnej		15	2600	500	100	900	2,1
8	K2	margle i wapienie kredy górnej		3	2600	0,1	0,1	900	2,1

7.4.4.1. Modelowanie wpływu zmian parametrów eksploatacyjnych na uzyskiwane efekty pracy binarnej elektrociepłowni geotermalnej

Uwzględniając specyfikę występowania złoża geotermalnego i zbliżone warunki hydrogeotermalne do prezentowanych dla strefy Koła i Turka (por. rozdział 7.2 i 7.3), przeprowadzono analizę doboru najlepszych parametrów pracy systemu ORC. Wyniki przeprowadzonej analizy zaprezentowano w tabelach 7.4.4.1–7.4.4.3. Obliczenia wykonano dla trzech oczekiwanych temperatur końcowych wody termalnej (woda schłodzona w systemie energetycznym) T_{g2} :

- **wariant A** – woda termalna zasila tylko elektrownię geotermalną (po zasileniu elektrowni będzie kierowana do odwiertu chłonnego) – wybrano te parametry pracy elektrowni, przy których moc elektrowni jest najwyższa;



Rys. 7.4.3.2. Temperatura prognozowana w spągu utworów jury dolnej rejonu Konina, według modelu stanu stacjonarnego

Fig. 7.4.3.2. Forecasted temperature in the bottom of the lower Jurassic structures in the Konin region, according to the steady state model

- **wariant B** – woda termalna będzie wykorzystywana również na potrzeby ciepłownicze lub do innych procesów technologicznych – do obliczeń przyjęto T_{g2}^{B} = 60°C;
- **wariant C** – woda termalna będzie wykorzystywana na potrzeby technologii basenowej i/lub cele balneologiczne – do obliczeń przyjęto T_{g2}^{C} = 47°C.

Oznaczenia prezentowane tabelach są zgodne z opisem przedstawionym w rozdziale 6.2 oraz ze schematem zaprezentowanym na rysunku 6.2.5.1.

Na podstawie analizy przedstawionej w tabeli 7.4.4.1, dla wody termalnej o temperaturze około 98°C, przy wydajności ujęcia na poziomie 150 m^3/h maksymalną moc elektrowni (457,6 kW) uzyskuje się przy zastosowaniu czynnika R227ea i temperaturze jego odparowania 64°C. Woda termalna schładzana jest w takim przypadku do temperatury 55°C. Przy założeniu, że woda termalna po zasileniu elektrowni zostanie schłodzona do temperatury 60°C (wariant B, tab. 7.4.4.2), najwyższą moc (452,7 kW) osiągnie się również przy zastosowaniu czynnika R227ea w temperaturze odparowania 70°C. Dla wariantu C (tab. 7.4.4.3) moc maksymalna elektrowni wynosi 417,3 kW, przy zastosowaniu tego samego czynnika roboczego i jego odparowaniu w temperaturze 54°C.

Rodzaj zastosowanego czynnika roboczego znacząco wpływa na wielkość mocy elektrowni, przy czym należy rozpatrywać zespół cech i właściwości czynnika roboczego zarówno termodynamicznych jak i eksploatacyjnych. Trudno jest określić, w jakim stopniu rodzaj czynnika pod kątem jego kształtu krzywych nasycenia (suchy, mokry) wpływa na efektywność pracy siłowni, gdyż tylko jeden z rozpatrywanych czynników zalicza się do grupy mokrych (metanol), natomiast zauważalny jest wpływ temperatury krytycznej czynnika. Dla czynników o niższych wartościach temperatury krytycznej zazwyczaj osiągano lepszą efektywność pracy elektrowni geotermalnej.

7.4.4.2. Wyniki obliczeń wskaźników energetycznych

W tabeli 7.4.4.4 przedstawiono wartości maksymalnego strumienia ciepła i maksymalnych ilości ciepła możliwych do pozyskania w ciągu roku z ujęcia geotermalnego w strefie Konina. Zestawienia dokonano przy założeniu, że system wykorzystania energii geotermalnej jest w stanie schłodzić wodę termalną do temperatury T_{g2T} = 30°C. Jest to jednoznaczne z tym, że temperatura wody termalnej zatłaczanej do górotworu wynosi T_{g2} = 30°C.

W obliczeniach tych, zgodnie z początkowym założeniem upraszczającym (por. rozdział 6.2), pominięto wielkość strat cieplnych związanych z przesyłem.

Na podstawie przeprowadzonej ankietyzacji ustalono, że roczna rzeczywista produkcja ciepła w strefie Koła wynosi 1312 TJ.

Niezbędnym parametrem do określenia wskaźników energetycznych instalacji geotermalnej jest całkowita produkcja ciepła w ciągu roku. W celu określenia zdefiniowanych wcześniej (por. rozdział 6.2.) wskaźników w obliczeniach przyjęto, że przekazywanie energii cieplnej z wody termalnej do wody sieciowej odbywa się z 10% stratami ciepła w wymienniku geotermalnym. Zatem sprawność wykorzystania pozyskanej energii geotermalnej w wymienniku ciepłowniczym wynosi 90%.

W pierwszej kolejności rozważono teoretyczny układ ciepłowni geotermalnej zakładając, że ciepłownia ta w ciągu całego roku wykorzystuje maksymalny strumień wody termalnej (stały, maksymalny strumień energii geotermalnej). W analizie uwzględniono następujące przypadki:

- pierwszy, kiedy w ciepłowni istnieje możliwość schłodzenia wody termalnej do temperatury granicznej wynoszącej $T_{g2} = T_{g2T}$ = 30°C,
- drugi, kiedy w ciepłowni istnieje możliwość schłodzenia wody termalnej do temperatury wynoszącej T_{g2} = 40°C (przypadek współpracy sieci ciepłowniczej z odbiornikami średnio- i niskotemperaturowymi lub podgrzew ciepłej wody użytkowej),
- trzeci, kiedy w ciepłowni istnieje możliwość schłodzenia wody termalnej do temperatury wynoszącej T_{g2} = 75°C (przypadek, kiedy temperatura powrotna z systemu grzewczego wynosi 70°C).

Wartości wskaźników dla potencjalnej ciepłowni w strefie Konina, dla trzech powyższych przypadków zestawiono w tabeli 7.4.4.5.

W tabelach 7.4.4.6–7.4.4.8 przedstawiono wyniki oceny wskaźników energetycznych dla elektrociepłowni, przy założeniu trzech wariantów: A, B i C. Dla wszystkich wariantów elektrociepłowni przyjęto, podobnie jak dla ciepłowni, że w ciągu całego roku wykorzystywany jest stały strumień energii geotermalnej zarówno na cele produkcji elektrycznej jak i produkcji ciepła. W przypadku określania wskaźników energetycznych dla elektrociepłowni przyjęto dwie wartości temperatury wody termalnej opuszczającej wymiennik ciepłowniczy, tj.: 75°C oraz 40°C.

Tabela 7.4.4.1. Parametry termiczne i kaloryczne czynników roboczych oraz wyniki obliczeń dla wariantu A – maksymalizacja mocy elektrowni geotermalnej dla strefy KONIN

Table 7.4.4.1. Thermal and calorific parameters of the operating media, as well as calculation results for the option A – maximization of the geothermal plant power for the KONIN location

Lokalizacje KONIN: T_{g1} = 98°C, $\dot{V}_g$ = 150 m^3/h, ΔT_1 = 5K ΔT_S = 3K, wariant A																					
Woda termalna					Parametry charakterystyczne czynnika											Układ ORC					
czynnik roboczy	T_{g2}	T_{g3}	T_{g4}	ΔT_2	T_{n1}	h_{n1}	T_{n2s}	h_{n2s}	T_{n3}	h_{n3}	T_{n4s}	h_{n4s}	$T_{n5} = T_{n6}$	h_{n5}	h_{n6}	m_n	N_t	N_p	N_{ORC}	Q_d	η_{ORC}
	°C	°C	°C	°C	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	kJ/kg	kg/s	kW	kW	kW	kW	%
R227ea	55,0	69,0	96,9	32,9	67,0	365,5	41,7	354,0	30,0	234,6	30,5	235,2	64,0	277,7	362,1	53,9	497,1	39,5	457,6	7 024,4	6,5
R1234ze	58,3	69,0	97,2	33,2	67,0	249,9	35,1	232,9	30,0	64,9	30,5	65,6	64,0	115,2	246,1	35,2	476,5	33,7	442,7	6 474,6	6,8
R236fa	58,4	69,0	97,3	33,3	67,0	405,1	41,0	390,1	30,0	237,3	30,2	237,7	64,0	282,5	402,0	38,6	463,0	20,1	442,9	6 463,9	6,9
Izobutan	58,2	67,0	97,3	35,3	65,0	642,5	38,4	610,1	30,0	271,2	30,3	272,2	62,0	354,1	636,0	17,5	454,9	22,0	432,9	6 496,1	6,7
MM	58,1	67,0	97,3	35,3	65,0	139,0	49,4	116,0	30,0	–141,1	30,0	–141,0	62,0	–78,4	134,2	23,3	428,3	1,0	427,4	6 516,0	6,6
Metanol	60,3	62,4	95,6	38,2	93,0	1 173,8	30,0	1 068,4	30,0	–92,8	30,0	–92,7	57,4	–19,7	1 094,7	4,9	410,2	0,4	409,7	6 160,7	6,7

Tabela 7.4.4.2. Parametry termiczne i kaloryczne czynników roboczych oraz wyniki obliczeń dla wariantu B dla strefy KONIN

Table 7.4.4.2. Thermal and calorific parameters of the operating media, as well as calculation results for the option B for the KONIN location

Lokalizacje KONIN: T_{g1} = 98°C, T_{g2} = 60°C, $\dot{V}_g$ = 150 m^3/h, ΔT_S = 3K, wariant B																					
Woda termalna					Parametry charakterystyczne czynnika											Układ ORC					
czynnik roboczy	T_{g4}	ΔT_2	T_{g3}	ΔT_1	T_{n1}	h_{n1}	T_{n2s}	h_{n2s}	T_{n3}	h_{n3}	T_{n4s}	h_{n4s}	$T_{n5} = T_{n6}$	h_{n5}	h_{n6}	m_n	N_t	N_p	N_{ORC}	Q_d	η_{ORC}
	°C	°C	°C	°C	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	kJ/kg	kg/s	kW	kW	kW	kW	%
R227ea	97,0	27,0	74,5	4,5	73,0	368,4	42,9	355,1	30,0	234,6	30,6	235,3	70,0	286,0	364,8	46,6	495,5	42,9	452,7	6 201,7	7,3
R1234ze	97,2	31,2	70,8	4,8	69,0	250,8	35,2	233,0	30,0	64,9	30,5	65,6	66,0	118,3	247,0	33,5	477,3	34,7	442,6	6 201,7	7,1
R236fa	97,3	33,3	68,9	4,9	67,0	645,0	38,8	610,7	30,0	271,2	30,3	272,3	64,0	359,6	638,5	16,7	456,2	22,6	433,6	6 201,7	7,0
Izobutan	97,3	33,3	68,9	4,9	67,0	645,0	38,8	610,7	30,0	271,2	30,3	272,3	64,0	359,6	638,5	16,7	456,2	22,6	433,6	6 201,7	7,0
MM	97,4	33,4	68,9	4,9	67,0	142,1	50,5	117,7	30,0	–141,1	30,0	–141,0	64,0	–74,4	137,2	21,9	427,1	0,9	426,2	6 201,7	6,9
Metanol	95,7	38,6	62,2	5,1	92,0	1 172,2	30,0	1 068,4	30,0	–92,8	30,0	–92,8	57,0	–20,8	1 094,3	4,9	407,1	0,4	406,7	6 201,7	6,6

Tabela 7.4.4.3. Parametry termiczne i kaloryczne czynników roboczych oraz wyniki obliczeń dla wariantu C dla strefy KONIN

Table 7.4.4.3. Thermal and calorific parameters of the operating media, as well as calculation results for the option C for the KONIN location

Lokalizacje KONIN: T_{g1} = 98°C, T_{g2} = 470°C, $\dot{V}_g$ = 150 m^3/h, ΔT_S = 3K, wariant B																					
Woda termalna					Parametry charakterystyczne czynnika											Układ ORC					
czynnik roboczy	T_{g4}	ΔT_2	T_{g3}	ΔT_1	T_{n1}	h_{n1}	T_{n2s}	h_{n2s}	T_{n3}	h_{n3}	T_{n4s}	h_{n4s}	$T_{n5} = T_{n6}$	h_{n5}	h_{n6}	m_n	N_t	N_p	N_{ORC}	Q_d	η_{ORC}
	°C	°C	°C	°C	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	kJ/kg	kg/s	kW	kW	kW	kW	%
R227ea	96,7	42,7	59,0	5,0	57,0	360,3	39,3	351,9	30,0	234,6	30,3	235,0	54,0	264,5	357,1	66,4	447,5	30,1	417,3	8 323,4	5,0
R1234ze	97,0	47,0	55,2	5,2	53,0	242,7	34,4	232,2	30,0	64,9	30,2	65,2	50,0	93,7	239,3	46,9	393,7	22,8	370,8	8 323,4	4,5
R236fa	97,1	47,1	55,3	5,3	53,0	396,3	37,6	387,1	30,0	237,3	30,1	237,5	50,0	263,4	393,4	52,4	385,3	14,0	371,3	8 323,4	4,5
Izobutan	97,1	49,1	53,5	5,5	51,0	624,2	35,8	605,3	30,0	271,2	30,1	271,7	48,0	316,8	618,2	23,6	357,6	14,5	343,1	8 323,4	4,1
MM	97,1	47,1	54,6	4,6	53,0	120,8	43,0	106,1	30,0	–141,1	30,0	–141,0	50,0	–102,2	116,1	31,8	372,9	0,9	372,0	8 323,4	4,5
Metanol	96,4	53,0	48,5	5,1	58,0	1 119,8	30,0	1 068,4	30,0	–92,8	30,0	–92,8	43,4	–57,8	1 081,5	6,9	282,2	0,2	282,0	8 323,4	3,4

Tabela 7.4.4.4. Wartości maksymalnych strumieni ciepła i ilości ciepła możliwego do pozyskania w ciągu roku z ujęcia geotermalnego w strefie Konina

Table 7.4.4.4. Values of maximum heat fluxes and heat capacities available to be obtained annually from the geothermal source in Konin area

Parametry ujęcia geotermalnego					Ilość ciepła			
Lokalizacja	$\dot{V}_g$	T_{g1}	ρ	$c_{p,g}$	$\dot{Q}_{g\,max}$	$Q_{g\,max}$	$Q_{g\,max}$	$Q_{g\,max}$
	m^3/h	°C	kg/m^3	kJ/(kg K)	kW	TJ	kWh	GWh
Konin	150	98	1015,1	3,86	11098	350	97 218 480	97

Tabela 7.4.4.5. Wartości wskaźników dla ciepłowni w strefie Konina, dla przyjętych założeń upraszczających

Table 7.4.4.5. Index values for the heating plants in Konin area, according to the accepted simplification assumptions

Lokalizacja	$\dot{V}_g$	T_{g1}	T_{g2}	Q_{CO}	$Q_{g\,max}$	Q_g	$Q_{CO\,g}$	E_g	Z_g	ξ_g
	m^3/h	°C	°C	TJ	TJ	TJ	TJ	–	–	–
Konin	150	98	30	1312	350	350	315	**1,000**	**0,240**	**0,900**
			40			299	269	**0,854**	**0,205**	**0,769**
			75			118	106	**0,337**	**0,081**	**0,303**

7.4.5. Model numeryczny pracy dubletu geotermalnego

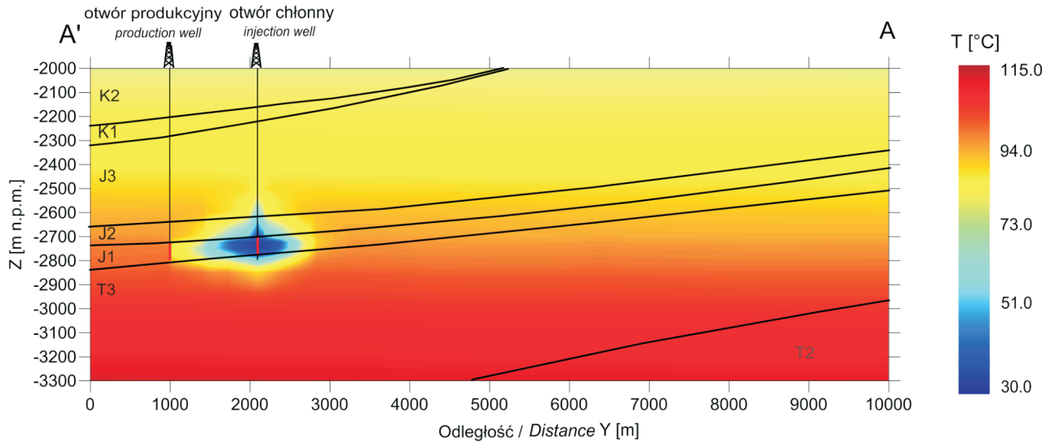
Modelowanie numeryczne pracy dubletu geotermalnego wykonano dla oceny zmian temperatury eksploatowanej wody termalnej oraz prognozy zmian ciśnienia eksploatacyjnego i wymaganego dla zatłaczania wody schłodzonej, w 50-letnim cyklu pracy systemu binarnego.

W strefie Konina poziom perspektywiczny dla eksploatacji energii geotermalnej stanowią horyzonty wodonośne w utworach jury dolnej, w których prognozowana temperatura złożowa może wynosić około 100°C na głębokości około 2900 m p.p.t. W strefie perspektywicznej miąższość osadów jury dolnej wynosi około 75 m, założona przepuszczalność horyzontalna 150 mD, a mineralizacja wód zbiornikowych około 75 g/dm^3. W modelowaniu eksploatacji dubletu geotermalnego wykorzystano moduł TOUGH2-EWASG, uwzględniający wpływ zasolenia wód.

Dla całego analizowanego przedziału czasu objętego modelowaniem przyjęto stałą wydajność dubletu równą 150 m^3/h. W modelu przyjęto także, że odległość pomiędzy otworem produkcyjnym i chłonnym będzie wynosić 1100 m. Wobec przyjętej wartości przepuszczalności poziomej oraz niewielkiej miąższości utworów jury dolnej dystans ten powinien być wystarczający dla uzyskiwania stabilnej temperatury na wypływie przez cały 50-letni założony okres symulowanej eksploatacji, podczas której spadek temperatury złożowej w otworze produkcyjnym nie powinien przekroczyć 5°C.

Przeprowadzona symulacja wskazuje, że prognozowany spadek ciśnienia złożowego w strefie otworu produkcyjnego wyniesie około 1,36 MPa (zał. 7.4.3 – rys. 3a i 4). Represja ciśnienia w otworze chłonnym, wywoływana zatłaczaniem schłodzonej solanki, wyniesie według obliczeń symulacyjnych około 2,81 MPa (zał. 7.4.3 – rys. 3b i 4). Przeszło 2-krotnie wyższe ciśnienie niezbędne do powrotnego wtłoczenia wody do złoża po 50 latach będzie efektem wzrostu wartości lepkości dynamicznej solanki, z około $3{,}9 \cdot 10^{-4}$ Pa·s do $9{,}6 \cdot 10^{-4}$ Pa·s, powodowanej głównie spadkiem temperatury. Wskazane wartości zmian ciśnienia (1,36 MPa oraz 2,81 MPa) uwzględniają wyłącznie warunki przepływu przez warstwę złożową, nie uwzględniają natomiast oporów przepływu w otworach, które mogą być istotne przy założonych wydajnościach rzędu 150 m^3/h. Korzystnym efektem eksploatacyjnym będzie wygrzewanie się otworu eksploatacyjnego, co wskutek wzrostu objętości wody powinno przyczynić się także do znacznego podniesienia zwierciadła wody w otworze produkcyjnym.

Wyniki symulacji analizowanego wariantu eksploatacji wskazują, że wychłodzenie wód złożowych w strefie przyfiltrowej otworu produkcyjnego wyniesie niespełna 4°C po okresie 50 lat (zał. 7.4.3 – rys. 3a). Na załączniku 7.4.3 – rys. 4 oraz na rysunku 7.4.5.1 przedstawiono charakter wychłodzenia strefy wzdłuż przekroju przechodzącego przez otwory. Symulacja wskazuje, że wychłodzenie złoża nastąpi głównie w rejonie otworu chłonnego – z malejącą intensywnością w kierunku otworu produkcyjnego. Pierwsze objawy niewielkiego spadku temperatury są prognozowane po okresie około 15–20 lat.



Rys. 7.4.5.1. Temperatura prognozowana w strefie Konina (przekrój A'A) po 50 latach eksploatacji instalacji binarnej

Fig. 7.4.5.1. Forecasted temperature in the Konin region (A'A cross-section) after 50 years of binary installation operation

7.4.6. Prognoza efektów finansowych, energetycznych, ekologicznych i społecznych

Głównym dostawcą energii cieplnej na terenie miasta Konin jest MPEC Konin. Całkowita moc zamówiona przez to przedsiębiorstwo w roku 2013 wynosiła 127,45 MW (wg rozdz. 7.4.1). Moc ta znacząco przewyższa możliwości źródła energii geotermalnej, przy uwzględnieniu parametrów roboczych miejskiej sieci ciepłowniczej. Dominujące parametry znamionowe pracy systemu dystrybucji energii to 130/70°C (wg rozdz. 7.4.1). Charakterystykę odbiorcy energii cieplnej wykorzystaną do obliczeń przedstawia rysunek 7.4.6.1. Mając je na uwadze maksymalną moc cieplną ujęcia geotermalnego oszacować można na 5,5 MW (rys. 7.4.6.2). Dużym atutem omawianej lokalizacji jest

Tabela 7.4.4.6. Wartości wskaźników energetycznych dla wariantu A – lokalizacja w miejscowości KONIN (na podstawie tabeli 7.4.4.1)

Table 7.4.4.6. Energy index values for the option A – KONIN location (based on Table 7.4.4.1)

Lokalizacja – KONIN: T_{g1} = 98°C, $\dot{V}_g$ = 150 m^3/h, Q_{CO} = 1 311 883 GJ, wariant A															
Układ ORC						Q_g		$Q_{CO\,g}$		Wskaźniki energetyczne					
										E_g		Z_g		ξ_g	
Czynnik	T_{g2}	N_{ORC}	Q_d	η_{ORC}	E_{el}	40	75	40	75	40	75	40	75	40	75
–	°C	kW	kW	%	TJ	TJ	TJ	TJ	TJ	–	–	–	–	–	–
R227ea	55	457,6	7 024,4	6,5	11,0	299	221	69	0	0,854	0,631	0,060	0,030	0,229	0,031
R1234ze	58,3	442,7	6 474,6	6,8	10,6	299	204	85	0	0,854	0,583	0,072	0,029	0,273	0,030
R236fa	58,4	442,9	6 463,9	6,9	10,6	299	204	85	0	0,854	0,583	0,072	0,029	0,273	0,030
Izobutan	58,2	432,9	6 496,1	6,7	10,4	299	205	84	0	0,854	0,586	0,071	0,029	0,270	0,030
MM	58,1	427,4	6 516	6,6	10,3	299	205	84	0	0,854	0,586	0,071	0,029	0,269	0,029
Metanol	60,3	409,7	6 160,7	6,7	9,8	299	194	94	0	0,854	0,554	0,079	0,027	0,297	0,028

Tabela 7.4.4.7. Wartości wskaźników energetycznych dla wariantu B – lokalizacja w miejscowości KONIN (na podstawie tabeli 7.4.4.2)

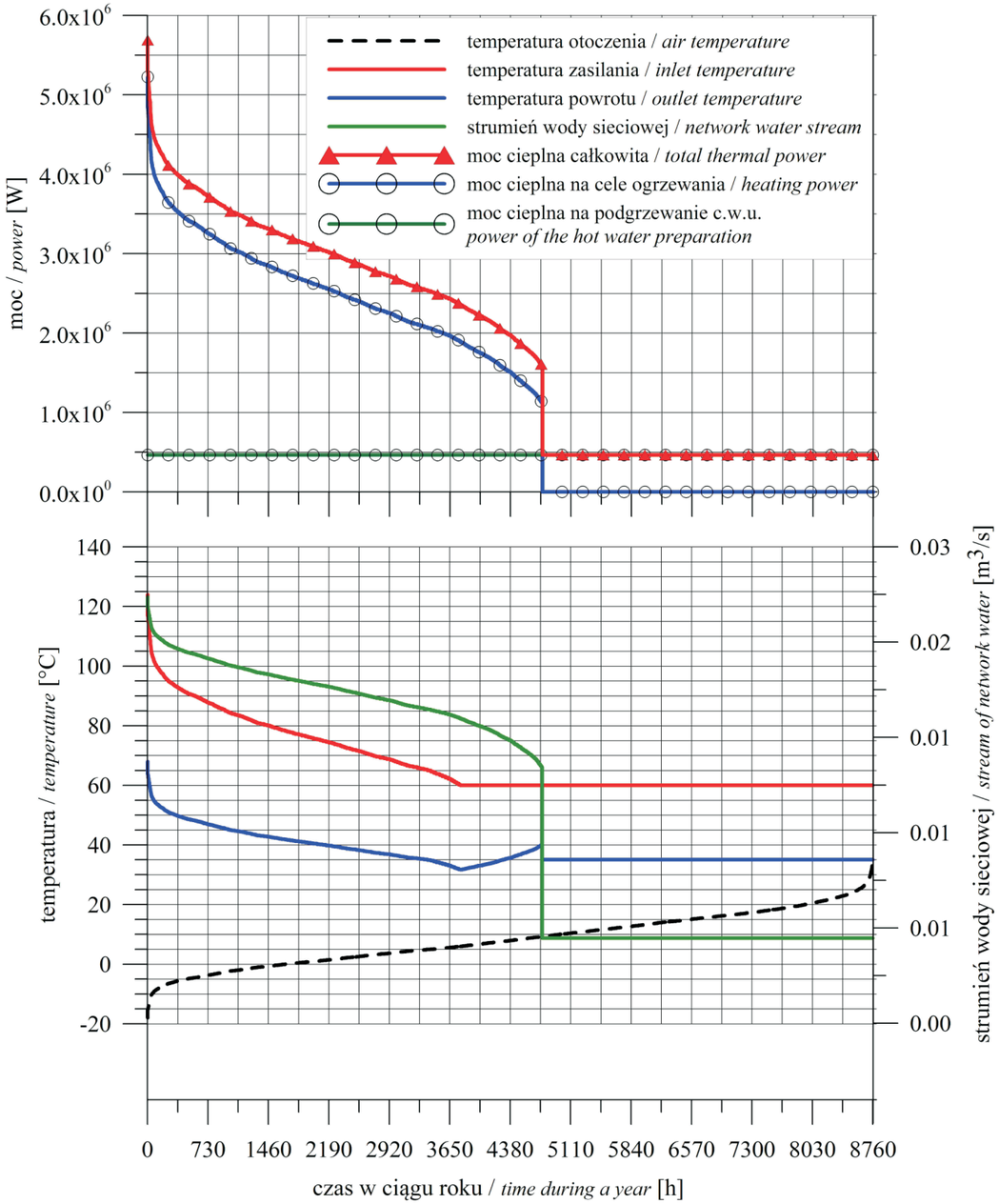
Table 7.4.4.7. Energy index values for the option B – KONIN location (based on Table 7.4.4.2)

Lokalizacja – KONIN: T_{g1} = 98°C, $\dot{V}_g$ = 150 m^3/h, Q_{CO} = 1 311 883 GJ, T_{g2} = 60°C, wariant A															
Układ ORC						Q_g		$Q_{CO\,g}$		Wskaźniki energetyczne					
										E_g		Z_g		ξ_g	
Czynnik	T_{g2}	N_{ORC}	Q_d	η_{ORC}	E_{el}	40	75	40	75	40	75	40	75	40	75
–	°C	kW	kW	%	TJ	TJ	TJ	TJ	TJ	–	–	–	–	–	–
R227ea	60	452,7	6 201,7	7,3	10,9	299	196	93	0	0,853	0,559	0,078	0,030	0,296	0,031
R1234ze	60	442,6	6 201,7	7,1	10,6	299	196	93	0	0,853	0,559	0,078	0,029	0,295	0,030
R236fa	60	433,6	6 201,7	7,0	10,4	299	196	93	0	0,853	0,559	0,078	0,029	0,294	0,030
Izobutan	60	433,6	6 201,7	7,0	10,4	299	196	93	0	0,853	0,559	0,078	0,029	0,294	0,030
MM	60	426,2	6 201,7	6,9	10,2	299	196	93	0	0,853	0,559	0,078	0,028	0,294	0,029
Metanol	60	406,7	6 201,7	6,6	9,8	299	196	93	0	0,853	0,559	0,077	0,027	0,293	0,028

Tabela 7.4.4.8. Wartości wskaźników energetycznych dla wariantu C – lokalizacja w miejscowości KONIN (na podstawie tabeli 7.4.4.3)

Table 7.4.4.8. Energy index values for the option C – KONIN location (based on Table 7.4.4.3)

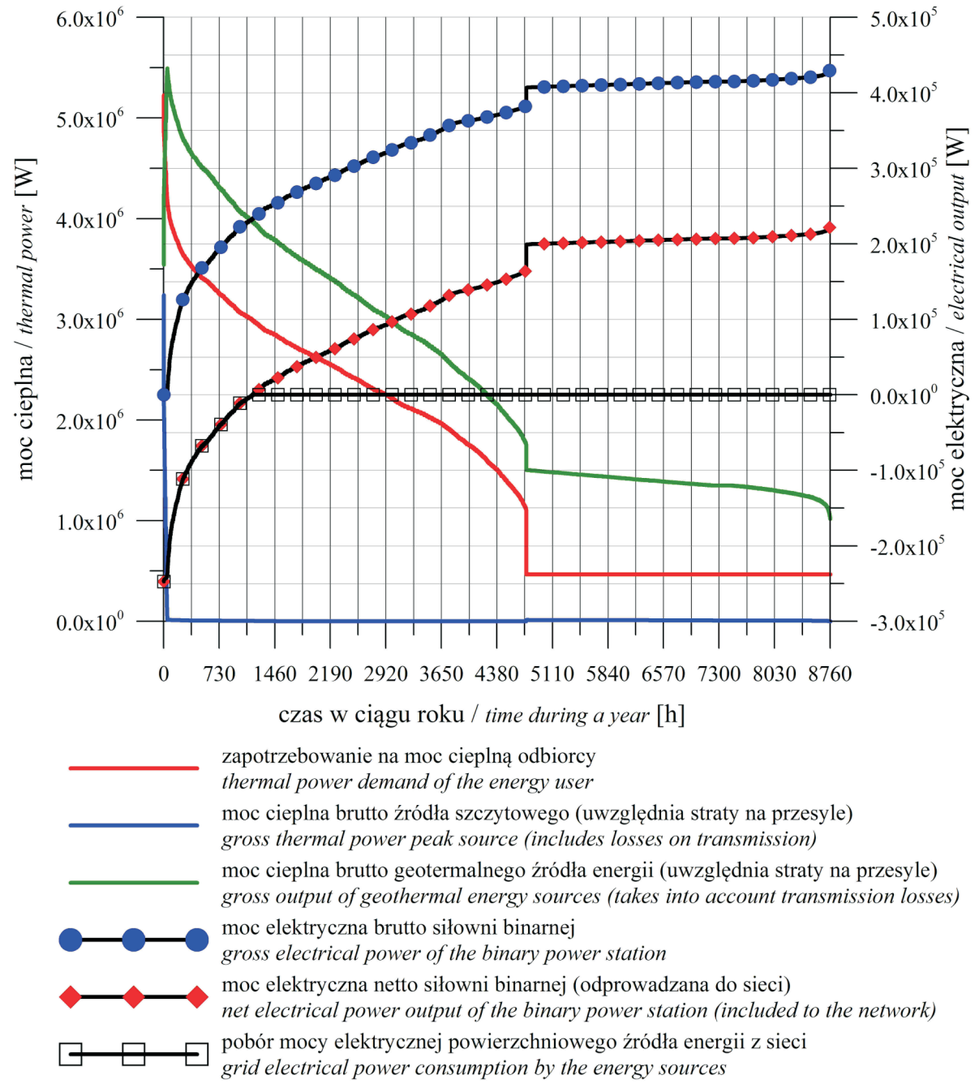
Lokalizacja – KONIN: T_{g1} = 98°C, $\dot{V}_g$ = 150 m^3/h, Q_{CO} = 1 311 883 GJ, T_{g2} = 47°C, wariant A															
Układ ORC						Q_g		$Q_{CO\,g}$		Wskaźniki energetyczne					
										E_g		Z_g		ξ_g	
Czynnik	T_{g2}	N_{ORC}	Q_d	η_{ORC}	E_{el}	40	75	40	75	40	75	40	75	40	75
–	°C	kW	kW	%	TJ	TJ	TJ	TJ	TJ	–	–	–	–	–	–
R227ea	47	417,3	8 323,4	5,0	10,0	299	262	32	0	0,853	0,750	0,032	0,028	0,121	0,029
R1234ze	47	370,8	8 323,4	4,5	8,9	299	262	32	0	0,853	0,750	0,031	0,025	0,118	0,025
R236fa	47	371,3	8 323,4	4,5	8,9	299	262	32	0	0,853	0,750	0,031	0,025	0,118	0,025
Izobutan	47	343,1	8 323,4	4,1	8,2	299	262	32	0	0,853	0,750	0,031	0,023	0,116	0,024
MM	47	372	8 323,4	4,5	8,9	299	262	32	0	0,853	0,750	0,031	0,025	0,118	0,025
Metanol	47	282	8 323,4	3,4	6,8	299	262	32	0	0,853	0,750	0,030	0,019	0,112	0,019



Rys. 7.4.6.1. Definicja odbiorcy energii dla lokalizacji Konin

Fig. 7.4.6.1. Energy end-user characteristic for Konin location

istniejący i możliwy do wykorzystania system dystrybucji energii cieplnej. Nakłady inwestycyjne związane z implementacją instalacji ciepłowni i siłowni geotermalnej ograniczają się zatem do wykonania ujęcia geotermalnego (otwory produkcyjny i chłonny) i siłowni binarnej – tabela 7.4.6.2. Moc zainstalowana elektryczna w geotermalnej siłowni binarnej oszacowana została na 432 kW (tab. 7.4.6.1), z czego moc możliwa do odprowadzenia do sieci to około 225 kW (rys. 7.4.6.2). Przez znaczną część roku instalacja nie będzie wymagała konsumpcji energii elektrycznej pochodzącej z sieci elektroenergetycznej (rys. 7.4.6.2). Prognozowana ilość energii elektrycznej sprzedawanej do sieci to około 1153 MWh/rok – tabela 7.4.6.1.



Rys. 7.4.6.2. Moc cieplna i elektryczna wytwarzana przez źródło energii dla lokalizacji Konin

Fig. 7.4.6.2. Heat and electric power generated by the energy source in Konin location

Tabela 7.4.6.1. Parametry techniczne dla instalacji źródła energii dla lokalizacji Konin

Table 7.4.6.1. Technical parameters for the heat source installation in Konin location

Parametr	Wartość
Lokalizacja	Konin
Głębokość otworu produkcyjnego [m]:	2897
Średnica otworu produkcyjnego [m]:	0,244475
Stan otworu produkcyjnego:	nowy
Strumień nominalny (maksymalny) wody termalnej [m^3/h]:	150
Temperatura wody w warstwie wodonośnej [°C]:	100
Poziom zwierciadła statycznego w otworze produkcyjnym [m p.p.t.]:	100
Ciśnienie depresji [MPa]:	1,36
Głębokość otworu chłonnego [m]:	2873
Stan otworu chłonnego:	nowy
Poziom zwierciadła statycznego w otworze chłonnym [m p.p.t.]:	100
Ciśnienie represji [MPa]:	2,6
Projektowana temperatura schłodzenia wody termalnej w siłowni binarnej [°C]:	55
Projektowana temperatura wody termalnej na głowicy otworu produkcyjnego [°C]:	98,07
Temperatura minimalna (projektowa) powietrza zewnętrznego [°C]:	-18
Temperatura projektowa zasilania instalacji odbiorcy [°C]:	124,02
Temperatura projektowa powrotu z instalacji odbiorcy [°C]:	67,98
Nominalny (maksymalny) strumień czynnika dla instalacji odbiorcy [m^3/h]:	80,5
Moc cieplna całkowita odbiorcy [kW]:	5690,6
Moc cieplna centralnego ogrzewania dla odbiorcy [kW]:	5225
Moc cieplna przygotowania ciepłej wody użytkowej dla odbiorcy [kW]:	465,6
Całkowite zapotrzebowanie na energię cieplną odbiorcy [GJ/rok]:	49514,2
Całkowita moc cieplna zainstalowana w źródle energii (uwzględnia straty mocy na przesyle) [kW]:	8731,7
Całkowita ilość energii cieplnej wytworzonej przez źródło energii (uwzględnia straty na przesyle) [GJ/rok]:	77408,4
Całkowita moc cieplna zainstalowana w części geotermalnej [kW]:	5492,4
Całkowita ilość energii cieplnej wytworzonej z geotermii (uwzględnia straty na przesyle) [GJ/rok]:	77055,7
Całkowita moc cieplna zainstalowana w ciepłowni szczytowej [kW]:	3239,3
Całkowita ilość energii cieplnej wytworzonej przez kotłownię szczytową (uwzględnia straty na przesyle) [GJ/rok]:	352,7
Całkowita moc elektryczna zainstalowana w geotermalnej siłowni binarnej [kW]:	431,9
Całkowita ilość energii elektrycznej wytworzonej przez siłownię binarną brutto (uwzględnia potrzeby całej własne instalacji) [MWh/rok]:	2989,3
Ilość energii elektrycznej wytworzonej przez siłownię binarną netto (po odjęciu potrzeb własnych instalacji = energia sprzedana) [MWh/rok]:	1152,6
Długość całkowita rurociągu z wodą termalną (od głowic otworów do ciepłowni) [m]:	200
Średnica nominalna rury przewodowej dla rurociągu z wodą termalną (od głowic otworów do ciepłowni) [m]:	0,21026
Stan rurociągu z wodą termalną:	nowy
Długość całkowita rurociągu od ciepłowni geotermalnej do ciepłowni szczytowej [m]:	500
Średnica nominalna rury przewodowej dla rurociągu od ciepłowni geotermalnej do ciepłowni szczytowej [m]:	0,15405
Stan rurociągu od ciepłowni geotermalnej do ciepłowni szczytowej:	nowy
Długość całkowita rurociągu od ciepłowni szczytowej do odbiorcy energii cieplnej [m]:	10000
Średnica nominalna rury przewodowej dla rurociągu od ciepłowni szczytowej do odbiorcy energii [m]:	0,15405
Stan rurociągu od ciepłowni szczytowej do odbiorcy:	istnieje
Maksymalne opory przepływu na rurociągach ciepłowniczych przesyłowych (z wyłączeniem rurociągu z wodą termalną) [MPa]:	1,43
Maksymalne opory przepływu na rurociągu z wodą termalną [MPa]:	0,0206
Maksymalne ciśnienie do pokonania przez pompy geotermalne (ciśnienie represji minus ciśnienie depresji) [MPa]:	3,96
Średnie roczne straty energii cieplnej na przesyle [ułamek energii cieplnej wytworzonej w źródle energii]:	0,36

Tabela 7.4.6.2. Zestawienie parametrów ekonomicznych dla instalacji powierzchniowego źródła energii dla lokalizacji Konin

Table 7.4.6.2. List of the economic parameters for the surface energy source installation in Konin location

Parametr	Wartość
Cena netto zakupu energii elektrycznej [zł/kWh]:	0,488
Cena netto sprzedaży energii elektrycznej [zł/kWh]:	0,24
Cena netto zakupu gazu ziemnego wysokometanowego [zł/m^3]:	1,626
Cena netto sprzedaży energii cieplnej gwarantująca finansową rentowność inwestycji [zł/GJ]:	61,76
Całkowite prognozowane nakłady inwestycyjne (główne komponenty zestawiono poniżej) [tys. zł]:	55896
Nakłady inwestycyjne na otwór produkcyjny [tys. zł]:	22580
Nakłady inwestycyjne na otwór chłonny [tys. zł]:	22320
Nakłady inwestycyjne na siłownię binarną [tys. zł]:	3943
Nakłady inwestycyjne na szczytowe kotły gazowe [tys. zł]:	1134
Nakłady inwestycyjne na pompy geotermalne (głębinowa i stacja pomp zatłaczania) [tys. zł]:	1179
Nakłady inwestycyjne na pompy obiegowe [tys. zł]:	81
Nakłady inwestycyjne na wymienniki ciepła [tys. zł]:	889
Nakłady inwestycyjne na rurociągi połączeniowe [tys. zł]:	1278
Nakłady inwestycyjne na budynek ciepłowni geotermalnej i szczytowej [tys. zł]:	1481
Całkowite koszty obsługi instalacji (główne składniki kosztów zestawiono poniżej) [tys. zł/rok]:	3335
Amortyzacja środków trwałych [tys. zł/rok]:	2715
Koszty obsługi, remontów, konserwacji [tys. zł/rok]:	559
Koszty zakupu nośników energii [tys. zł/rok]:	60
Przychody z tytułu sprzedaży energii (szczegółowo zestawiono poniżej) [tys. zł/rok]:	3335
Przychody z tytułu sprzedaży energii cieplnej [tys. zł/rok]:	3058
Przychody z tytułu sprzedaży energii elektrycznej [tys. zł/rok]:	277

Ostateczna cena sprzedaży energii cieplnej gwarantująca rentowność inwestycji to około 62 zł/GJ – jest to zatem cena zbliżona do tej jaką otrzymać można dla energii pochodzącej z sieciowego gazu ziemnego (Pająk, Bujakowski 2013a).

Prognozowane efekty ekologiczne w postaci redukcji emisji zanieczyszczeń związanego z uruchomieniem inwestycji geotermalnej zestawiono w tabeli 7.4.6.3.

Efekty społeczne wykorzystania wód termalnych w rejonie Konina wiązać się będą z powstaniem nowych miejsc pracy, w liczbie około 10, w rejonie uruchomienia inwestycji. Biorąc pod uwagę możliwość budowy na bazie wód termalnych również obiektów balneo-rekreacyjnych, liczba miejsc pracy wzrosłaby znacząco. Miejsca, w których uruchomiono dotychczas instalacje geotermalne wykorzystujące te wody w celach balneo-rekreacyjnych, świadczą o dużym zainteresowaniu klientów tego typu usługami. Takie przedsięwzięcia stymulują lokalny rynek usług i znacząco wpływają na wzrost atrakcyjności turystycznej. Zyskuje na tym branża gastronomiczna, hotelarska, rozwija się rynek różnorodnych usług.

Tabela 7.4.6.3. Zestawienie parametrów ekologicznych dla instalacji powierzchniowego źródła energii dla lokalizacji Konin

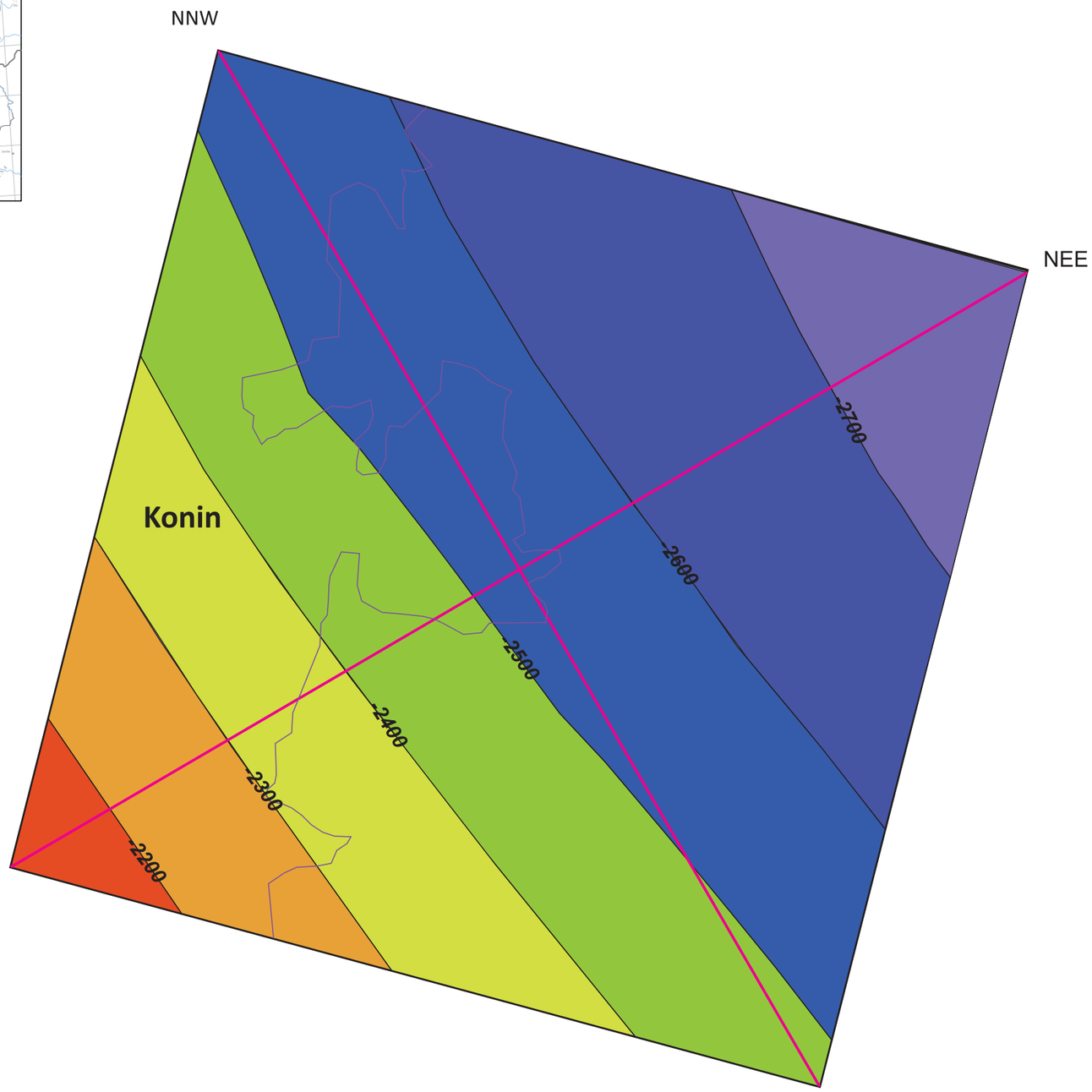
Table 7.4.6.3. List of the ecological parameters for the surface energy source installation in Konin location

Parametr	Wartość
Roczna emisja B(a)P dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0
Roczna emisja sadzy dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0,002
Roczna emisja pyłu dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0,033
Roczna emisja CO_2 dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	4771,717
Roczna emisja CO dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	1,057
Roczna emisja NO_x w przeliczeniu na NO_2 dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	3,183
Roczna emisja SO_2 dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0,559
Roczna emisja węglowodorów alifatycznych dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0,335
Roczna emisja w. węglowodorów aromatycznych dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0,088
Roczne ograniczenie emisji B(a)P [Mg/rok]:	0,078
Roczne ograniczenie emisji sadzy [Mg/rok]:	39,807
Roczne ograniczenie emisji pyłu [Mg/rok]:	159,636
Roczne ograniczenie emisji CO_2 [Mg/rok]:	4618,243
Roczne ograniczenie emisji CO [Mg/rok]:	443,997
Roczne ograniczenie emisji NO_x w przeliczeniu na NO_2 [Mg/rok]:	3,424
Roczne ograniczenie emisja SO_2 [Mg/rok]:	63,487
Roczne ograniczenie emisji węglowodorów alifatycznych [Mg/rok]:	23,173
Roczne ograniczenie emisji wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych [Mg/rok]:	22,188

MAPA STROPU UTWORÓW DOLNEJ JURY W STREFIE KONINA*

MAP OF THE TOP OF LOWER JURASSIC IN THE KONIN AREA





Głębokość
[m n.p.m.]
Depth
[m a.s.l.]

- ***-2200***
- ***-2300***
- ***-2400***
- ***-2500***
- ***-2600***
- ***-2700***

*na podstawie: Górecki (red.), 2006
(based on: Górecki (ed.), 2006)

LEGENDA:
LEGEND:

Główne miasto
Main city

Linie przekrojów geologicznych (Zał. 7.4.2)
Cross-section lines (Encl. 7.4.2)

-2700
Izohipsy stropu utworów jury dolnej [m n.p.m.]
Isohypses of the top of Lower Jurassic formation [m a.s.l.]

0 2 4 km

WYKONANO NA ZAMÓWIENIE MINISTRA ŚRODOWISKA ZA ŚRODKI FINANSOWE WYPŁACONE PRZEZ NARODOWY FUNDUSZ OCHRONY ŚRODOWISKA I GOSPODARKI WODNEJ



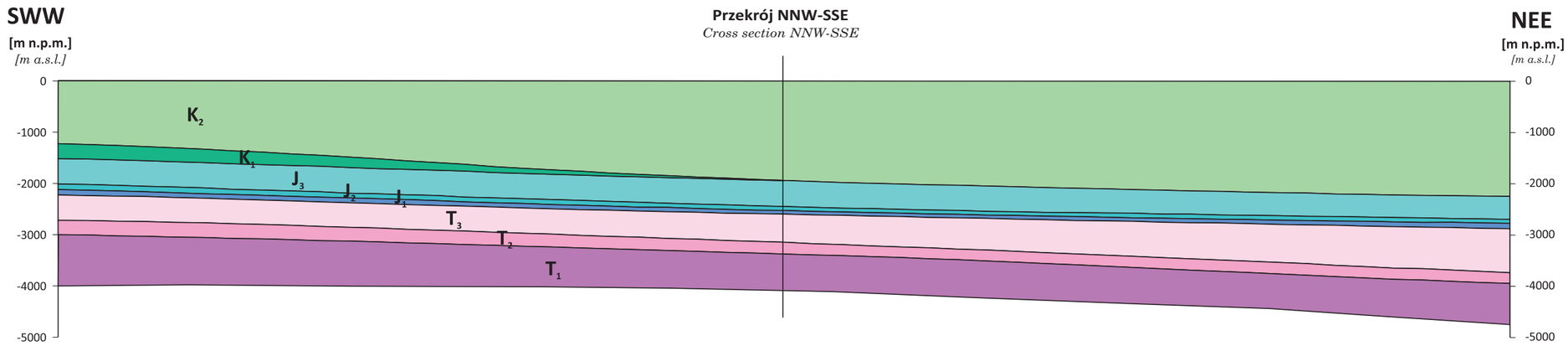
PRZEKROJE GEOLOGICZNE PRZEZ STREFĘ KONINA
(przebieg na zał. 7.4.1)*

GEOLOGICAL CROSS-SECTIONS THROUGH THE KONIN AREA
(line at encl. 7.4.1)

Zał. 7.4.2
Encl. 7.4.2

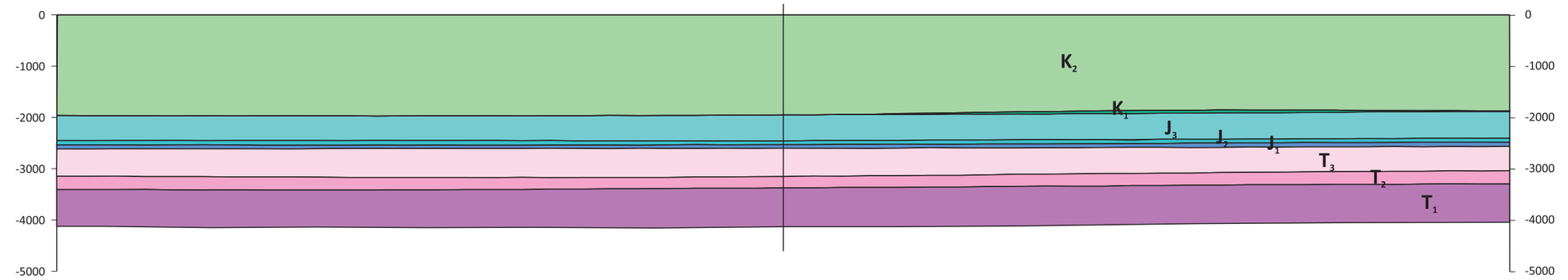
NIECKA MOGILEŃSKO-ŁÓDZKA

Przekrój NNW-SSE
Cross section NNW-SSE



NIECKA MOGILEŃSKO-ŁÓDZKA

Przekrój SWW-NEE
Cross section SWW-NEE



K_2	Kreda górna *Upper Cretaceous*	J_3	Jura górna *Upper Jurassic*	T_3	Trias górny *Upper Triassic*
K_1	Kreda dolna *Lower Cretaceous*	J_2	Jura środkowa *Middle Jurassic*	T_2	Trias środkowy *Middle Triassic*
		J_1	Jura dolna *Lower Jurassic*	T_1	Trias dolny *Lower Triassic*

0 1 2 km

*na podstawie: Górecki (red.), 2006
(based on: Górecki (ed.), 2006)

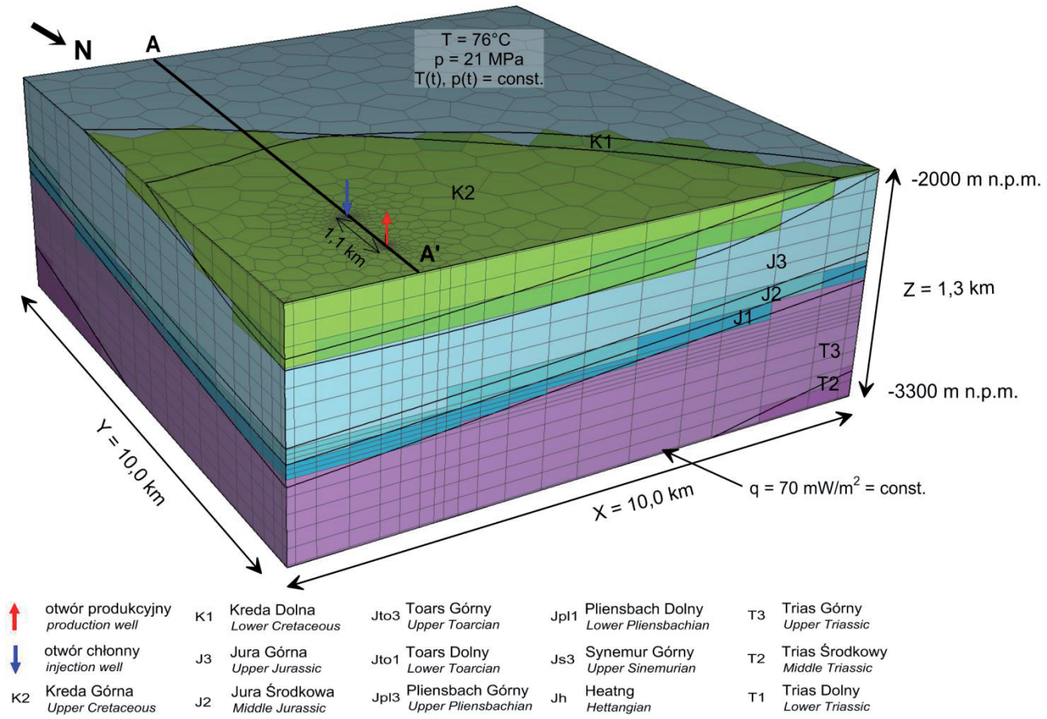
WYKONANO NA ZAMÓWIENIE MINISTRA ŚRODOWISKA ZA ŚRODKI FINANSOWE WYPŁACONE
PRZEZ NARODOWY FUNDUSZ OCHRONY ŚRODOWISKA I GOSPODARKI WODNEJ

WYNIKI MODELOWANIA NUMERYCZNEGO W STREFIE KONINA

NUMERICAL MODELING RESULTS IN THE KONIN AREA

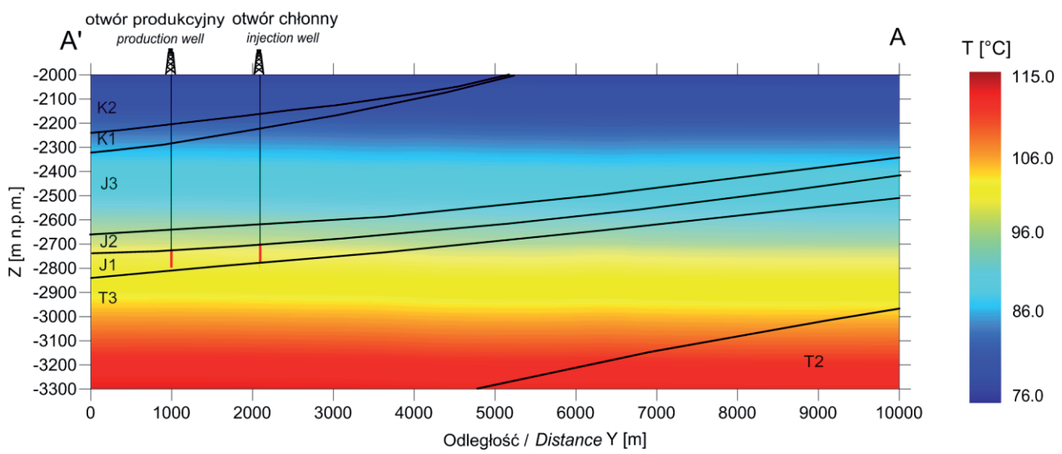
Zał. 7.4.3

Encl. 7.4.3



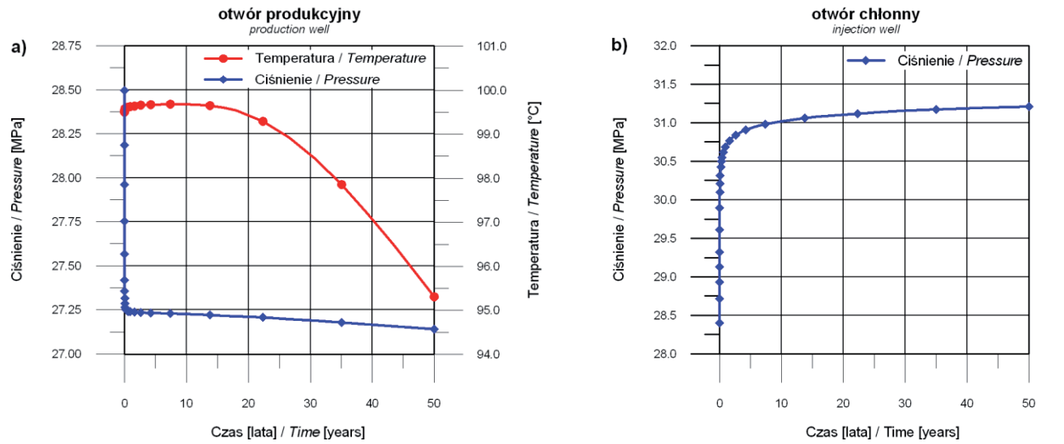
Rys. 1. Model numeryczny strefy Konina

Fig. 1. Numerical model of the Konin area



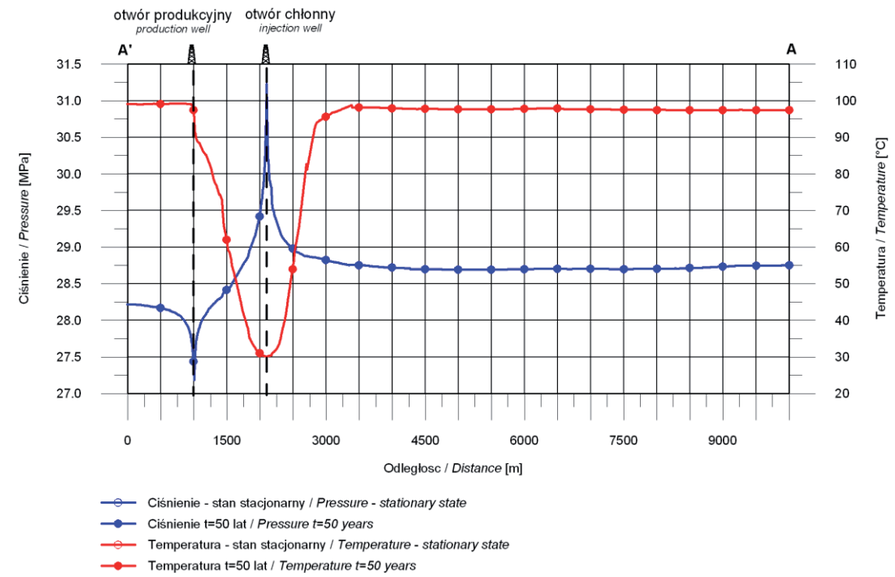
Rys. 2. Prognozowany rozkład temperatury w modelu stanu przedeksploatacyjnego wzdłuż przekroju A'A

Fig. 2. Forecasted temperature distribution prior to exploitation along the A'A cross section



Rys. 3. a) Zmiana temperatury i ciśnienia złożowego w funkcji czasu w otworze produkcyjnym, b) zmiana ciśnienia złożowego w otworze chłonnym na głębokości z = -2762,5 m n.p.m dla wydajności dubletu Q = 150 m^3/h

Fig. 3. a) Change of the reservoir temperature and pressure versus time in the production well, b) change of the reservoir pressure in the injection well at the depth z = -2762,5 m a.s.l. for the doublet flow rate Q = 150 m^3/h



Rys. 4. Zmiana temperatury złożowej oraz ciśnienia złożowego wzdłuż przekroju A'A na głębokości z = -2762,5 m n.p.m. dla wydajności dubletu Q = 150 m^3/h

Fig. 4. Cross-sectional change of the reservoir temperature and pressure along the A'A cross section at the depth z = -2762,5 m a.s.l. for the doublet flow rate Q = 150 m^3

7.5. Ślesin

7.5.1. Ogólna charakterystyka strefy

Ślesin to miasto i gmina miejsko-wiejska w woj. wielkopolskim, w powiecie konińskim. Położone jest nad Jeziorem Ślesińskim oraz Jeziorem Mikorzyńskim. Liczy około 3,2 tys. mieszkańców (Plan odnowy miejscowości Ślesin na lata 2010–2017). Powierzchnia miasta to 7,18 km^2. Gmina Ślesin zajmuje powierzchnię 145,69 km^2 i jest zamieszkiwana przez około 13,5 tys. mieszkańców. Gmina stanowi 9,23% powierzchni powiatu (http://pl.wikipedia.org). Ślesin usytuowany jest przy drodze krajowej nr 25, na trasie Bydgoszcz–Ostrów Wielkopolski i drodze wojewódzkiej nr 263 łączącej Słupcę z Radziejowem.

W ujęciu fizyczno-geograficznym gmina Ślesin znajduje się na obszarze granicznym mezoregionów Pojezierza Gnieźnieńskiego oraz Pojezierza Kujawskiego stanowiących fragment makroregionu Pojezierza Wielkopolskiego (Kondracki 2002). Pod względem geologicznym strefa Ślesina stanowi fragment niecki mogileńsko-łódzkiej.

Miasto Ślesin charakteryzuje się dosyć wykształconą funkcją turystyczną, której podstawy stanowi ciąg dużych jezior rynnowych, wśród których do najważniejszych należą jeziora: Mikorzyńskie, Ślesińskie, Licheńskie oraz Wąsoskie. Ich łączna powierzchnia wynosi 547 ha i 16,5 km długości. Jeziora te włączone są w obieg chłodniczy elektrowni „Konin i Pątnów" (Plan odnowy...).

Środkowa część gminy Ślesin, w obrębie ciągu jezior konińskich wraz z kanałem Warta–Gopło, pełni w sieci ECONET-Polska funkcję korytarza ekologicznego łączącego obszary o znaczeniu międzynarodowym: doliny rzeczne Warty i Wisły, poprzez jezioro Gopło, rzekę Noteć i kanał Bydgoski, należące do najistotniejszych elementów systemu w niżowej części kraju. Obszar ten zapewnia przestrzenną i ekologiczną łączność pomiędzy zlewniami dwóch największych rzek Polski – Wisły i Odry. Z uwagi na bogactwa zasobów naturalnych częściowo tereny Ślesina zostały zaliczone do Goplańsko-Kujawskiego Obszaru Krajobrazu Chronionego. W Ślesinie nie ma obszaru włączonego w sieć Natura 2000. Najbliższe potencjalne siedliskowe obszary Europejskiej Sieci Ekologicznej Natura 2000 to „Ostoja Nadgoplańska" oddalona o kilka kilometrów od centrum Ślesina.

System ciepłowniczy stosowany na terenie miasta Ślesin (na potrzeby c.o. i c.w.u.) w 100% oparty jest na indywidualnych instalacjach grzewczych (produkcja ciepła z wykorzystaniem kotłowni węglowych i olejowych; brak jest systemu scentralizowanego (dane na podstawie wyników ankietyzacji – Urząd Miejski w Ślesinie). Główne miejsca pracy istniejące na terenie miejscowości posiadają własne źródła ciepła. Zalicza się do nich:

- Szkoły Podstawowe posiadające kotłownie indywidualne olejowe o łącznej mocy kotłów 690 kW (2 × 345 kW).
- Gimnazjum – kotłownia olejowa o mocy kotłów 2 × 345 kW.
- Budynek mieszkalno komunalny – kotłownia węglowa o mocy około 100 kW.
- Ośrodek Zdrowia w Ślesinie – kotłownia węglowa 2 × 145 kW oraz 1 × około 50 kW – łącznie 340 kW.
- Budynek Urzędu Miasta i Gminy – kotłownia olejowa o mocy 130 kW.
- Dom Kultury – kotłownia olejowa o mocy około 300 kW.

7.5.2. Koncepcyjny model geologiczny i parametry hydrogeotermalne

Model budowy geologicznej strefy Ślesina opracowano na podstawie danych archiwalnych i publikowanych, wykorzystując m.in. informacje zawarte w rozdz. 4.2.1 i 5. W strefie Ślesina brak archiwalnych głębokich otworów wiertniczych przewiercających utwory jurajskie. Otwór Ślesin IGH-1 o głęb. 2570 m dowiercono jedynie do utworów beriasu dln. (kreda dln.). Informacje o budowie geologicznej zaczerpnięto więc głównie z regionalnego przekroju geologicznego nr IV (Górecki (red.) 2006) oraz map stropów poszczególnych serii stratygraficznych, uwzględniających dane z nielicznych, odległych otworów wiertniczych oraz profili sejsmicznych (Górecki (red.) 2006).

Elementy strukturalnego modelu geologicznego tej strefy zostały przedstawione na załącznikach 7.5.1 i 7.5.2.

Strefa Ślesina położona jest na SW od systemu regionalnych dyslokacji, które wykazują przebieg NW-SE i na NNE od omawianej strefy przecinają dużą strukturę słupa solnego Gopła.

Analizowana strefa jest fragmentem niecki mogileńsko-łódzkiej, która powstała na obszarze tzw. garbu wielkopolskiego, istniejącego w jurze dolnej i środkowej. Występuje tam wyraźna redukcja miąższości osadów. Od strony NE garb sąsiadował z bruzdą kujawską – strefą szybkiego wzrostu miąższości osadów jury dolnej i środkowej, związaną z synsedymentacyjną dyslokacją Gopła–Lutomierska. Rejon Ślesina stanowi peryferyjną, zachodnią część regionalnej strefy dyslokacyjnej, która generalnie ma kierunek NW-SE, równoległy do większość uskoków w podłożu podpermskim oraz do strefy tektonicznej Teisseyre'a-Tornquista (T-T).

Pionowe ruchy tektoniczne, które odżyły w obrębie bloków podpermskiego podłoża pod naciskiem grubego kompleksu osadów cechsztyńsko-mezozoicznych, uaktywniły działalność halokinetyczną. Najsilniejszy etap wypiętrzeń struktur solnych w strefach naruszeń tektonicznych nastąpił w czasie ruchów laramijskich. Rozwój zjawisk halotektonicznych wzdłuż uskoków lub na ich przecięciu powodował powstawanie struktur solnych o różnych kształtach i sile wypiętrzenia. Początki tego procesu prawdopodobnie sięgają okresu po sedymentacji osadów wapienia muszlowego (trias środkowy) i trwały do młodszego mezozoiku. Pełne uaktywnienie soli cechsztyńskich nastąpiło po sedymentacji utworów retyku (trias górny), na co duży wpływ miały orogeniczne ruchy staro-kimeryjskie.

Halokineza najsilniej rozwinęła się w obszarze wału kutnowskiego, gdzie zasadniczymi elementami strukturalnymi w sąsiedztwie omawianej strefy, na NE od niej, są występujące ciągi struktur solnych o kierunku NW-SE. Do najbardziej znanych należą stromo wypiętrzone antykliny Kłodawy i Gostynina, ograniczające wał kutnowski od SW i NE. Antyklina Kłodawy, pochylona ku SW, jest największą strukturą wału środkowopolskiego. Słup solny Gopła, w NNE sąsiedztwie strefy Ślesina, jest kolejną taką strukturą usytuowaną na NW od Kłodawy.

W obszarze niecki mogileńsko-łódzkiej efektem zjawisk halokinetycznych jest również niedojrzały słup solny (poduszka solna) i związana z nim antyklina okolic Trzemżala, na NW od strefy Ślesina. W strefie Ślesina utwory dolnojurajskie przypuszczalnie gromadziły się na SE peryferiach swoistej pułapki sedymentacyjnej pomiędzy wypiętrzającymi się strukturami solnymi Gopła i Trzemżala.

W jurze górnej i w kredzie dolnej warunki sedymentacji w obrębie garbu wielkopolskiego i bruzdy kujawskiej były zbliżone (zał. 7.5.2). Od kredy górnej – w czasie ruchów tektonicznych orogenezy alpejskiej – zaczęły się stopniowe ruchy inwersyjne, które doprowadziły do powstania w miejscu

bruzdy kujawskiej – wału, a w miejscu garbu wielkopolskiego – niecki mogileńsko-łódzkiej, i do pogłębienia lokalnej niecki w strefie Ślesina. Duże miąższości osadów kredy w jej części SE (zwłaszcza kredy górnej), związane były ze wzmożoną subsydencją dna zbiornika sedymentacyjnego.

Niecka mogileńsko-łódzka, o osi równoległej do wału kutnowskiego, jest asymetryczna. Wypełniają ją miąższe osady kredy, przykrywające utwory jury, triasu i permu (zał. 7.5.2).

Osady tworzące się w dolnej jurze powstawały w basenie o silnie zróżnicowanym dnie, gdyż rozwój struktur halokinetycznych powodował znaczne zmiany szybkości subsydencji. Ewolucyjne pogłębianie i spłycanie dna zbiornika wpływało na zmienną miąższość i powstawanie utworów różnych facji. Sedymentacja odbywała się na przemian w środowisku lądowym i płytkomorskim. W fazach transgresywnych najczęściej osadzały się heterolity i piaskowce płytszego szelfu, a jedynie w pliensbachu ilasto-mułowcowe utwory głębszego szelfu klastycznego. W fazach regresywnych tworzyły się utwory deltowe, fluwialne i bagienne o zróżnicowanej litologii. W profilu jury dolnej dominują zatem miąższe kompleksy wodonośnych utworów piaskowcowych, od drobno- do gruboziarnistych (hetangu, synemuru, górnego pliensbachu i górnego toarku), oraz kompleksy nieciągłych serii osadów słabo przepuszczalnych i praktycznie nieprzepuszczalnych, wykształconych w postaci zwięzłych drobnoziarnistych piaskowców i mułowców (Górecki (red.) 1995). Przedzielają je dwa miąższe iłowcowe kompleksy izolujące. Starszy powstał we wczesnym pliensbachu. Młodszy – na ogół zwarty kompleks szarozielonych iłowców i mułowców o stałej miąższości 70–90 m – w toarku dolnym (Górecki (red.) 2006).

Spąg kompleksu wodonośnych utworów dolnojurajskich w strefie Ślesina mogą tworzyć utwory różnych ogniw triasu, głównie bezwodne skały retyku. Mogą to być utwory o zbliżonej litologii do stwierdzonych w otworze Przybyłów 1 (Pernal 1989) zlokalizowanym w strefie Koła (por. rozdz. 7.2.2), podobne do nawierconych w otworze Turek 2 (rozdz. 4.2.1) w rejonie Turka, czy też w otworze Wilczna-1 (Wróbel 1970) na SW od strefy Ślesina. Mogą to być zatem piaskowce i iłowce, o miąższości mniejszej niż w Wilcznej (tam ponad 1000 m), lecz nie mniejszej niż 700 m (zał. 7.5.2). Przez analogię do danych dla podobnych osadów występujących w otworze Koło IG-4 (Dembowska, Marek (red.) 1990) ich porowatość efektywna może wynosić 1–2% i tylko lokalnie może wzrastać do 5%. Natomiast w miejscach, gdzie serię utworów górnotriasowych tworzą iłowce zalegające na wapieniach, podobnie jak w otworze Trześniew 1 (Wysocka-Kudła 1990) na wschód od strefy Koła, można przyjąć, że porowatości efektywne są niższe od 1% i tylko lokalnie, we wkładkach mułowcowych i piaskowcowych mogą wynosić około 1,6%. Tak więc utwory te są generalnie nieprzepuszczalne. **Strop utworów dolnojurajskich** w strefie Ślesina tworzą bezwodne lub słabo wodonośne osady doggeru. Przez analogię do danych z dokumentacji wynikowej otworu Ponętów 1 (strefa Koła, por. rozdz. 7.2.2; Lis-Martyniak 1973) mogą to być piaskowce, wapienie, mułowce i iłowce serii piaskowca wapnistego o miąższości około 300 m (zał. 7.5.2). Dla utworów z otworu Ponętów 1, wartości porowatości efektywnej wynoszą od 4,17% w wapieniach do 9,47% w piaskowcach, natomiast przepuszczalności 3,2 mD w piaskowcach i 73,3 mD w wapieniach. Jeśli w strefie Ślesina w stropie serii złożowej występują także utwory analogiczne do stwierdzonych w otworze Banachów 1 w strefie Koła (piaskowce, mułowce, iłowce, piaskowce dolomityczne, wapienie piaszczyste, łupki mułowcowe, łupki ilasto-mułowcowe oraz łupki ilaste), to w nawiązaniu do danych dla tego otworu wartości porowatości efektywnej mogą wówczas wynosić od około 1,31% w iłowcach do 4,42% w piaskowcach (przy przepuszczalności do 0,18 mD) lub jak dla podobnych utworów w otworze Koło IG-4 – od 1% w piaskowcach do 6% w mułowcach.

Parametry hydrogeotermalne serii złożowej podano na podstawie danych archiwalnych i informacji zawartych w rozdz. 4.2.1 i 5.4 oraz dokumentacji wynikowych w.w. otworów.

Strop utworów jury dolnej, w centralnej części analizowanej strefy zalega w interwale głębokości od –2800 m n.p.m. do –3000 m n.p.m. W części zachodniej występuje lokalnie na głębokości nieco mniejszej niż –2700 m n.p.m. W części wschodniej natomiast, lokalnie sięga poniżej głębokości –3100 m n.p.m. (zał. 7.5.1). Miąższość utworów dolnojurajskich stopniowo wzrasta od poniżej 100 m na zachodzie do 200 m na wschodzie strefy – w sąsiedztwie regionalnego uskoku, zmieniającego przebieg z N-S na NW-SE. Z powyższego wynika wzrost temperatury w stropie utworów dolnojurajskich, z zachodu na wschód – od wartości poniżej 100 do blisko 115°C.

Występują tutaj solanki, których mineralizacja stopniowo wzrasta z południa na północ – od wartości około 75 g/dm^3 do nieco powyżej 125 g/dm^3. Ta zmienność może mieć związek z bliskością występowania struktury solnej Gopła.

Parametry zbiornikowe piaskowców dolonojurajskich zestawiono poniżej na podstawie danych ujętych w rozdz. 5.4 i rozdz. 4.2.1 oraz informacji archiwalnych.

Porowatość efektywna (regionalna) wodonośnych utworów dolnojurajskich niecki mogileńsko-łódzkiej wynosi od 7,95 do 25,35% (średnio 18,3%). Przez analogię do obserwacji w strefie Koła (por. rozdz. 7.2.2), w strefie Ślesina można się spodziewać porowatości efektywnych rzędu 7–13% w partiach silnie zawodnionych oraz 1–4% w partiach słabo zawodnionych, głównie w obszarze poduszki solnej Trzemżala. Wartość 7,18% występuje w otworze Banachów IG-1 (Marek, Feldman 1986) na głęb. 3344,5 m p.p.t. Wartość 13,38% – w otworze Koło IG-4 na głęb. 2766,5 m p.p.t. wartość 1% – w otworze Koło IG-4 na głęb. 2770,5–2771,7 m p.p.t., a wartość 4% w otworze Koło IG-3 (Dembowska, Marek (red.) 1990) na głęb. 3080,5–3090,8 m p.p.t. Wartości pośrednie, w odniesieniu do wskazanych głównych interwałów, odnotowano także w innych partiach tych otworów.

Współczynnik przepuszczalności (regionalny) dla niecki mogileńsko-łódzkiej wynosi od kilkudziesięciu mD do 1627,2 mD (średnio 285,35 mD). W strefie Ślesina współczynniki przepuszczalności skał dolnojurajskich w obszarze poduszki solnej Trzemżala mogą być porównywalne ze wskazanymi dla próbek rdzeni z otworu Banachów IG-1, zlokalizowanego w strefie Koła – poza strukturą zrębową: 2,291 mD (w kierunku X), 0,981 mD (w kierunku Y) i 0,141 mD (w kierunku Z). Porównywalne wartości – 2,971 mD w kierunku X – stwierdzono w otworze Koło IG-4 dla próby z głębokości 2732,4 m, podobnie usytuowanym w stosunku do struktury zrębowej jak otwór Banachów IG-1, lecz w obrębie zachodniej części Kotliny Kolskiej. Natomiast w otworze Koło IG-4 na głęb. 2766,5 m p.p.t. wartość przepuszczalności określono jako 129,023 mD (por. rozdz. 5.4). Przez analogię ze strefą Turka (por. rozdz. 7.3.2), można przypuszczać, że w strefie Ślesina wartość przepuszczalności może dochodzić do 150 mD.

Współczynnik filtracji (regionalny) dla niecki mogileńsko-łódzkiej wynosi od $9{,}48 \cdot 10^{-8}$ do $1{,}2 \cdot 10^{-5}$ m/s (średnio $2{,}11 \cdot 10^{-6}$ m/s). Szacuje się, że potencjalna wydajność otworów wiertniczych w omawianej strefie będzie wzrastała z zachodu na wschód od ponad 100 do ponad 200 m^3/h.

Przedstawiony koncepcyjny model geologiczny strefy Ślesina, obejmujący mapę ukształtowania stropu zbiornika jurajskiego, przekroje geologiczne z oszacowanymi miąższościami utworów, parametrami hydrogeotermalnymi oraz danymi litostratygraficznymi – stanowił podstawę dla opracowania numerycznego modelu przestrzennego rozkładu temperatur i ciśnień w analizowanej strefie.

7.5.3. Model numeryczny termiki górotworu

Model numeryczny rejonu Ślesina ma wymiary powierzchniowe 11,0 × 11,0 km i obejmuje miasto Ślesin oraz część gminy o tej samej nazwie. Strop modelu, o rzędnej –2300 m n.p.m., stanowią słabo sfałdowane osady jury górnej oraz kredy dolnej i górnej (rys. 7.5.3.1). Formację perspektywiczną dla pozyskiwania energii geotermalnej do celów wytwarzania prądu w systemach binarnych stanowią utwory jury dolnej. Ich strop zawiera się w przedziale głębokości od około –2600 m n.p.m. do około –3200 m n.p.m. Spąg modelu, wyznaczony rzędną –3600 m n.p.m., stanowią nieprzepuszczalne utwory triasu (głównie triasu górnego).

Model numeryczny został podzielony na 19 poziomych warstw, w tym 8 o miąższości 50 m w najbardziej perspektywicznej, spągowej części utworów jury dolnej i 11 warstw po około 80 m. Elementy obliczeniowe, o kształcie nieregularnym, skoncentrowano w sąsiedztwie założonej lokalizacji otworów produkcyjnego oraz chłonnego.

Jak wspomniano, w rozdziale 7.5.2, w modelowanej strefie znajduje się otwór Ślesin IGH-1 o głębokości 2570 m p.p.t., jednak jego głębokość sięgnęła jedynie do utworów kredy dolnej. Nie występują natomiast otwory nawiercające perspektywiczną formację jury dolnej.

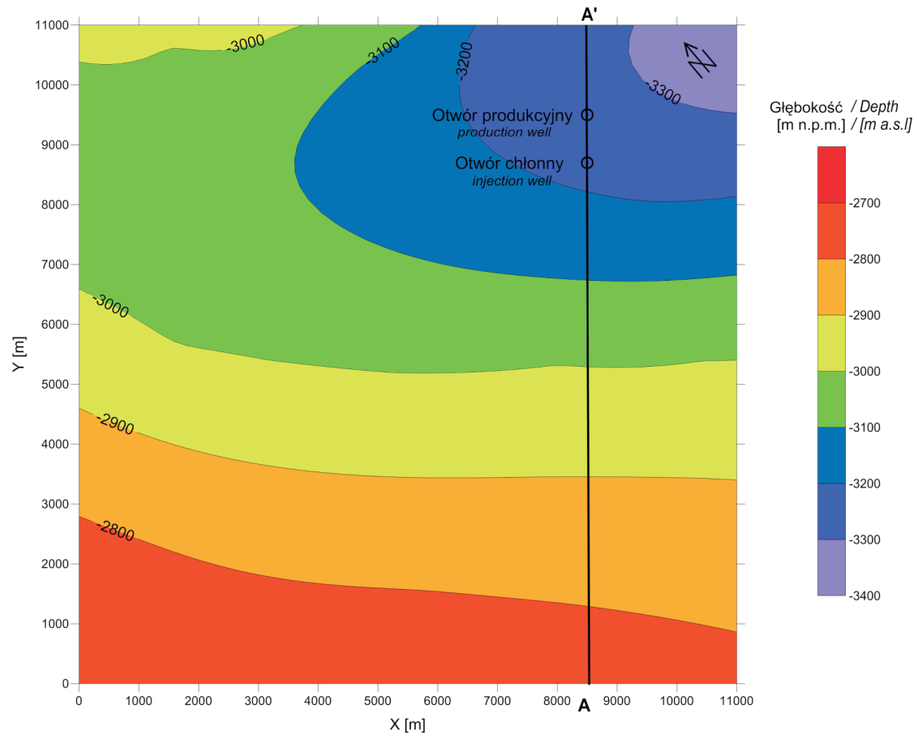
W modelu numerycznym termiki górotworu wykorzystano warunek brzegowy I rodzaju ($T(t)$, $p(t)$ = const. – warunek Dirichleta) oraz warunek brzegowy II rodzaju (gęstość strumienia ciepła q = const. – warunek Neumanna). W części stropowej modelu założono stałe w czasie wartości ciśnienia złożowego oraz temperatury. Natomiast w najniższej warstwie modelu, na głębokości –3600 m n.p.m., założono stały dopływ ciepła o gęstości strumienia równej 70 mW/m^2 (Szewczyk, Gientka 2009) (zał. 7.5.3 – rys. 1). Przyjęto, że wpływ eksploatacji złoża, poprzez zmianę temperatury oraz ciśnienia złożowego w warstwach wodonośnych, nie będzie się zaznaczał w warstwach granicznych modelu. Założenie to jest wynikiem uwzględnienia relatywnie dużej miąższości oraz niskiej lub bardzo niskiej przepuszczalności warstw, które oddzielają warstwy wodonośne od warstw granicznych modelu numerycznego.

Średnią temperaturę dla stropu modelu o rzędnej –2300 m n.p.m. (ok. 2400 m p.p.t.) przyjęto według Góreckiego (red.) (2006).

W modelowanym rejonie spąg utworów jury dolnej zalega najgłębiej na NE, na głębokości od około –3200 m n.p.m. do około –3300 m n.p.m. (rys. 7.5.3.1). Obszar ten charakteryzuje się również najwyższymi temperaturami. Całkowita miąższość utworów jury dolnej w modelowanym rejonie wynosi od około 70 do około 250 m, natomiast w miejscach proponowanej lokalizacji dubletu otworów około 200 m.

W nawiązaniu do geologicznego modelu koncepcyjnego (por. rozdz. 7.5.2), wskazującego na znaczną głębokość zalegania strefy perspektywicznej, w modelu numerycznym przyjęto jednolitą przepuszczalność dla całej formacji jury dolnej: 150 mD ($1{,}5 \cdot 10^{-13}$ m^2) w kierunku poziomym oraz 15 mD ($1{,}5 \cdot 10^{-14}$ m^2) w kierunku pionowym (tab. 7.5.3.1). Wydzielonym w tabeli strukturom geologicznym przypisano także gęstość właściwą szkieletu skalnego, porowatość, współczynnik przewodzenia ciepła oraz ciepło właściwe skał.

Kalibracja modelu numerycznego termiki górotworu polegała na wykonaniu szeregu symulacji obliczeniowych, mających na celu odtworzenie warunków termicznych w rejonie Ślesina w stanie stacjonarnym. Za punkt odniesienia przyjęto dane zawarte na mapach temperatury w stropie poszczególnych jednostek stratygraficznych, przedstawione przez Góreckiego (red.) 2006).



Rys. 7.5.3.1. Spąg utworów jury dolnej w modelowanym rejonie Ślesina wraz z zakładaną lokalizacją otworów eksploatacyjnego oraz chłonnego

Fig. 7.5.3.1. Bottom of the lower Jurassic structures in the modelled Ślesin region, including the assumed production and injection well locations

W stropie modelu o rzędnej –2300 m n.p.m. przyjęto stałą temperaturę 85°C (zał. 7.5.3 – rys. 1). Temperatura w spągu modelu jest wynikiem dopływu ziemskiego strumienia ciepła o gęstości 70 mW/m^2. Znając gęstość powierzchniowego strumienia ciepła oraz prognozowany gradient geotermiczny w jednostkach stratygraficznych objętych modelowaniem oraz korzystając z prawa Fouriera, wyznaczono ich przewodności cieplne.

Na załączniku 7.5.3 – rys. 2 przedstawiono rozkład temperatury według modelu stanu stacjonarnego wzdłuż przekroju A'A pokazanego na załączniku 7.5.3 – rys. 1 oraz rysunkach 7.5.3.1 i 7.5.3.2. Temperatury spodziewane w poziomach perspektywicznych, tj. w pobliżu spągu utworów jury dolnej, będą zbliżone do pokazanych na rysunku 7.5.3.2. Maksymalna prognozowana temperatura na głębokości około –3300 m n.p.m. (ok. 3400 m p.p.t.) powinna wynosić około 114°C.

7.5.4. Program technologiczny zastosowania systemu binarnego

Zgodnie z danymi przedstawionymi w rozdziale 7.5.2, w wytypowanej strefie Ślesina brak głębokich otworów wiertniczych, które przewiercałyby utwory jury dolnej. Uwzględniając głębokość zalegania głównego zbiornika hydrogeotermalnego jury dolnej w niniejszej analizie przyjęto głębokość otworu eksploatacyjnego 3358 m p.p.t. i otworu chłonnego 3323 m p.p.t.

Tabela 7.5.3.1. Struktury geologiczne tworzące model i ich parametry geologiczne

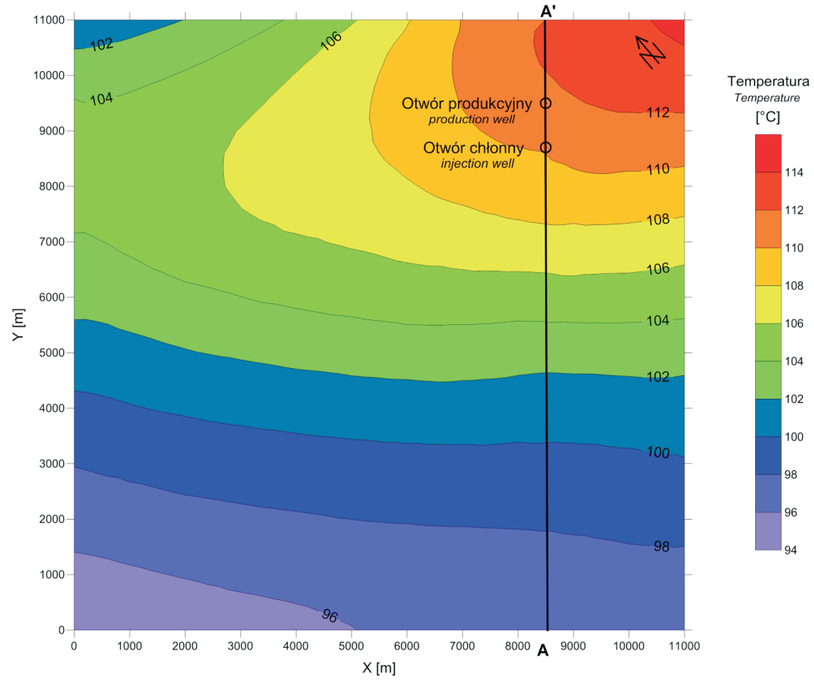
Table 7.5.3.1. Geological structures constituting the model and their geological parameters

Nr	Formacja	Opis	Oznaczenie w modelu	Porowatość efektywna [%]	Gęstość [kg/m^3]	Przepuszczalność [mD]		Ciepło właściwe [J/(kg·K)]	Współczynnik przewodzenia ciepła **[W/(m·K)]**
						XY	Z		
1	T1	nieprzepuszczalne utwory triasu dolnego		2	2600	0,1	0,1	900	2,5
2	T2	iłowce, mułowce oraz wapienie triasu środkowego		2	2600	0,1	0,1	900	2,5
3	T3	Iłowce i mułowce triasu górnego		2	2600	0,1	0,1	900	2,5
4	J1	dominujące kompleksy piaskowców; mniejszościowe udziały mułowców oraz iłowców		10	2600	150	15	900	3,0
5	J2	mułowce i piaskowce jury środkowej		5	2600	1	1	900	2,5
6	J3	wapienie i mułowce jury górnej		1	2600	0,1	0,1	900	2,5
7	K1	kompleksy piaskowców z wkładkami iłowców kredy dolnej		15	2600	500	100	900	2,2
8	K2	margle i wapienie kredy górnej		3	2600	0,1	0,1	900	2,2

7.5.4.1. Modelowanie wpływu zmian parametrów eksploatacyjnych na uzyskiwane efekty pracy binarnej elektrociepłowni geotermalnej

Wyniki przeprowadzonej analizy doboru parametrów pracy systemu ORC dla strefy Ślesina zaprezentowano w tabelach 7.5.4.1–7.5.4.3. Obliczenia wykonano dla trzech oczekiwanych temperatur końcowych wody termalnej (woda schłodzona w systemie energetycznym) T_{g2}:

- **wariant A** – woda termalna zasila tylko elektrownię geotermalną (po zasileniu elektrowni będzie kierowana do odwiertu chłonnego) – wybrano te parametry pracy elektrowni, przy których moc elektrowni jest najwyższa;
- **wariant B** – woda termalna będzie wykorzystywana na potrzeby ciepłownicze lub do innych procesów technologicznych – do obliczeń przyjęto T_{g2}^{B} = 60°C;



Rys. 7.5.3.2. Temperatura prognozowana w spągu utworów jury dolnej rejonu Ślesina, według modelu stanu stacjonarnego

Fig. 7.5.3.2. Forecasted temperature in the bottom of the lower Jurassic structures in the Ślesin region, according to the steady state model

- **wariant C** – woda termalna będzie wykorzystywana na potrzeby technologii basenowej i/lub cele balneologiczne – do obliczeń przyjęto T_{g2}^{C} = 47°C.

Oznaczenia prezentowane w tabelach są zgodne z opisem przedstawionym w rozdziale 6.2. oraz ze schematem zaprezentowanym na rysunku 6.2.5.1.

Na podstawie analizy przedstawionej w tabeli 7.5.4.1, dla wody termalnej o temperaturze około 98°C, przy wydajności ujęcia na poziomie 150 m^3/h maksymalną moc elektrowni (481,3 kW) uzyskuje się przy zastosowaniu czynnika R227ea i temperaturze jego odparowania 64°C. Woda termalna schładzana jest w takim przypadku do temperatury 55°C. Przy założeniu, że woda termalna po zasileniu elektrowni zostanie schłodzona do temperatury 60°C (wariant B, tab. 7.5.4.2), najwyższą moc (476,2 kW) osiągnięto również przy zastosowaniu czynnika R227ea w temperaturze odparowania 70°C. Dla wariantu C (tab. 7.5.4.3) moc maksymalna elektrowni wyniosła 439 kW, przy zastosowaniu tego samego czynnika roboczego i jego odparowaniu w temperaturze 54°C.

Rodzaj zastosowanego czynnika roboczego znacząco wpływa na wielkość mocy elektrowni, przy czym należy rozpatrywać zespół cech i właściwości czynnika roboczego zarówno termodynamicznych jak i eksploatacyjnych. Trudno jest określić w jakim stopniu rodzaj czynnika pod kątem jego charakterystyk nasycenia (suchy, mokry) wpływa na efektywność pracy siłowni, gdyż tylko jeden z rozpatrywanych czynników zalicza się do grupy mokrych (metanol), natomiast zauważalny jest wpływ temperatury krytycznej czynnika. Dla czynników o niższych wartościach temperatury krytycznej zazwyczaj osiągano lepszą efektywność pracy elektrowni geotermalnej.

Tabela 7.5.4.1. Parametry termiczne i kaloryczne czynników roboczych oraz wyniki obliczeń dla wariantu A – maksymalizacja mocy elektrowni geotermalnej dla strefy ŚLESIN

Table 7.5.4.1. Thermal and calorific parameters of the operating media, as well as calculation results for the option A – maximization of the geothermal plant power for the ŚLESIN location

Lokalizacje ŚLESIN: T_{g1} = 98°C, $\dot{V}_g$ = 150 m^3/h, ΔT_1 = 5K ΔT_S = 3K, wariant A																				
Woda termalna					Parametry charakterystyczne czynnika											Układ ORC				
czynnik roboczy	T_{g2}	T_{g3}	T_{g4}	ΔT_2	T_{n1}	h_{n1}	T_{n2s}	h_{n2s}	T_{n3}	h_{n3}	T_{n4s}	h_{n4s}	$T_{n5} = T_{n6}$	h_{n5}	h_{n6}	m_n	N_t	N_p	N_{ORC}	Q_d	η_{ORC}
	°C	°C	°C	°C	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	kJ/kg	kg/s	kW	kW	kW	kW	%
R227ea	55,0	69,0	96,9	32,9	67,0	365,5	41,7	354,0	30,0	234,6	30,5	235,2	64,0	277,7	362,1	56,7	522,9	41,5	481,3	7 389,0	6,5
R1234ze	58,3	69,0	97,2	33,2	67,0	249,9	35,1	232,9	30,0	64,9	30,5	65,6	64,0	115,2	246,1	37,0	501,2	35,4	465,7	6 810,6	6,8
R236fa	58,4	69,0	97,3	33,3	67,0	405,1	41,0	390,1	30,0	237,3	30,2	237,7	64,0	282,5	402,0	40,6	487,0	21,1	465,9	6 799,4	6,9
Izobutan	58,2	67,0	97,3	35,3	65,0	642,5	38,4	610,1	30,0	271,2	30,3	272,2	62,0	354,1	636,0	18,4	478,5	23,1	455,4	6 833,2	6,7
MM	58,1	67,0	97,3	35,3	65,0	139,0	49,4	116,0	30,0	–141,1	30,0	–141,0	62,0	–78,4	134,2	24,5	450,5	1,1	449,6	6 854,2	6,6
Metanol	60,3	62,4	95,6	38,2	93,0	1 173,8	30,0	1 068,4	30,0	–92,8	30,0	–92,7	57,4	–19,7	1 094,7	5,2	431,5	0,4	431,0	6 480,4	6,7

Tabela 7.5.4.2. Parametry termiczne i kaloryczne czynników roboczych oraz wyniki obliczeń dla wariantu B dla strefy ŚLESIN

Table 7.5.4.2. Thermal and calorific parameters of the operating media, as well as calculation results for the option B for the ŚLESIN location

Lokalizacje ŚLESIN: T_{g1} = 98°C, T_{g2} = 60°C, $\dot{V}_g$ = 150 m^3/h, ΔT_S = 3K, wariant B																				
Woda termalna					Parametry charakterystyczne czynnika											Układ ORC				
czynnik roboczy	T_{g4}	ΔT_2	T_{g3}	ΔT_1	T_{n1}	h_{n1}	T_{n2s}	h_{n2s}	T_{n3}	h_{n3}	T_{n4s}	h_{n4s}	$T_{n5} = T_{n6}$	h_{n5}	h_{n6}	m_n	N_t	N_p	N_{ORC}	Q_d	η_{ORC}
	°C	°C	°C	°C	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	kJ/kg	kg/s	kW	kW	kW	kW	%
R227ea	97,0	27,0	74,5	4,5	73,0	368,4	42,9	355,1	30,0	234,6	30,6	235,3	70,0	286,0	364,8	49,0	521,2	45,1	476,2	6 523,6	7,3
R1234ze	97,2	31,2	70,8	4,8	69,0	250,8	35,2	233,0	30,0	64,9	30,5	65,6	66,0	118,3	247,0	35,2	502,1	36,5	465,6	6 523,6	7,1
R236fa	97,3	33,3	68,9	4,9	67,0	645,0	38,8	610,7	30,0	271,2	30,3	272,3	64,0	359,6	638,5	17,6	479,9	23,8	456,1	6 523,6	7,0
Izobutan	97,3	33,3	68,9	4,9	67,0	645,0	38,8	610,7	30,0	271,2	30,3	272,3	64,0	359,6	638,5	17,6	479,9	23,8	456,1	6 523,6	7,0
MM	97,4	33,4	68,9	4,9	67,0	142,1	50,5	117,7	30,0	–141,1	30,0	–141,0	64,0	–74,4	137,2	23,0	449,3	0,9	448,3	6 523,6	6,9
Metanol	95,7	38,6	62,2	5,1	92,0	1 172,2	30,0	1068,4	30,0	–92,8	30,0	–92,8	57,0	–20,8	1 094,3	5,2	428,2	0,4	427,8	6 523,6	6,6

Tabela 7.5.4.3. Parametry termiczne i kaloryczne czynników roboczych oraz wyniki obliczeń dla wariantu C dla strefy ŚLESIN

Table 7.5.4.3. Thermal and calorific parameters of the operating media, as well as calculation results for the option C for the ŚLESIN location

Lokalizacje ŚLESIN: T_{g1} = 98°C, T_{g2} = 47°C, $\dot{V}_g$ = 150 m^3/h, ΔT_S = 3K, wariant C																				
Woda termalna					Parametry charakterystyczne czynnika											Układ ORC				
czynnik roboczy	T_{g4}	ΔT_2	T_{g3}	ΔT_1	T_{n1}	h_{n1}	T_{n2s}	h_{n2s}	T_{n3}	h_{n3}	T_{n4s}	h_{n4s}	$T_{n5} = T_{n6}$	h_{n5}	h_{n6}	m_n	N_t	N_p	N_{ORC}	Q_d	η_{ORC}
	°C	°C	°C	°C	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	kJ/kg	kg/s	kW	kW	kW	kW	%
R227ea	96,7	42,7	59,0	5,0	57,0	360,3	39,3	351,9	30,0	234,6	30,3	235,0	54,0	264,5	357,1	69,8	470,7	31,7	439,0	8 755,4	5,0
R1234ze	97,0	47,0	55,2	5,2	53,0	242,7	34,4	232,2	30,0	64,9	30,2	65,2	50,0	93,7	239,3	49,3	414,1	24,0	390,0	8 755,4	4,5
R236fa	97,1	47,1	55,3	5,3	53,0	396,3	37,6	387,1	30,0	237,3	30,1	237,5	50,0	263,4	393,4	55,1	405,3	14,7	390,6	8 755,4	4,5
Izobutan	97,1	49,1	53,5	5,5	51,0	624,2	35,8	605,3	30,0	271,2	30,1	271,7	48,0	316,8	618,2	24,8	376,2	15,3	360,9	8 755,4	4,1
MM	97,1	47,1	54,6	4,6	53,0	120,8	43,0	106,1	30,0	–141,1	30,0	–141,0	50,0	–102,2	116,1	33,5	392,3	0,9	391,3	8 755,4	4,5
Metanol	96,4	53,0	48,5	5,1	58,0	1 119,8	30,0	1 068,4	30,0	–92,8	30,0	–92,8	43,4	–57,8	1 081,5	7,3	296,8	0,2	296,6	8 755,4	3,4

7.5.5. Model numeryczny pracy dubletu geotermalnego

W rejonie Ślesina poziom perspektywiczny dla eksploatacji energii geotermalnej w systemach binarnych stanowią horyzonty wodonośne w utworach jury dolnej, gdzie prognozowana temperatura złożowa może wynosić około 110°C na głębokości 3300–3400 m p.p.t. (ok. –3200 m n.p.m. – –3300 m n.p.m.) W strefie perspektywicznej miąższość osadów jury dolnej wynosi około 200 m, natomiast zakładana przepuszczalność horyzontalna tych utworów wynosi 150 mD, a mineralizacja wód zbiornikowych około 100 g/dm^3. W modelowaniu wykorzystano moduł TOUGH2-EWASG, uwzględniający wpływ zasolenia wód.

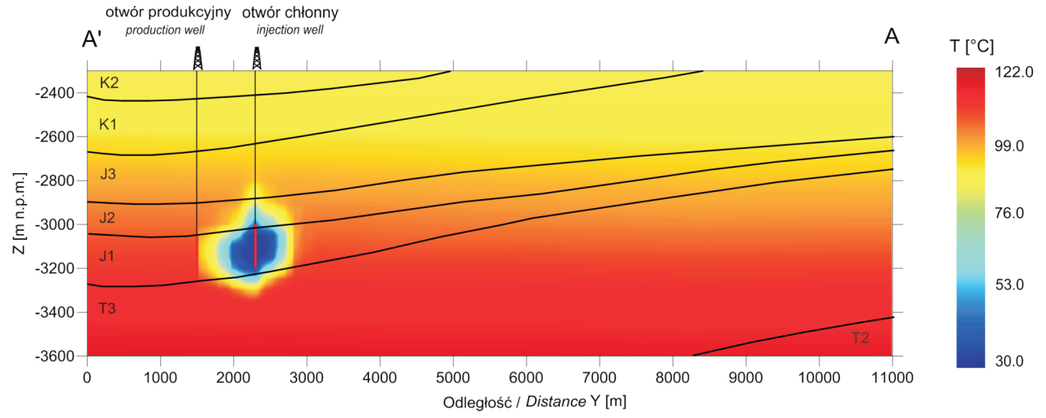
Przyjęto, że temperatura zatłaczanej solanki będzie wynosić 30°C, co pozwoliłoby na wykorzystanie ciepła wód geotermalnych zarówno do wytwarzania energii elektrycznej w układach binarnych jak i na zagospodarowanie pozostałej ilości ciepła w systemie kaskadowym na cele grzewcze (ciepłownictwo, rekreacja i/lub balneologia i inne). Dla 50-letniego przedziału czasu objętego modelowaniem przyjęto stałą wydajność dubletu równą 150 m^3/h. W modelu przyjęto, że odległość pomiędzy otworem produkcyjnym i chłonnym będzie wynosić około 800 m. Wobec przyjętej wartości przepuszczalności poziomej oraz przewidywanej miąższości utworów jury dolnej dystans ten powinien być wystarczający dla uzyskiwania stabilnej temperatury na wypływie przez cały okres symulowanej eksploatacji (50 lat), przy spadku temperatury złożowej w otworze produkcyjnym nie większym niż 5°C.

Prognozowany spadek ciśnienia złożowego w strefie otworu produkcyjnego wyniesie około 0,48 MPa (zał. 7.5.3 – rys. 3a i 4). Represja ciśnienia w otworze chłonnym, wywoływana zatłaczaniem schłodzonej solanki, wyniesie według obliczeń symulacyjnych około 1,14 MPa (zał. 7.5.3 – rys. 3b i 4). Przeszło dwukrotnie wyższe ciśnienie niezbędne do powrotnego wtłoczenia wody do złoża będzie efektem wzrostu wartości lepkości dynamicznej solanki, z około $3{,}3 \cdot 10^{-4}$ Pa·s do $9{,}6 \cdot 10^{-4}$ Pa·s, powodowanej głównie spadkiem temperatury. Wskazane wartości zmian ciśnienia (0,48 MPa oraz 1,14 MPa) uwzględniają wyłącznie warunki przepływu przez warstwę złożową, nie uwzględniają natomiast oporów przepływu w otworach, które mogą być istotne przy wydajnościach rzędu 150 m^3/h. Korzystnym efektem eksploatacyjnym będzie natomiast wygrzewanie się otworu eksploatacyjnego, co wskutek wzrostu objętości wody powinno przyczynić się także do znacznego podniesienia zwierciadła wody w otworze produkcyjnym.

Wyniki symulacji analizowanego wariantu eksploatacji wskazują, że wychłodzenie wód złożowych w strefie przyfiltrowej otworu produkcyjnego wyniesie niespełna 4°C po upływie 50 lat (zał. 7.5.3 – rys. 3a). Na załączniku 7.5.3 – rys. 4 oraz na rysunku 7.5.5.1 przedstawiono charakter wychłodzenia strefy dubletu otworów wzdłuż przekroju przechodzącego przez otwory (X = 8,5 km). Symulacja wskazuje, że wychłodzenie złoża nastąpi głównie w rejonie otworu chłonnego – z malejącą intensywnością w kierunku otworu produkcyjnego. Pierwsze objawy niewielkiego spadku temperatury są prognozowane po około dwudziestu latach.

7.5.6. Prognoza efektów finansowych, energetycznych, ekologicznych i społecznych

W mieście Ślesin nie ma scentralizowanej sieci ciepłowniczej, odbiorcy korzystają z indywidualnych – lokalnych źródeł energii (por. rozdział 7.5.1). Moc całkowita większych odbiorców energii cieplnej szacowana jest na 2,25 MW (por. rozdział 7.5.1). Moc ujęcia geotermalnego, dla którego parametry



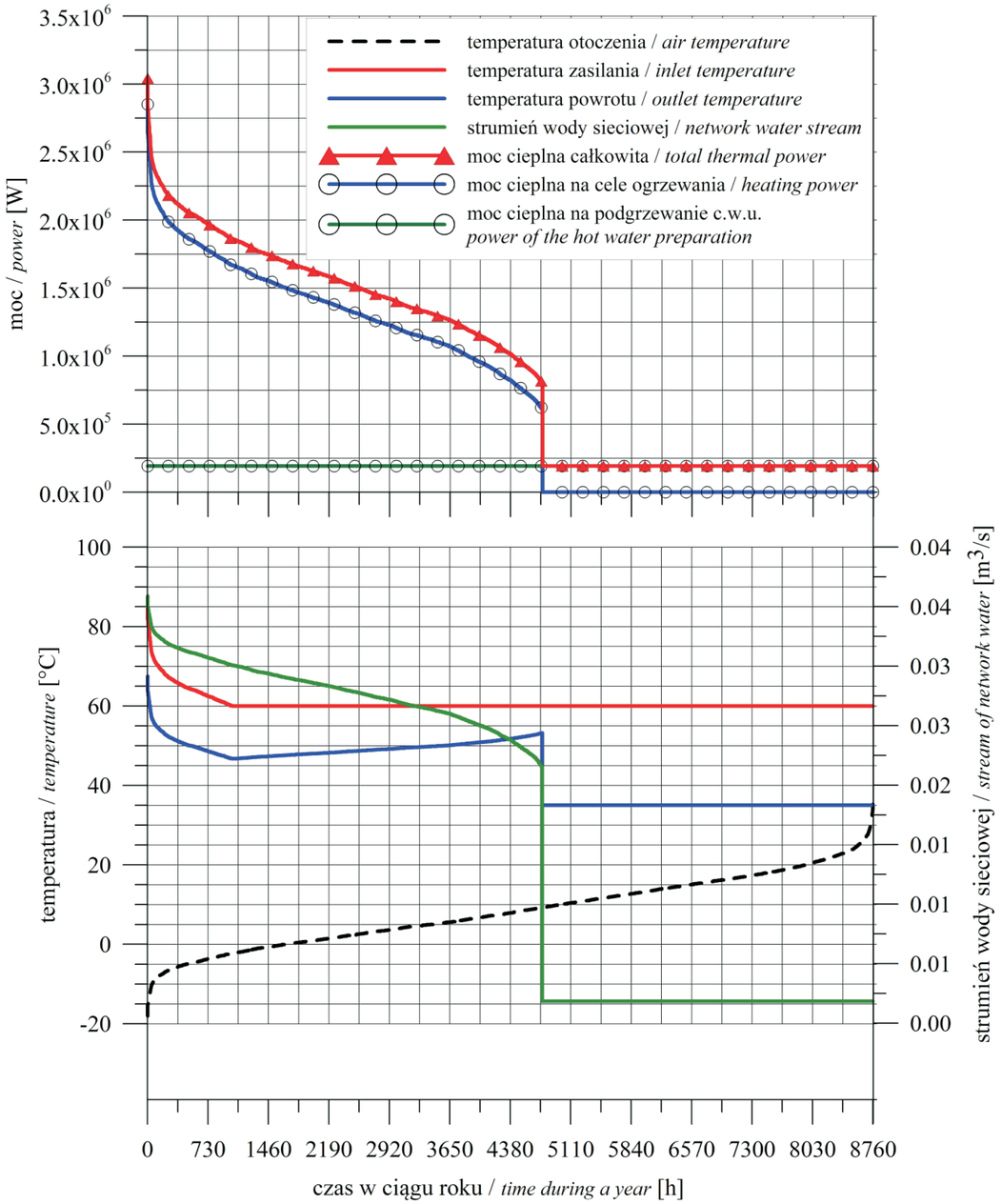
Rys. 7.5.5.1. Temperatura prognozowana w rejonie Ślesina (przekrój A'A, X=8500) po 50 latach eksploatacji instalacji binarnej

Fig. 7.5.5.1. Forecasted temperature in the Ślesin region (A'A cross-section, X=8500) after 50 years of binary installation operation

zestawiono w tabeli 7.5.6.1, przewyższa zapotrzebowanie na moc dużych odbiorców ponad dwukrotnie (wynosi ok. 4,8 MW, zakładając schłodzenie wody do 70°C). Niestety, w rejonie miasta nie ma możliwych do wykorzystania otworów wiertniczych. W powiązaniu z brakiem sieci ciepłowniczej liczyć się zatem należy z wysokim poziomem nakładów inwestycyjnych związanych z udostępnieniem i dystrybucją energii geotermalnej. Nakłady te oszacowano na ponad 73 mln zł, uwzględniając również siłownię binarną (tab. 7.5.6.2). Założono, że cieplna moc maksymalna instalacji będzie nieco wyższa od zapotrzebowania na moc dla dużych odbiorców. Uwzględniając prognozowane straty na przesyle moc cieplną źródła energii określono na około 3,5 MW (tab. 7.5.6.1, rys. 7.5.6.2). Moc elektryczną siłowni binarnej oszacowano na około 452 kW brutto (tab. 7.5.6.1), przy mocy netto odprowadzanej do sieci elektroenergetycznej rzędu 370 kW (rys. 7.5.6.2).

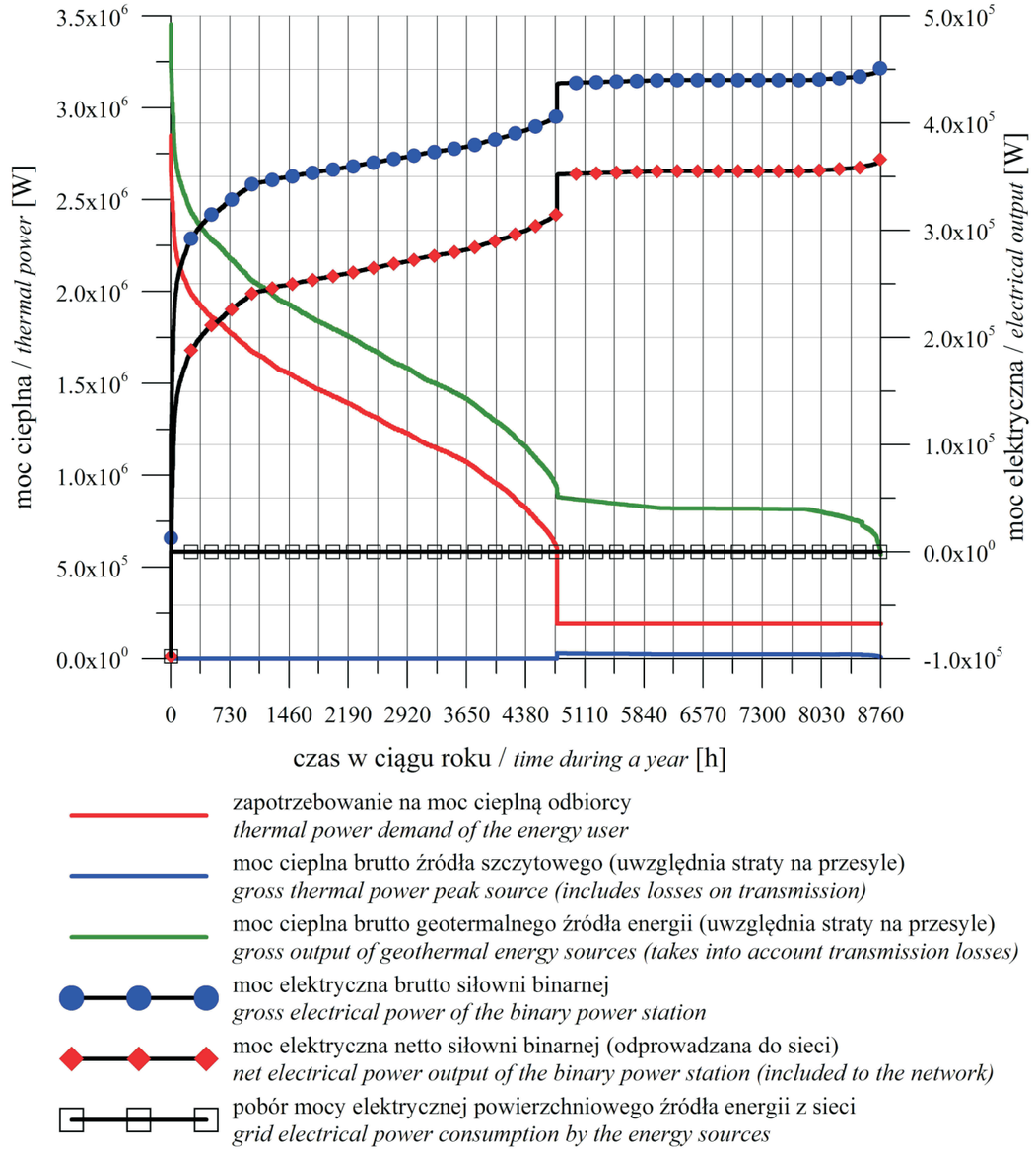
Cena netto energii cieplnej, gwarantująca osiągnięcie rentowności ekonomicznej dla przedsięwzięcia, została oszacowana na około 136,8 zł/GJ, co w świetle wartości rynkowych tego parametru (Pająk, Bujakowski 2013a) stawia omawiane rozwiązanie w gronie rozwiązań droższych od oleju opałowego – czyli rozwiązań „drogich". Efekty ekologiczne w postaci obniżenia emisji zanieczyszczeń związanej z redukcją zużycia paliw kopalnych zestawiono w tabeli 7.5.6.3.

Efekty społeczne wykorzystania wód termalnych w rejonie Ślesina wiązać się będą z powstaniem nowych miejsc pracy w liczbie około 6, w rejonie uruchomienia inwestycji. Biorąc pod uwagę możliwość budowy na bazie analizowanych wód również obiektów balneo-rekreacyjnych, liczba miejsc pracy wzrosłaby znacząco. Miejsca w których uruchomiono dotychczas instalacje geotermalne wykorzystujące wody w celach balneo-rekreacyjnych, świadczą o dużym zainteresowaniu klientów tego typu usługami. Takie przedsięwzięcia stymulują lokalny rynek usług i znacząco wpływają na wzrost atrakcyjności turystycznej. Zyskuje na tym branża gastronomiczna, hotelarska, rozwija się rynek różnorodnych usług.



Rys. 7.5.6.1. Definicja odbiorcy energii dla lokalizacji Ślesin

Fig. 7.5.6.1. Energy end-user characteristic for Ślesin location



Rys. 7.5.6.2. Moc cieplna i elektryczna wytwarzana przez źródło energii dla lokalizacji Ślesin

Fig. 7.5.6.2. Heat and electric power generated by the energy source in Ślesin location

Tabela 7.5.6.1. Parametry techniczne dla instalacji źródła energii dla lokalizacji Ślesin

Table 7.5.6.1. Technical parameters for the heat source installation in Ślesin location

Parametr	Wartość
Lokalizacja	Ślesin
Głębokość otworu produkcyjnego [m]:	3358
Średnica otworu produkcyjnego [m]:	0,244475
Stan otworu produkcyjnego:	nowy
Strumień nominalny (maksymalny) wody termalnej [m^3/h]:	150
Temperatura wody w warstwie wodonośnej [°C]:	100
Poziom zwierciadła statycznego w otworze produkcyjnym [m p.p.t.]:	100
Ciśnienie depresji [MPa]:	0,475
Głębokość otworu chłonnego [m]:	3323
Stan otworu chłonnego:	nowy
Poziom zwierciadła statycznego w otworze chłonnym [m p.p.t.]:	100
Ciśnienie represji [MPa]:	1,135
Projektowana temperatura schłodzenia wody termalnej w siłowni binarnej [°C]:	55
Projektowana temperatura wody termalnej na głowicy otworu produkcyjnego [°C]:	97,77
Temperatura minimalna (projektowa) powietrza zewnętrznego [°C]:	-18
Temperatura projektowa zasilania instalacji odbiorcy [°C]:	86,53
Temperatura projektowa powrotu z instalacji odbiorcy [°C]:	67,47
Nominalny (maksymalny) strumień czynnika dla instalacji odbiorcy [m^3/h]:	129,2
Moc cieplna całkowita odbiorcy [kW]:	3043
Moc cieplna centralnego ogrzewania dla odbiorcy [kW]:	2850
Moc cieplna przygotowania ciepłej wody użytkowej dla odbiorcy [kW]:	193
Całkowite zapotrzebowanie na energię cieplną odbiorcy [GJ/rok]:	26130,5
Całkowita moc cieplna zainstalowana w źródle energii (uwzględnia straty mocy na przesyle) [kW]:	3486,4
Całkowita ilość energii cieplnej wytworzonej przez źródło energii (uwzględnia straty na przesyle) [GJ/rok]:	41764,5
Całkowita moc cieplna zainstalowana w części geotermalnej [kW]:	3456,3
Całkowita ilość energii cieplnej wytworzonej z geotermii (uwzględnia straty na przesyle) [GJ/rok]:	41418,9
Całkowita moc cieplna zainstalowana w ciepłowni szczytowej [kW]:	30
Całkowita ilość energii cieplnej wytworzonej przez kotłownię szczytową (uwzględnia straty na przesyle) [GJ/rok]:	345,6
Całkowita moc elektryczna zainstalowana w geotermalnej siłowni binarnej [kW]:	452,4
Całkowita ilość energii elektrycznej wytworzonej przez siłownię binarną brutto (uwzględnia potrzeby całej własne instalacji) [MWh/rok]:	3452,5
Ilość energii elektrycznej wytworzonej przez siłownię binarną netto (po odjęciu potrzeb własnych instalacji = energia sprzedana) [MWh/rok]:	2643,1
Długość całkowita rurociągu z wodą termalną (od głowic otworów do ciepłowni) [m]:	200
Średnica nominalna rury przewodowej dla rurociągu z wodą termalną (od głowic otworów do ciepłowni) [m]:	0,21026
Stan rurociągu z wodą termalną:	nowy
Długość całkowita rurociągu od ciepłowni geotermalnej do ciepłowni szczytowej [m]:	500
Średnica nominalna rury przewodowej dla rurociągu od ciepłowni geotermalnej do ciepłowni szczytowej [m]:	0,19512
Stan rurociągu od ciepłowni geotermalnej do ciepłowni szczytowej:	nowy
Długość całkowita rurociągu od ciepłowni szczytowej do odbiorcy energii cieplnej [m]:	5000
Średnica nominalna rury przewodowej dla rurociągu od ciepłowni szczytowej do odbiorcy energii [m]:	0,19512
Stan rurociągu od ciepłowni szczytowej do odbiorcy:	nowy
Maksymalne opory przepływu na rurociągach ciepłowniczych przesyłowych (z wyłączeniem rurociągu z wodą termalną) [MPa]:	0,5753
Maksymalne opory przepływu na rurociągu z wodą termalną [MPa]:	0,0205
Maksymalne ciśnienie do pokonania przez pompy geotermalne (ciśnienie represji minus ciśnienie depresji) [MPa]:	1,61
Średnie roczne straty energii cieplnej na przesyle [ułamek energii cieplnej wytworzonej w źródle energii]:	0,37

Tabela 7.5.6.2. Zestawienie parametrów ekonomicznych dla instalacji powierzchniowego źródła energii dla lokalizacji Ślesin

Table 7.5.6.2. List of the economic parameters for the surface energy source installation in Ślesin location

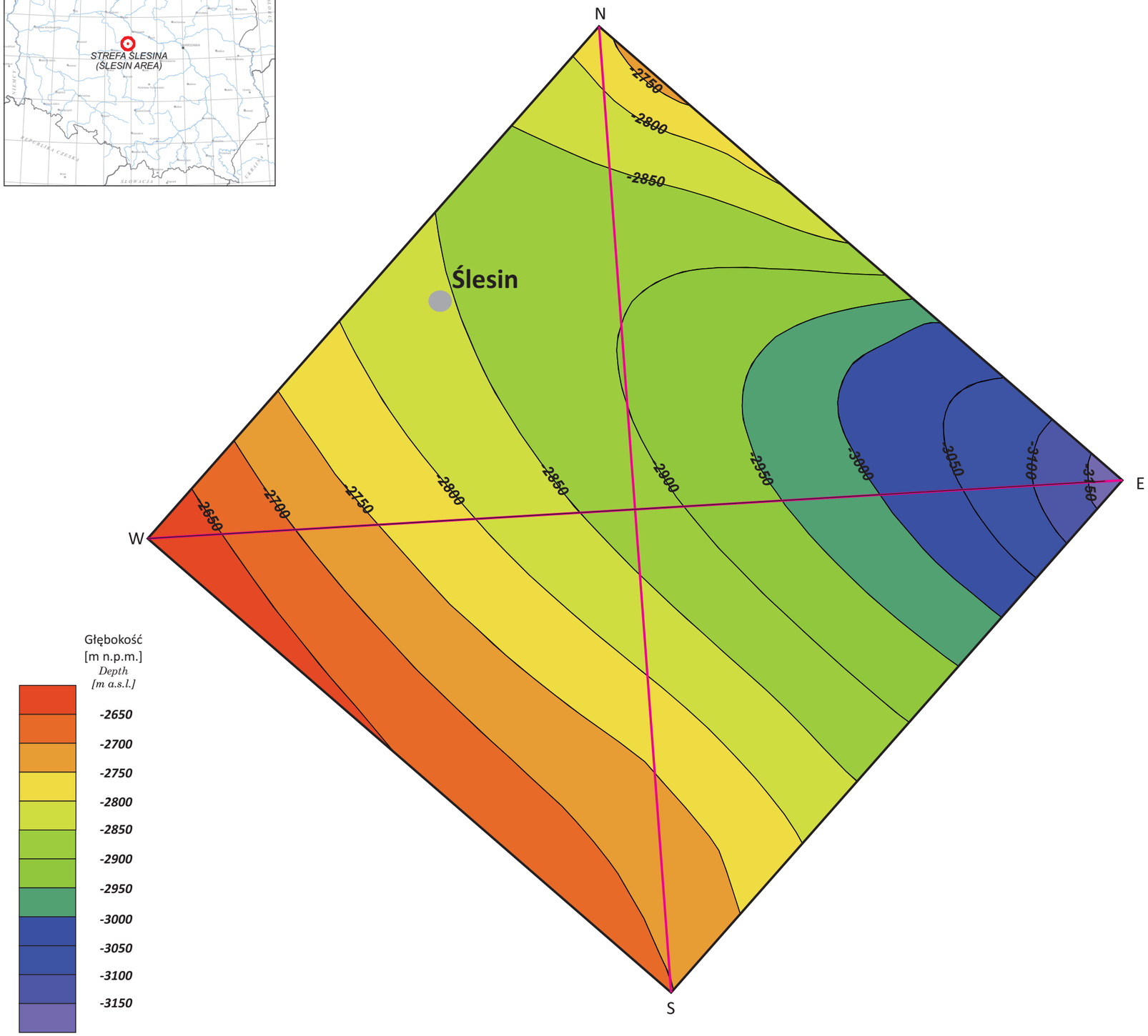
Parametr	Wartość
Cena netto zakupu energii elektrycznej [zł/kWh]:	0,488
Cena netto sprzedaży energii elektrycznej [zł/kWh]:	0,24
Cena netto zakupu gazu ziemnego wysokometanowego [zł/m^3]:	1,626
Cena netto sprzedaży energii cieplnej gwarantująca finansową rentowność inwestycji [zł/GJ]:	136,58
Całkowite prognozowane nakłady inwestycyjne (główne komponenty zestawiono poniżej) [tys. zł]:	73146
Nakłady inwestycyjne na otwór produkcyjny [tys. zł]:	27666
Nakłady inwestycyjne na otwór chłonny [tys. zł]:	27275
Nakłady inwestycyjne na siłownię binarną [tys. zł]:	4138
Nakłady inwestycyjne na szczytowe kotły gazowe [tys. zł]:	11
Nakłady inwestycyjne na pompy geotermalne (głębinowa i stacja pomp zatłaczania) [tys. zł]:	479
Nakłady inwestycyjne na pompy obiegowe [tys. zł]:	53
Nakłady inwestycyjne na wymienniki ciepła [tys zł]:	586
Nakłady inwestycyjne na rurociągi połączeniowe [tys. zł]:	11143
Nakłady inwestycyjne na budynek ciepłownigeotermalnej i szczytowej [tys. zł]:	977
Całkowite koszty obsługi instalacji (główne składniki kosztów zestawiono poniżej) [tys. zł/rok]:	4203
Amortyzacja środków trwałych [tys. zł/rok]:	3454
Koszty obsługi, remontów, konserwacji [tys. zł/rok]:	731
Koszty zakupu nośników energii [tys. zł/rok]:	18
Przychody z tytułu sprzedaży energii (szczegółowo zestawiono poniżej) [tys. zł/rok]:	4203
Przychody z tytułu sprzedaży energii cieplnej [tys zł/rok]:	3569
Przychody z tytułu sprzedaży energii elektrycznej [tys. zł/rok]:	634

Tabela 7.5.6.3. Zestawienie parametrów ekologicznych dla instalacji powierzchniowego źródła energii dla lokalizacji Ślesin

Table 7.5.6.3. List of the ecological parameters for the surface energy source installation in Ślesin location

Parametr	Wartość
Roczna emisja B(a)P dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0
Roczna emisja sadzy dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0
Roczna emisja pyłu dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0
Roczna emisja CO_2 dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	2525,759
Roczna emisja CO dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0,46
Roczna emisja NO_x w przeliczeniu na NO_2 dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	1,629
Roczna emisja SO_2 dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0
Roczna emisja węglowodorów alifatycznych dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0,125
Roczna emisja w. węglowodorów aromatycznych dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0,042
Roczne ograniczenie emisji B(a)P [Mg/rok]:	0,042
Roczne ograniczenie emisji sadzy [Mg/rok]:	21,515
Roczne ograniczenie emisji pyłu [Mg/rok]:	86,918
Roczne ograniczenie emisji CO_2 [Mg/rok]:	4656,858
Roczne ograniczenie emisji CO [Mg/rok]:	244,472
Roczne ograniczenie emisji NO_x w przeliczeniu na NO_2 [Mg/rok]:	5,785
Roczne ograniczenie emisja SO_2 [Mg/rok]:	47,638
Roczne ograniczenie emisji węglowodorów alifatycznych [Mg/rok]:	14,959
Roczne ograniczenie emisji wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych [Mg/rok]:	12,217





Zał. 7.5.1

MAPA STROPU UTWORÓW DOLNEJ JURY W STREFIE ŚLESINA*

Encl. 7.5.1

MAP OF THE TOP OF LOWER JURASSIC IN THE ŚLESIN AREA

*na podstawie: Górecki (red.), 2006
(based on: Górecki (ed.), 2006)

LEGENDA:
LEGEND:

Główne miasto
Main city

Linie przekrojów geologicznych (Zał. 7.5.2)
Cross-section lines (Encl. 7.5.2)

-2700 Izohipsy stropu utworów jury dolnej [m n.p.m.]
Isohypses of the top of Lower Jurassic formation [m a.s.l.]

0 2 4 km

WYKONANO NA ZAMÓWIENIE MINISTRA ŚRODOWISKA ZA ŚRODKI FINANSOWE WYPŁACONE PRZEZ NARODOWY FUNDUSZ OCHRONY ŚRODOWISKA I GOSPODARKI WODNEJ

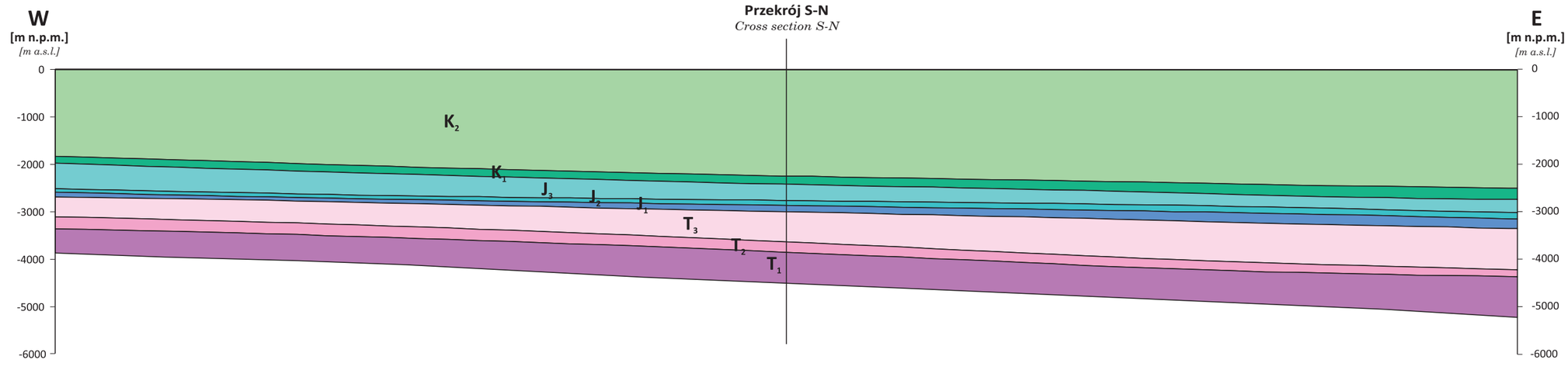


PRZEKROJE GEOLOGICZNE PRZEZ STREFĘ ŚLESINA (przebieg na zał. 7.5.1)*

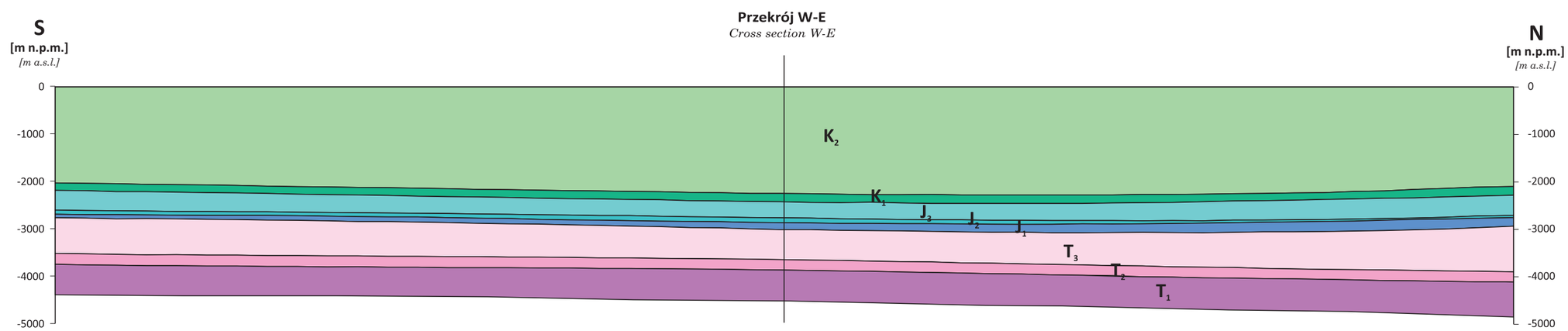
GEOLOGICAL CROSS-SECTIONS THROUGH THE ŚLESIN AREA (line at encl. 7.5.1)

Zał. 7.5.2
Encl. 7.5.2

NIECKA MOGILEŃSKO-ŁÓDZKA



NIECKA MOGILEŃSKO-ŁÓDZKA



K_2	Kreda górna *Upper Cretaceous*	J_3	Jura górna *Upper Jurassic*	T_3	Trias górny *Upper Triassic*
K_1	Kreda dolna *Lower Cretaceous*	J_2	Jura środkowa *Middle Jurassic*	T_2	Trias środkowy *Middle Triassic*
		J_1	Jura dolna *Lower Jurassic*	T_1	Trias dolny *Lower Triassic*

0 1 2 km

*na podstawie: Górecki (red.), 2006
(based on: Górecki (ed.), 2006)

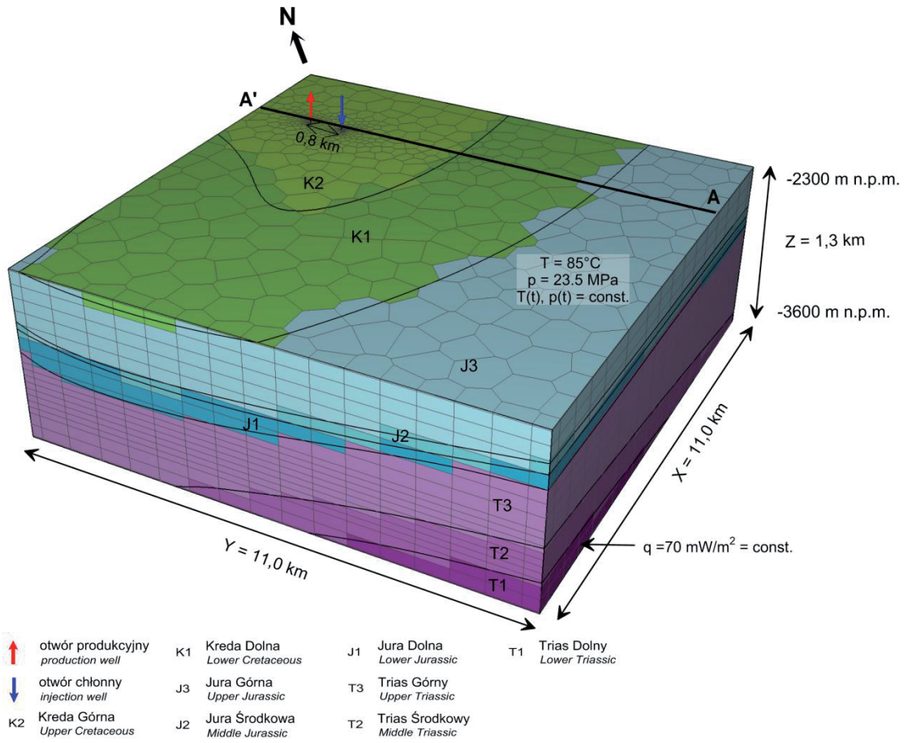
WYKONANO NA ZAMÓWIENIE MINISTRA ŚRODOWISKA ZA ŚRODKI FINANSOWE WYPŁACONE PRZEZ NARODOWY FUNDUSZ OCHRONY ŚRODOWISKA I GOSPODARKI WODNEJ

WYNIKI MODELOWANIA NUMERYCZNEGO W STREFIE ŚLESINA

Zał. 7.5.3

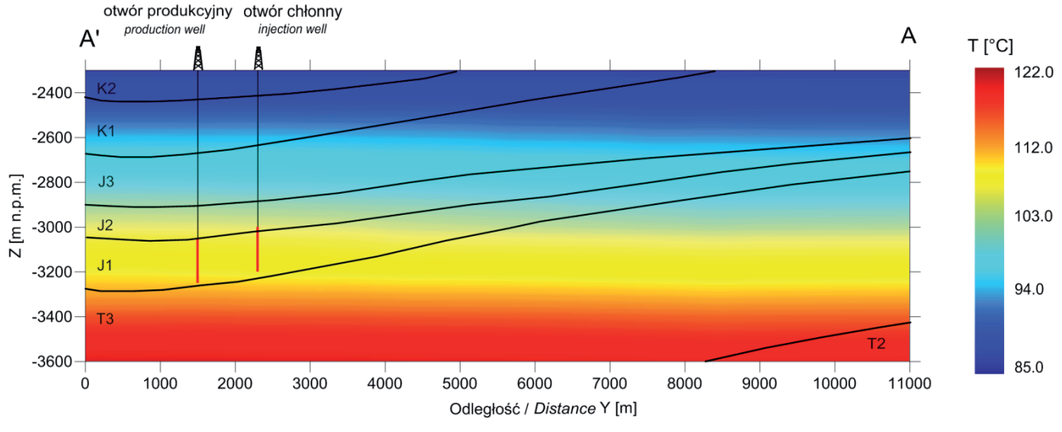
NUMERICAL MODELING RESULTS IN THE ŚLESIN AREA

Encl. 7.5.3



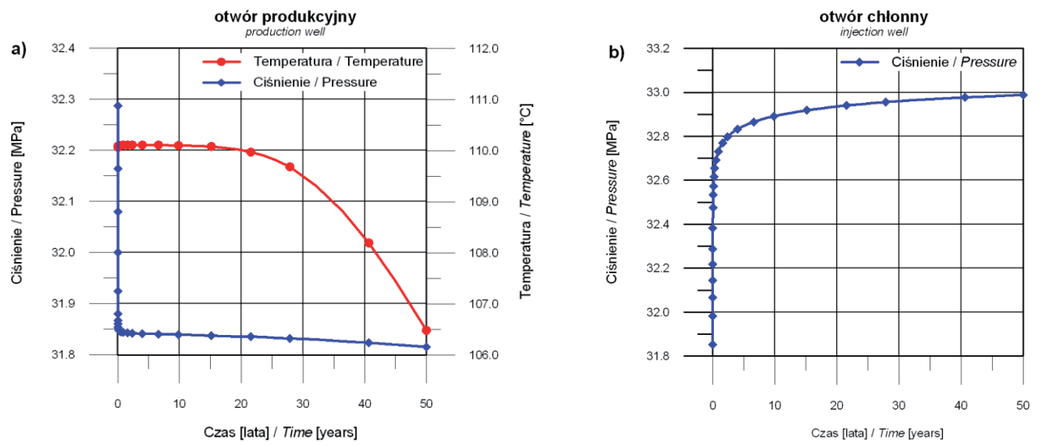
Rys. 1. Model numeryczny strefy Ślesina

Fig. 1. Numerical model of the Ślesin area



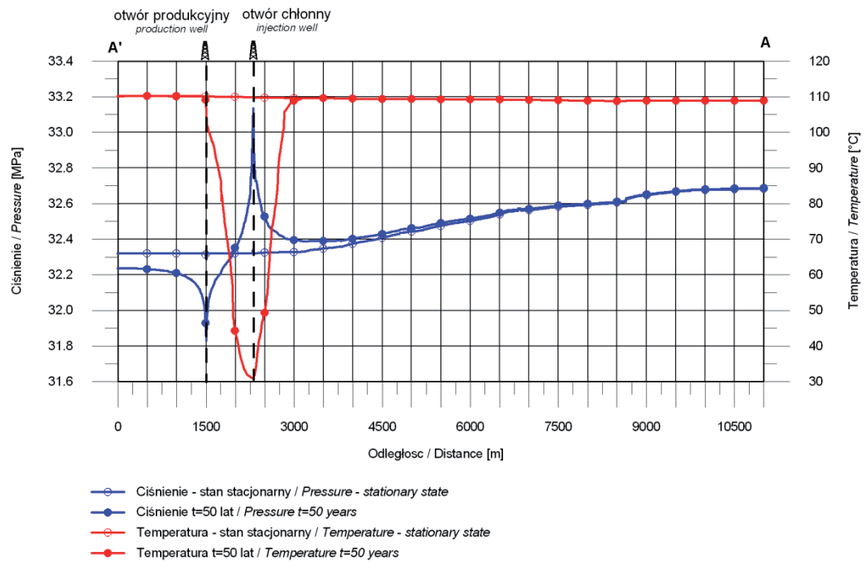
Rys. 2. Prognozowany rozkład temperatury w modelu stanu przedeksploatacyjnego wzdłuż przekroju A'A

Fig. 2. Forecasted temperature distribution prior to exploitation along the A'A cross section



Rys. 3. a) Zmiana temperatury i ciśnienia złożowego w funkcji czasu w otworze produkcyjnym, b) zmiana ciśnienia złożowego w otworze chłonnym na głębokości z = -3175 m n.p.m dla wydajności dubletu Q = 150 m^3/h

Fig. 3. a) Change of the reservoir temperature and pressure versus time in the production well, b) change of the reservoir pressure in the injection well at the depth z = -3175 m a.s.l. for the doublet flow rate Q = 150 m^3/h



Rys. 4. Zmiana temperatury złożowej oraz ciśnienia złożowego wzdłuż przekroju A'A na głębokości z = -3175 m n.p.m. dla wydajności dubletu Q = 150 m^3/h

Fig. 4. Cross-sectional change of the reservoir temperature and pressure along the A'A cross section at the depth z = -3175 m a.s.l. for the doublet flow rate Q = 150 m^3

7.6. Żnin

7.6.1. Ogólna charakterystyka strefy

Żnin to miasto w woj. kujawsko-pomorskim (www.um.znin.pl), w powiecie żnińskim, siedziba gminy miejsko-wiejskiej Żnin. Położone jest nad Jeziorem Żnińskim Dużym i Jeziorem Żnińskim Małym. Liczba mieszkańców miasta wynosi około 14 150, a powierzchnia 8,35 km^2. Powierzchnia gminy wynosi 251,55 km^2 i jest zamieszkiwana przez około 24,5 tys. mieszkańców (UM w Żninie, wg danych na 2013 r.). Przez miasto przebiega droga krajowa nr 5, łącząca Bydgoszcz z Gnieznem i Poznaniem, droga wojewódzka nr 251, przebiegająca od Inowrocławia w kierunku Wągrowca oraz linia kolejowa nr 206 (o znaczeniu lokalnym) łącząca Żnin z Inowrocławiem.

Pod względem fizyczno-geograficznym gmina Żnin znajduje się w granicach tzw. mezoregionu Pojezierza Gnieźnieńskiego, stanowiącego fragment Pojezierza Wielkopolskiego (Kondracki 2002); pod względem geobotanicznym jest częścią Krainy Wielkopolsko-Kujawskiej. W ujęciu geologicznym teren gminy znajduje się w obrębie synklinorium mogileńskiego. Współczesna rzeźba terenu jest efektem działalności lodowcowej, zlodowacenia bałtyckiego. Krajobraz gminy stanowi wysoczyzna polodowcowa z sandrami i rynnami jeziornymi. Średnia wysokość, na której jest położone miasto Żnin wynosi około 85 m n.p.m.

Teren gminy należy do środkowopolskiego obszaru klimatycznego. Średnia roczna temperatura wynosi 7,5°C, najcieplejszym miesiącem jest lipiec – średnia temperatura 17,7°C, najzimniejszym – luty z temperaturą –3,2°C. Lata i zimy trwają około 90 dni, okres wegetacyjny około 220 dni. Dni z całodzienną temperaturą ujemną jest około 40, natomiast ze średnią temperaturą 25°C – 28. Pokrywa śnieżna zalega około 60 dni w roku. Dominują wiatry zachodnie. Charakterystyczne dla regionu są częste zmiany pogody oraz najniższe w Polsce sumy opadów wynoszące około 500 mm na rok (dane UM w Żninie).

Gmina Żnin jest w całości zwodociągowana. Miasto Żnin jest zasilane z dwu podstawowych ujęć stacji wodociągowych położonych przy ul. A. Mickiewicza oraz na osiedlu Górskim. Pierwsze ujęcie wody zasila około 75% miasta oraz trzy okoliczne miejscowości: Jaroszewo, Sarbinowo, Żnin–Wieś. Drugie ujęcie znajduje się przy ulicy Pałuckiej i Klemensa Janickiego, zasila ono około 25% miasta. Studnie wiercone ujmują wodę z utworów czwartorzędowo-trzeciorzędowych. Podstawą zaopatrzenia miasta Żnin są wody pochodzenia mioceńskiego zlokalizowane na głębokości 70–125 m p.p.t.

Ogólny udział obszarowych form ochrony przyrody, które na terenie gminy Żnin reprezentowane są wyłącznie przez obszary chronionego krajobrazu, wynosi prawie 19,3% ogólnej powierzchni analizowanej jednostki. Obszary te, to:

- Obszar Chronionego Krajobrazu Jezior Żnińskich,
- Obszar Chronionego Krajobrazu Jezior Żędowskich,
- Obszar Chronionego Krajobrazu Jezior Rogowskich.

Głównym źródłem ciepła dla Żnina jest kotłownia zlokalizowana na terenie dzielnicy składowo-przemysłowej wyposażona w dwa kotły WP 10 o nominalnej mocy 11,6 MW każdy. Długość sieci ciepłowniczej wynosi 23,5 km. Na terenie gminy znajdują się kotłownie zasilające w c.o. osiedla budownictwa wielorodzinnego w Brzyskorzystewku i Cerekwicy.

W północnej części miasta wydzielona została strefa przemysłowa terenów inwestycyjnych (łącznie ok. 64 ha) przeznaczonych na cele produkcyjne, magazynowo-składowe i handlowe. Główne atuty Żnina to:

- atrakcyjne położenie (przy drodze pomiędzy Bydgoszczą a Gnieznem),
- bliskość wielkich rynków zbytu (Bydgoszcz, Gniezno, Poznań, Inowrocław, Toruń),
- pełne wyposażenie terenów inwestycyjnych w infrastrukturę techniczną,
- walory kulturowe i turystyczne regionu Pałuki (liczne jeziora, lasy, kolejka wąskotorowa Żnin––Wenecja–Biskupin–Gąsawa, zabytki architektury, muzea),
- duże zasoby wykwalifikowanej siły roboczej.

Powyższe walory zostały dostrzeżone przez takich inwestorów, jak amerykański koncern Pepsi-Cola, Frigo Logistics (japoński właściciel Nichirei Corporation of Tokyo), niemiecki Köhler + Bovenkamp czy francuska Preva. O potencjale gospodarczym Żnina stanowią również firmy rodzime, jak: Domaroll, Jantex, Kandex, Lipro, Mech-Masz, Pozmlecz, Ronach, a także liczne banki, urzędy i instytucje oraz rozwijający się sektor usług i handlu.

7.6.2. Koncepcyjny model geologiczny i parametry hydrogeotermalne

Model budowy geologicznej strefy opracowano na podstawie danych archiwalnych i informacji zawartych w rozdz. 4.2.1 i 5.5 oraz materiałów publikowanych i niepublikowanych, w tym atlasie opracowanym pod redakcją Góreckiego (2006).

Strefa Żnina, zlokalizowana w NW części niecki mogileńsko-łódzkiej, obejmuje strukturę słupa solnego Damasławka, związanego z systemem regionalnych dyslokacji o kierunku NW-SE. Słup solny przebija utwory triasowo-jurajsko-kredowe, tworzące synklinę pomiędzy poduszkami solnymi Janowca (na SW) i Szubina (na NE). Informacje o budowie geologicznej zaczerpnięto z dokumentacji otworów Damasławek 22 (w obrębie strefy Żnina; Zboińska 1989) i Niestronno-1 (na SE od strefy Żnina, w pobliżu wysadu solnego Mogilna; Olczak 1965) oraz z regionalnych przekrojów geologicznych, map strukturalnych głównych serii stratygraficznych, oraz danych z bardziej odległych otworów wiertniczych (Górecki (red.) 2006).

Elementy strukturalnego modelu geologicznego tej strefy zostały przedstawione na załącznikach 7.6.1 i 7.6.2.

Strefa Żnina jest fragmentem niecki mogileńsko-łódzkiej, która powstała na miejscu tzw. garbu wielkopolskiego, istniejącego w jurze dolnej i środkowej. Występowała tam wyraźnie zredukowana miąższość osadów. Garb wielkopolski od NE sąsiadował z bruzdą kujawską – strefą szybkiego wzrostu miąższości osadów jury dolnej i środkowej, związaną prawdopodobnie z synsedymentacyjną dyslokacją Gopła–Lutomierska. Strefa Żnina stanowi NW, peryferyjną część tej regionalnej strefy dyslokacyjnej, która ma kierunek NW-SE, równoległy do większość uskoków w podłożu podpermskim oraz do strefy tektonicznej Teisseyre'a–Tornquista (T–T).

Pionowe ruchy tektoniczne, które odżyły w mezozoiku w obrębie bloków podpermskiego podłoża pod naciskiem grubego kompleksu osadów cechsztyńsko-mezozoicznych, uaktywniły działalność halokinetyczną. Najsilniejszy etap wypiętrzeń struktur solnych w strefach naruszeń tektonicznych nastąpił w czasie ruchów laramijskich. Rozwój zjawisk halotektonicznych wzdłuż uskoków lub na ich przecięciu powodował powstawanie struktur solnych o różnych kształtach i sile wypiętrzenia. Początki tego procesu prawdopodobnie sięgają okresu po sedymentacji osadów wapienia muszlowego (trias środkowy) i trwały do młodszego mezozoiku. Pełne uaktywnienie soli cechsztyńskich nastąpiło po sedymentacji utworów retyku (trias górny), na co duży wpływ miały orogeniczne ruchy staro-kimeryjskie.

W okresie ruchów laramijskich w obszarze niecki mogileńskiej powstały dojrzałe słupy solne Damasławka (w strefie Żnina) i Mogilna (na SE od strefy Żnina) oraz niedojrzałe słupy solne (poduszki solne) i związane z nimi antykliny Janowca (na SW od strefy Żnina) i Szubina (na NE od strefy Żnina).

W obrębie północnej części garbu wielkopolskiego warunki sedymentacji były zbliżone do warunków występujących w bruździe kujawskiej w jurze środkowej (zał. 7.6.2). W jurze górnej i kredzie dolnej wzrastała subsydencja zbiornika, a od kredy górnej, w czasie ruchów tektonicznych orogenezy alpejskiej, rozpoczęły się ruchy inwersyjne, które doprowadziły do powstania w miejscu bruzdy kujawskiej wału, a w miejscu garbu wielkopolskiego niecki mogileńsko-łódzkiej.

Osady tworzące się w okresie dolnej jury powstawały w basenie o silnie zróżnicowanej głębokości dna zbiornika, gdyż rozwój struktur halokinetycznych powodował znaczne zróżnicowanie szybkości subsydencji. Odmienne pogłębianie i spłycanie dna zbiornika w jego różnych strefach wpływało na zmienną miąższość osadów i tworzenie utworów różnych facji. Sedymentacja odbywała się na przemian w środowisku lądowym i płytkomorskim. W fazach transgresywnych najczęściej osadzały się heterolity i piaskowce płytszego szelfu, a w pliensbachu lokalnie ilasto-mułowcowe utwory klastyczne głębszego szelfu. W fazach regresywnych tworzyły się utwory deltowe, fluwialne i bagienne o zróżnicowanej litologii. W profilu jury dolnej dominują zatem miąższe kompleksy zbiornikowych utworów piaskowcowych, od drobno- do gruboziarnistych (hetangu, synemuru, górnego pliensbachu i górnego toarku), oraz kompleksy nieciągłych serii osadów słabo przepuszczalnych i praktycznie nieprzepuszczalnych, wykształconych w postaci zwięzłych drobnoziarnistych piaskowców i mułowców (Górecki (red.) 1995). Przedzielają je dwa miąższe iłowcowe kompleksy izolujące. Starszy, występujący lokalnie, powstał we wczesnym pliensbachu, młodszy – zwarty kompleks szarozielonych iłowców i mułowców o stałej miąższości 70–90 m (Górecki (red.) 2006) – w toarku dolnym.

Spąg kompleksu wodonośnych utworów dolnojurajskich stanowią utwory różnych ogniw triasu, głównie bezwodne skały retyku. Według danych z dokumentacji wynikowej otworu Damasławek 22 (Zboińska 1989) są to nieprzepuszczalne, zapiaszczone iłowce o porowatości efektywnej od 2,99 do 3,99% oraz mułowce, o łącznej miąższości kilkuset metrów (powyżej 370 m).

Strop utworów dolnojurajskich tworzą bezwodne lub słabo wodonośne osady doggeru, przykryte głównie węglanowymi utworami malmu. W otworze Damasławek 22 są to mułowce zapiaszczone, a następnie mułowce i piaskowce jury środkowej, o łącznej miąższości 97,5 m przykryte kompleksem wapieni i mułowców malmu, o miąższości 885 m. Według danych z dokumentacji wynikowej otworu Damasławek 22 (Zboińska 1989) w przypadku utworów doggeru są to na ogół osady nieprzepuszczalne o porowatości efektywnej od 1,9 do (sporadycznie) 12,19%, podobnie jak utwory jury górnej, w których porowatości są jeszcze niższe (wyjątkowo do 8,19%).

Według obecnego stanu rozpoznania, najkorzystniejsze warunki zbiornikowe w omawianej strefie Żnina występują w utworach dolnej jury na SW od słupa solnego Domasławka. Równie korzystne lub nieco lepsze mogą występować w pobliżu miasta Żnin, lecz potwierdzenie tej hipotezy wymagałoby dokładniejszego rozpoznania budowy geologicznej. Według dostępnych danych, dla celów zastosowania systemu binarnego można rozważać ewentualną rekonstrukcję istniejącego otworu Damasławek 22.

Parametry hydrogeotermalne serii złożowej zestawiono na podstawie danych archiwalnych i zawartych w rozdz. 4.2.1, dokumentacji wynikowej otworu Damasławek 22 (Zboińska 1989) oraz publikowanych (m.in. Górecki (red.) 2006).

Strop utworów jury dolnej występuje w strefie Żnina od nieco poniżej –1000 do ponad –3280 m n.p.m. w SW części strefy (zał. 7.6.1). W otworze Damasławek 22 sięga do głęb. –3280 m n.p.m. (Zboińska 1989).

Miąższość utworów dolnojurajskich w obszarze perspektywicznym analizowanej strefy (SW część strefy przedstawionej na załączniku 7.6.1, gdzie temperatury stropowe przekraczają 90°C) mieści się w interwale od ponad 200 do ponad 300 m. W otworze Damasławek 22 wynosi 300 m.

Temperatury w stropie utworów dolnojurajskich w obszarze perspektywicznym analizowanej strefy mieszczą się w interwale pomiędzy ponad 90 i ponad 110°C. W otworze Damasławek 22 w trakcie wiercenia, w interwale głęb. 3364–3442 m p.p.t. notowano temp. 105°C.

Mineralizacja wód w obszarze perspektywicznym analizowanej strefy zawiera się w interwale od ponad 100 do ponad 150 g/dm^3. W otworze Damasławek 22 w trakcie wiercenia, w interwale głęb. 3364–3442 m p.p.t. odnotowano 172 g/dm^3.

Parametry zbiornikowe piaskowców dolonojurajskich zestawiono poniżej na podstawie danych ujętych w rozdz. 5.4 i rozdz. 4.2.1, oraz informacji archiwalnych (Zboińska 1989) i publikowanych (Górecki (red.) 2006).

Porowatość efektywna (regionalna) wodonośnych utworów dolnojurajskich niecki mogileńsko-łódzkiej wynosi od 7,95 do 25,35% (średnio 18,3%). W otworze Damasławek 22 (Zboińska 1989), wzdłuż profilu notowano następujące wartości porowatości efektywnej w utworach jury dolnej:

- toark grn. (3370–3385 m p.p.t.) – od 0,8 do 13,5% (śr. 8%),
- toark dln. (3305–3400 m p.p.t. – główny śródpoziom izolujący) – śr. 2%,
- pleinsbach (3550 m p.p.t.) – śr. 8%,
- synemur (3630–3640 m p.p.t.) – śr. 8%,
- hetang (3667–3670 m p.p.t.) – śr. 5,5%.

Natomiast badania rdzeni wiertniczych z tego otworu (por. rozdz. 5.4) wskazywały następujące wartości porowatości efektywnej:

- toark dln. (3391,3 m p.p.t.) – 11,3%,
- pleinsbach (3584,3 m p.p.t.) – 11,15%,
- synemur (3633,5 m p.p.t.) – 6,75%.

Współczynnik przepuszczalności (regionalny) dla niecki mogileńsko-łódzkiej wynosi od kilkudziesięciu mD do 1627,2 mD (średnio 285,35 mD). W otworze Damasławek 22 (Zboińska 1989) notowano następujące wartości przepuszczalności w utworach jury dolnej, kolejno wzdłuż profilu:

- toark grn. (3370–3385 m p.p.t.) – śr. przepuszczalność międzyziarnowa 7 mD (maks. 32 mD), a śr. przepuszczalność szczelinowa 59 mD,
- domer (3550 m p.p.t.) – śr. przepuszczalność międzyziarnowa 15 mD,
- synemur (3630–3640 m p.p.t.) – śr. przepuszczalność międzyziarnowa 15 mD, a śr. przepuszczalność szczelinowa 8 mD,
- hetang (3667–3670 m p.p.t.) – śr. przepuszczalność międzyziarnowa 2 mD.

Z kolei badania rdzeni wiertniczych z tego otworu (por. rozdz. 5.4) wskazały na następujące wartości przepuszczalności:

- toark dln. (3391,3 m p.p.t.) – 20,748 mD w kier. X i 95,580 mD w kier. Z,
- synemur (3633,5 m p.p.t.) – 0,151 mD w kier. X i 1,268 mD w kier. Z.

Współczynnik filtracji (regionalny) dla niecki mogileńsko-łódzkiej wynosi od $9{,}48 \cdot 10^{-8}$ do $1{,}2 \cdot 10^{-5}$ m/s (średnio $2{,}11 \cdot 10^{-6}$ m/s). Potencjalna wydajność otworów wiertniczych w ob-

szarze perspektywicznym dla strefy Żnina szacowana jest od około 50 do ponad 150 m^3/h w Damasławku.

Przedstawiony koncepcyjny model geologiczny strefy Żnina, obejmujący mapę ukształtowania stropu zbiornika jurajskiego, przekroje geologiczne z oszacowanymi miąższościami utworów, parametrów hydrogeotermalnych oraz danymi litostratygraficznymi – stanowił podstawę dla opracowania numerycznego modelu przestrzennego rozkładu temperatur i ciśnień w analizowanej strefie.

7.6.3. Model numeryczny termiki górotworu

Model numeryczny strefy Żnina zajmuje obszar o powierzchni 16,36 × 14,88 km (zał. 7.6.3 – rys. 1), obejmując miasto Żnin. Strop modelu, o rzędnej –2000 m n.p.m., budują słabo sfałdowane osady deponowane od triasu po kredę dolną (zał. 7.6.3 – rys. 1). Formację perspektywiczną dla pozyskiwania energii geotermalnej do celów wytwarzania prądu w systemach binarnych stanowią utwory jury dolnej. Ich strop zawiera się w przedziale głębokości od poniżej około –1000 m n.p.m. do około –3280 m n.p.m. Spąg modelu, wyznaczony przez rzędną –4000 m n.p.m., znajduje się w nieprzepuszczalnych utworach triasu dolnego. Przez utwory mezozoiku w modelowanym rejonie przebija się cechsztyński słup solny Damasławka (zał. 7.6.2). W rzucie poziomym ma on kształt zbliżony do elipsy o powierzchni około 16,5 km^2 z dłuższą osią – 5,5 km i krótszą około 3,5 km (Czapowski 2013).

Model numeryczny został podzielony na 25 równoległych poziomych warstw, w tym 15 o miąższości około 100 m i 10 o zmniejszonej miąższości 50 m w najbardziej perspektywicznej, spągowej części utworów jury dolnej (zał. 7.6.3 – rys. 1). Elementy obliczeniowe, o kształcie nieregularnym, skoncentrowano w sąsiedztwie założonej lokalizacji otworów produkcyjnego oraz chłonnego.

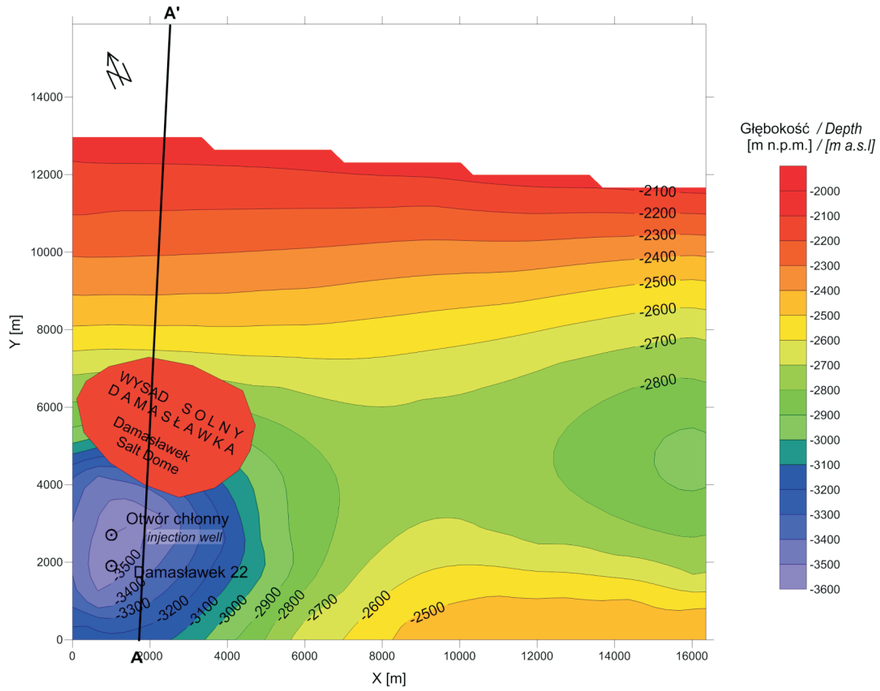
W modelowanym rejonie znajduje się otwór Damasławek 22 o głębokości 4050 m, wykonany w 1987 roku (Zboińska 1989). W omawianym rejonie utwory jury dolnej przewiercono wyłącznie wymienionym otworem.

W modelu wykorzystano warunek brzegowy I rodzaju ($T(t)$, $p(t)$ = const. – warunek Dirichleta) oraz warunek brzegowy II rodzaju (gęstość strumienia ciepła q = const. – warunek Neumanna). W części stropowej modelu założono stałe w czasie wartości ciśnienia złożowego oraz temperatury, natomiast w najniższej warstwie modelu, na głębokości –4000 m n.p.m., założono stały dopływ ciepła o gęstości strumienia równej 80 mW/m^2 (Szewczyk, Gientka 2009) (zał. 7.6.3 – rys. 1). Przyjęto, że wpływ eksploatacji złoża, tj. zmiana temperatury oraz ciśnienia złożowego w warstwach wodonośnych, nie będzie zaznaczał się w warstwach granicznych modelu. Założenie to jest wynikiem uwzględnienia relatywnie dużej miąższości oraz niskiej lub bardzo niskiej przepuszczalności warstw, które oddzielają złożowe warstwy wodonośne od warstw granicznych modelu numerycznego.

W modelu przyjęto początkowy rozkład temperatury oraz ciśnienia jako liniową aproksymację punktowej informacji z otworu Damasławek 22.

Dla potrzeb modelowania utwory jury dolnej podzielono na dwie części ze względu na zróżnicowane właściwości hydrauliczne. W spągowej części dominują przepuszczalne utwory hetangu, synemuru i pliensbachu górnego. Natomiast górną część utworów jury dolnej stanowią w przeważającej części utwory nieprzepuszczalne o miąższości 123,5 m. Udział tych wydzieleń w modelowanej przestrzeni został ekstrapolowany metodą krigingu, proporcjonalnie do ich miąższości w otworze Damasławek 22. W efekcie modelowany rejon obejmuje osiem podstawowych wydzieleń litostratygraficznych przedstawionych w tabeli 7.6.3.1.

Strukturom geologicznym, oprócz przepuszczalności przypisano także gęstość właściwą szkieletu skalnego, porowatość, współczynnik przewodzenia ciepła oraz ciepło właściwe skał. Parametry te zestawiono w tabeli 7.6.3.1.



Rys. 7.6.3.1. Szkic strukturalny spągu utworów jury dolnej w modelowanej strefie Żnina wraz z zakładaną lokalizacją otworów eksploatacyjnego oraz chłonnego

Fig. 7.6.3.1. Structural diagram of thebottom of the lower Jurassic structures in the modelled Żnin region, including the assumed production and injection well locations

Kalibracja modelu polegała na wykonaniu szeregu symulacji, mających na celu odtworzenie warunków termicznych w rejonie Żnina w stanie naturalnym. Informacje porównawcze stanowił zestaw dostępnych map termicznych (Górecki (red.) 2006) oraz dane dotyczące pomiarów temperatury w wybranych interwałach otworu Damasławek 22 (Zboińska 1989).

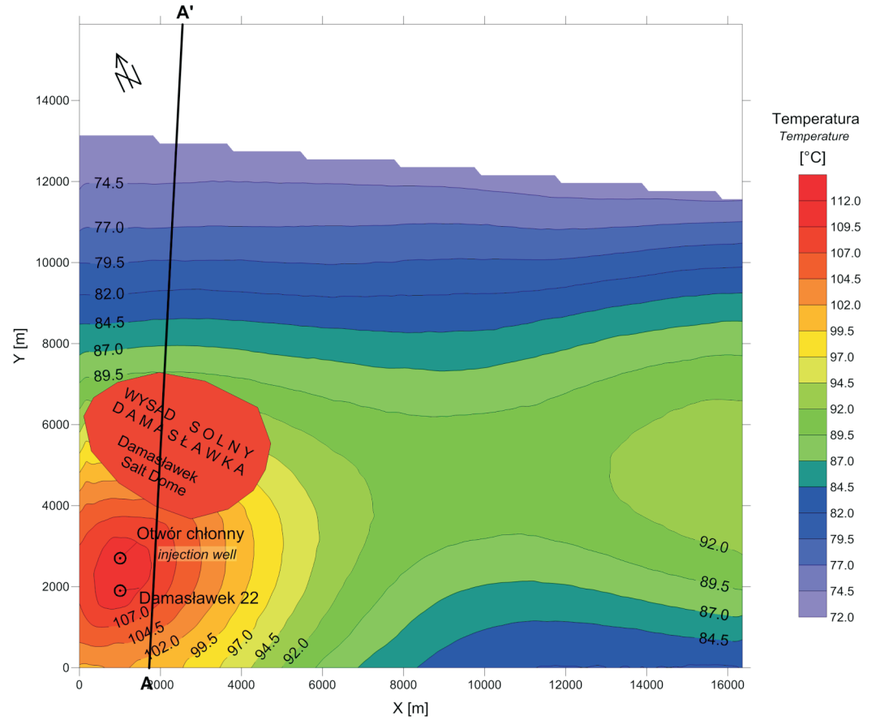
Dla założonej gęstości powierzchniowego strumienia ciepła oraz prognozowanej wartości gradientu geotermicznego w poszczególnych jednostkach stratygraficznych (kompleksach) objętych modelowaniem oraz korzystając z prawa Fouriera, wyznaczono wartości przewodności cieplnej kompleksów. Parametry te poddano pewnym korektom w celu dopasowania rozkładu temperatury w modelowanej przestrzeni do informacji z pomiarów w otworze oraz dostępnych map termicznych.

Występowanie w rejonie Żnina wysadu solnego o miąższości kilku kilometrów, prowadzi do określonych skutków termicznych. Odmienny rozkład temperatur występuje w samym wysadzie oraz w jego otoczeniu aniżeli na obszarze niezaburzonym wpływem jego obecności. Ze względu na wysoki współczynnik przewodzenia ciepła wysad solny charakteryzuje się mniejszym gradientem

Tabela 7.6.3.1. Struktury geologiczne tworzące model i ich parametry geologiczne

Table 7.6.3.1. Geological structures constituting the model and their geological parameters

Nr	Formacja/ Struktura	Opis	Oznaczenie w modelu	Porowatość efektywna [%]	Gęstość [kg/m^3]	Przepuszczalność [mD]		Ciepło właściwe [J/(kg·K)]	Współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m·K)]
						XY	Z		
1	P3	sole cechsztynu		0,1	2 160	$1\cdot10^{-6}$	$1\cdot10^{-6}$	800	5,5
2	T	iłowce, mułowce oraz wapienie triasu		5,6	2 600	0,25	0,25	900	3,1
3	T3 (retyk)	iłowce i mułowce triasu górnego		6,8	2 600	0,15	1,3	900	3,1
4	J1 (pliensbach + synemur + hetang)	kompleksy piaskowców warstw radowskich i mechowskich jury dolnej		10,5	2 640	20,5	10	900	3,8
5	J1 (toark)	iłowce z przekładkami piaskowców warstw gryfickich jury dolnej		5	2 600	0,1	0,1		3,1
6	J2	mułowce i piaskowce jury środkowej		6,6	2 600	1,3	1,3	900	3,0
7	J3	wapienie i mułowce jury górnej		1,3	2 600	2	0,1	900	3,2
8	K1	kompleksy piaskowców z wkładkami iłowców kredy dolnej		15,3	2 600	250	250	900	3,2



Rys. 7.6.3.2. Temperatura prognozowana w spągu utworów jury dolnej w strefie Żnina, według modelu stanu stacjonarnego

Fig. 7.6.3.2. Forecasted temperature in the bottom of the lower Jurassic structures in the Żnin region, according to the steady state model

termicznym (przy założeniu stałej gęstości strumienia ciepła dla modelowanego rejonu) niż w innych strukturach występujących w obrębie przestrzeni modelowanej. W konsekwencji, w otoczeniu wysadu, na dużych głębokościach następuje obniżenie temperatury względem struktur oddalonych, natomiast lokalne podwyższenie temperatury w otoczeniu wysadu na płytszych głębokościach (zał. 7.6.3 – rys. 2). W modelu przyjęto, że w stropowej warstwie o rzędnej –2000 m n.p.m. temperatura wysadu wynosi 78°C i jest o 5°C wyższa od temperatury na tej samej głębokości na brzegach modelu.

Na załączniku 7.6.3 – rys. 2 przedstawiono rozkład temperatury według modelu stanu naturalnego wzdłuż przekroju A'A (rys. 7.6.3.1). Temperatury prognozowane w strefie perspektywicznej, tj. w części spągowej utworów jury dolnej dla całej modelowanej strefy przedstawiono na rysunku 7.6.3.2. Maksymalna prognozowana temperatura na głęb. około –3550 m n.p.m. (ok. 3650 m p.p.t.) powinna wyniesić około 111°C.

7.6.4. Program technologiczny zastosowania systemu binarnego

Zgodnie z informacją zawartą w rozdziale 7.6.2, w granicach analizowanej strefy wykonane zostały w przeszłości następujące otwory wiertnicze: Damasławek 22 i Niestronno-1. Analizując lokalizację wymienionych głębokich wierceń oraz po dokładnym przestudiowaniu dokumentacji wynikowych, szczegółową analizą w zakresie oceny możliwości rekonstrukcji starych odwiertów objęto otwór Damasławek 22.

7.6.4.1. Analiza możliwości rekonstrukcji starych otworów wiertniczych

Otwór Damasławek 22

Otwór dowiercony został do głębokości 4050 m p.p.t. Dokumentacja wynikowa otworu poszukiwawczego Damasławek 22 opracowana została w 1989 r. przez Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo Zakład Poszukiwań Nafty i Gazu – Piła. Otwór Damasławek 22 zlokalizowany jest w miejscowości Zużoły (gmina Janowiec Wielkopolski). Współrzędne geograficzne otworu wynoszą (wg dokumentacji):

- długość: 17°30'38",
- szerokość: 52°48'26",
- wysokość nad poziom morza: 110 m.

Wiercenie rozpoczęto w dniu 20.09.1986 r. a zakończono 28.08.1987 r. Otwór został zlikwidowany w dniu 01.10.1987 r.

Otwór poszukiwawczy Damasławek 22 wykonano w celu określenia ropo-gazonośności osadów mezozoiku ze szczególnym uwzględnieniem utworów triasu górnego w NW części synklinorium mogileńskiego. Zadaniem geologicznym otworu Damasławek 22 było:

- określenie właściwości zbiornikowych skał mezozoicznych oraz stopnia ich nasycenia,
- określenie potencjalnych możliwości nagromadzenia się węglowodorów.

Uproszczony profil litostratygraficzny (m p.p.t.):

0–166 m – czwartorzęd, trzeciorzęd – gliny, piaski, iły, żwiry,
166–2066 m – kreda górna – wapienie, margle, mułowce,
2066–2397,5 m – kreda dolna – piaskowce, iłowce,
2397,5–3282,5 m – jura górna – wapienie, mułowce,
3282,5–3380 m – jura środkowa – mułowce, piaskowce,
3380–3680 m – jura dolna – piaskowce, iłowce,
3680–4050 m – trias górny – iłowce, mułowce.

Zarurowanie otworu (m p.p.t.):

0–56 m – rury 13 3/8" cementowane do wierzchu,
0–1311 m – rury 9 5/8" cementowane (strop cementu na głębokości 778 m),
0–2855 m – rury 6 5/8" cementowane (strop cementu na głębokości 1380 m).

Przy likwidacji otworu wydobyto rury 6 5/8" z interwału 0 – 955 m (rys. 7.6.4.1).

Badania wykonane w otworze

W trakcie wiercenia wykonano trzy próby złożowe:

- 1311–1329 m p.p.t. – kreda górna, wapienie, margle, mułowce. Opróbowanie przeprowadzono w dwóch cyklach–czas oczekiwania na przypływ: I cykl – 5 min., II cykl – 15 min. Czas oczekiwania na wzrost ciśnienia: I cykl – 30 min., II cykl – 30 min. Uzyskano przypływ 8,0 m^3/25 min. solanki o mineralizacji 46,7 g/dm^3. Badany poziom ma wysoką przepuszczalność, prak- tycznie nie zmienioną w strefie przyotworowej.

  Parametry złożowe:
  - ciśnienie hydrostatyczne płuczki na poziom 14,29 MPa (145,8 atm),
  - początkowa depresja faktyczna opróbowania 1,04 MPa (10,6 atm),
  - temperatura w obrębie opróbowanego interwału ~40°C,
  - natężenie przypływu Q = 27,8 m^3/h,
  - początkowe ciśnienie złożowe w głębokości 1311 m – P_z = 12,75 MPa (130 atm),
  - gradient ciśnienia złożowego 0,973 · 10^{-2} MPa/m,
  - współczynnik przepuszczalności 1799,7 mD,
  - wskaźnik uszkodzenia strefy przyotworowej WU = 1,14.
- 2060–2073 m p.p.t. – kreda górna + kreda dolna, piaskowce, wapienie. Opróbowanie przeprowadzono w dwóch cyklach – czas oczekiwania na przypływ: I cykl – 5 min., II cykl – 30 min. Czas oczekiwania na wzrost ciśnienia: I cykl – 30 min., II cykl – 30 min. Uzyskano przypływ 13,3 m^3/36 min solanki o mineralizacji 100,8 g/dm^3. Badany poziom ma bardzo dobrą przepuszczalność. Możliwe uszkodzenie strefy trzyotworowej, ale najprawdopodobniej wielkość wskaźnika (3,94) odzwierciedla zjawiska dynamiczne w fazie przepływu.

  Parametry złożowe:
  - ciśnienie hydrostatyczne płuczki na poziom 24,19 MPa (246,6 atm),
  - początkowa depresja faktyczna opróbowania 2,74 MPa (27,9 atm),
  - temperatura w obrębie opróbowanego interwału 70°C,
  - natężenie przypływu Q = 21,1 m^3/h,
  - początkowe ciśnienie złożowe w głębokości 2065,5 m – P_z = 20,39 MPa (207,4 atm),
  - gradient ciśnienia złożowego 0,99 · 10^{-2} MPa/m,
  - współczynnik przepuszczalności 2672,0 mD,
  - wskaźnik uszkodzenia strefy przyotworowej WU = 3,94.
- 3364–3442 m p.p.t. – jura środkowa + dolna, piaskowce. Opróbowanie przeprowadzono w dwóch cyklach – czas oczekiwania na przypływ: I cykl – 5 min., II cykl – 225 min. czas oczekiwania na wzrost ciśnienia: I cykl – 90 min., II cykl – 150 min. Uzyskano przypływ 7,79 m^3/230,5 min solanki o mineralizacji 172 g/dm^3. Badany poziom ma średnią przepuszczalność, nie obniżoną w strefie przyotworowej.

  Parametry złożowe:
  - ciśnienie hydrostatyczne płuczki na poziom 37,30 MPa (380,3 atm),
  - maksymalna depresja faktyczna opróbowania 16,26 MPa (165,8 atm),
  - temperatura w obrębie opróbowanego interwału 105°C,
  - natężenie przypływu Q = 2,03 m^3/h,
  - początkowe ciśnienie złożowe w głębokości 3364 m – P_z = 34,72 MPa (354,0 atm),
  - gradient ciśnienia złożowego 1,032 · 10^{-2} MPa/m,
  - współczynnik przepuszczalności 4,26 mD,
  - wskaźnik uszkodzenia strefy przyotworowej WU = 0,70.

Po zakończeniu wiercenia przeprowadzono dwie próby złożowe:

- 2855–3375 m p.p.t. – jura środkowa + górna, wapienie, piaskowce. Opróbowanie przeprowadzono w jednym cyklu – czas oczekiwania na przypływ: 720 min. Czas oczekiwania na wzrost ciśnienia: 60 min. Uzyskano przypływ 9,7 m^3/720 min solanki o mineralizacji 189,3 g/dm^3. Warunki badania pozwalają na określenie przybliżonych parametrów złożowych.

  Parametry złożowe:
  - ciśnienie hydrostatyczne płuczki na poziom 33,78 MPa (344,5 atm),
  - początkowa depresja faktyczna opróbowania około 25,4 MPa (259 atm),
  - natężenie przypływu Q = 0,81 m^3/h.
- 2330–2350 m p.p.t. – kreda dolna, piaskowce. Opróbowanie przeprowadzono w dwóch cyklach – czas oczekiwania na przypływ: I cykl – 10 min., II cykl – 80 min. Czas oczekiwania na wzrost ciśnienia: I cykl – 180 min., II cykl – 670 min. Uzyskano przypływ 8,28 m^3/75 min solanki o mineralizacji 88,6 g/dm^3. Intensywny przypływ i pełna stabilizacja krzywych wzrostu ciśnienia nie pozwala określić wszystkich parametrów złożowych. Poziom ma bardzo dobrą przepuszczalność – ewentualne jej ograniczenie w strefie przyotworowej wynika ze sposobu otwarcia.

  Parametry złożowe:
  - ciśnienie hydrostatyczne płuczki na poziom 27,23 MPa (277 atm),
  - początkowa depresja faktyczna opróbowania 5,00 MPa (51 atm),
  - temperatura w obrębie opróbowanego interwału 52°C,
  - natężenie przypływu Q = 6,6 m^3/h,
  - początkowe ciśnienie złożowe w głębokości 2330 m P_z = 22,92 MPa (233,7 atm),
  - gradient ciśnienia złożowego 0,984 · 10^{-2} MPa/m.

Likwidacja otworu

W dniu 01.10.1987 przeprowadzono likwidację otworu. W ramach tych prac wykonano korki likwidacyjne w głębokości 3500–3350 m p.p.t., 3375–3425 m p.p.t., 2800–2870 m p.p.t., 2300––2380 m p.p.t., 900–970 m p.p.t. oraz 0–30 m p.p.t.. Przestrzeń pomiędzy korkami została wypełniona płuczką bentonitową o ciężarze gęstościowym 1,23 g/cm^3. Przed likwidacją z otworu usunięto rury okładzinowe 6 5/8" w interwale 0–955 m.

Wstępne wskazanie zakresu prac rekonstrukcyjnych otworu Damasławek 22

Aktualna konstrukcja otworu Damasławek 22 uniemożliwia udostępnienie złoża występującego w jurze dolnej. Możliwe jest udostępnienie złoża występującego w utworach kredy dolnej i górnej.

Biorąc powyższe pod uwagę, dla strefy Żnina przewidziano konieczność wykonania co najmniej dwóch otworów geotermalnych, w tym jednego produkcyjnego – o głębokości 3660 m p.p.t. i jednego chłonnego, o głębokości 3660 m p.p.t. (do synemuru).

7.6.4.2. Modelowanie wpływu zmian parametrów eksploatacyjnych na uzyskiwane efekty pracy binarnej elektrociepłowni geotermalnej

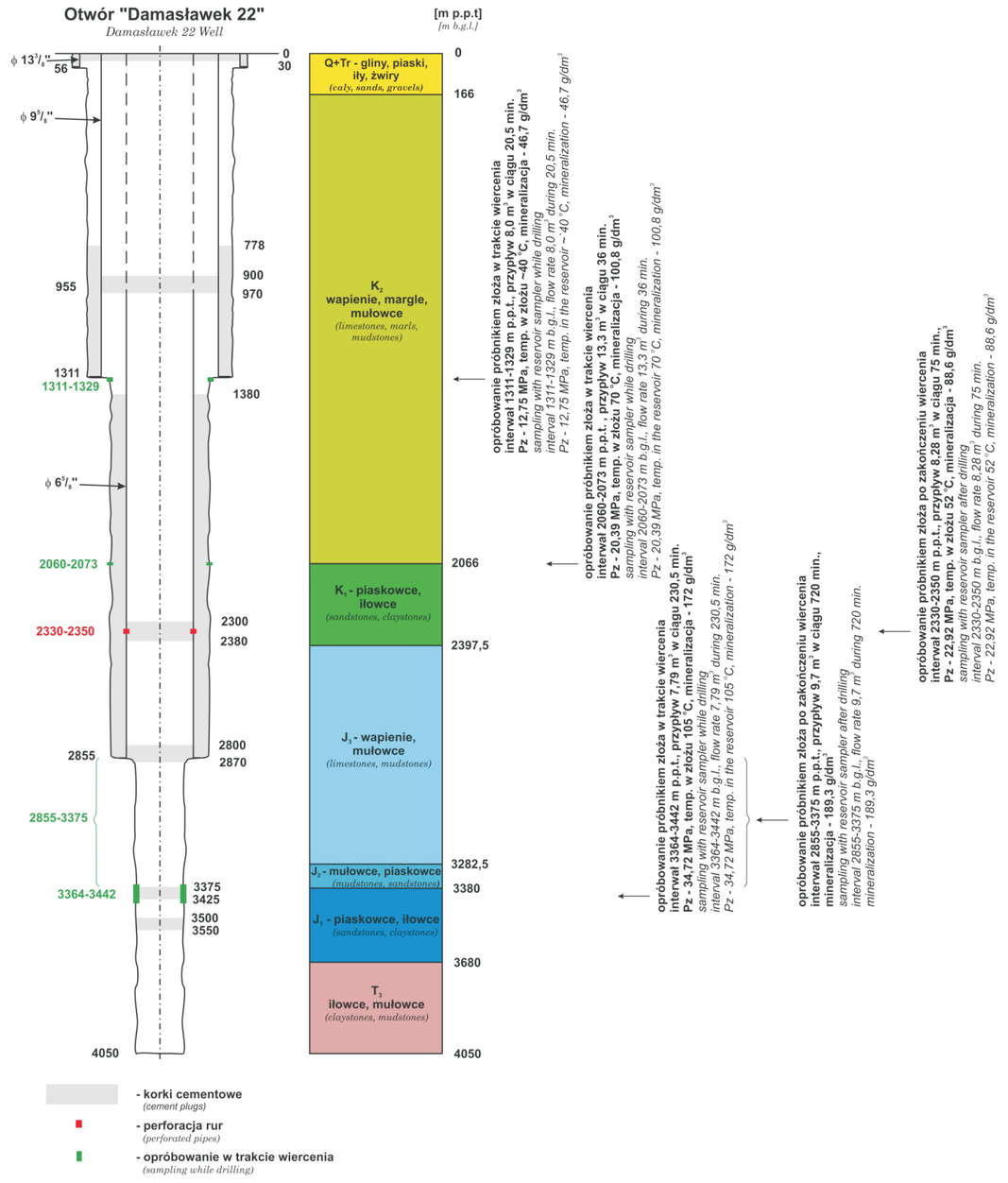
Wyniki przeprowadzonej analizy doboru parametrów pracy systemu ORC dla strefy Żnina zaprezentowano w tabelach 7.6.4.1–7.6.4.3. Obliczenia wykonano dla trzech oczekiwanych temperatur końcowych wody termalnej (woda schłodzona w systemie energetycznym) T_{g2} :

- **wariant A** – woda termalna zasila tylko elektrownię geotermalną (po zasileniu elektrowni będzie kierowana do odwiertu chłonnego) – wybrano te parametry pracy elektrowni, przy których moc elektrowni jest najwyższa;
- **wariant B** – woda termalna będzie wykorzystywana również na potrzeby ciepłownicze lub do innych procesów technologicznych – do obliczeń przyjęto T_{g2}^{B} = 60°C;
- **wariant C** – woda termalna będzie wykorzystywana na potrzeby technologii basenowej i/lub cele balneologiczne – do obliczeń przyjęto T_{g2}^{C} = 47°C.

Oznaczenia prezentowane w tabelach są zgodne z opisem przedstawionym w rozdziale 6.2. oraz ze schematem zaprezentowanym na rysunku 6.2.5.1.

Na podstawie analizy przedstawionej w tabeli 7.6.4.1, dla wody termalnej o temperaturze około 105°C, przy wydajności ujęcia na poziomie 100 m^3/h, maksymalną moc elektrowni (370,2 kW) uzyskuje się przy zastosowaniu czynnika R227ea i temperaturze jego odparowania 68°C. Woda termalna schładzana jest w takim przypadku do temperatury 54,8°C. Przy założeniu, że woda termalna po zasileniu elektrowni zostanie schłodzona do temperatury 60°C (wariant B, tab. 7.6.4.2), najwyższą moc (365,4 kW) osiągnie się również przy zastosowaniu czynnika R227ea w temperaturze odparowania 74°C. Dla wariantu C (tab. 7.6.4.3) moc maksymalna elektrowni wyniesie 322,9 kW, przy zastosowaniu tego samego czynnika roboczego, i jego odparowaniu w temperaturze 56°C.

Rodzaj zastosowanego czynnika roboczego znacząco wpływa na wielkość mocy elektrowni, przy czym należy rozpatrywać zespół cech i właściwości czynnika roboczego zarówno termodynamicznych jak i eksploatacyjnych. Trudno jest określić w jakim stopniu rodzaj czynnika pod kątem jego kształtu krzywych nasycenia (suchy, mokry) wpływa na efektywność pracy siłowni, gdyż tylko jeden z rozpatrywanych czynników zalicza się do grupy mokrych (metanol), natomiast zauważalny jest wpływ temperatury krytycznej czynnika. Dla czynników o niższych wartościach temperatury krytycznej zazwyczaj osiągano lepszą efektywność pracy elektrowni geotermalnej.



Rys. 7.6.4.1. Schemat konstrukcji otworu Damasławek 22 po zakończeniu wiercenia

Fig. 7.6.4.1. Diagram of the Damasławek 22 borehole design following the drilling

Tabela 7.6.4.1. Parametry termiczne i kaloryczne czynników roboczych oraz wyniki obliczeń dla wariantu A – maksymalizacja mocy elektrowni geotermalnej dla strefy ŻNIN

Table 7.6.4.1. Thermal and calorific parameters of the operating media, as well as calculation results for the option A – maximization of the geothermal plant power for the ŻNIN location

Lokalizacje ŻNIN: T_{g1} = 105°C, $\dot{V}_g$ = 100 m^3/h, ΔT_1 = 5K ΔT_S = 3K, wariant A																				
Woda termalna					Parametry charakterystyczne czynnika											Układ ORC				
czynnik roboczy	T_{g2}	T_{g3}	T_{g4}	ΔT_2	T_{n1}	h_{n1}	T_{n2s}	h_{n2s}	T_{n3}	h_{n3}	T_{n4s}	h_{n4s}	$T_{n5} = T_{n6}$	h_{n5}	h_{n6}	m_n	N_t	N_p	N_{ORC}	Q_d	η_{ORC}
	°C	°C	°C	°C	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	kJ/kg	kg/s	kW	kW	kW	kW	%
R227ea	54,8	73,0	103,6	35,6	71,0	367,5	42,5	354,8	30,0	234,6	30,5	235,3	68,0	283,2	363,9	39,7	404,1	33,9	370,2	5 249,3	7,1
R1234ze	59,3	73,0	104,0	36,0	71,0	251,7	35,2	233,0	30,0	64,9	30,5	65,7	68,0	121,5	247,8	25,7	383,9	28,7	355,2	4 782,7	7,4
R236fa	57,6	71,0	104,1	38,1	69,0	406,3	41,4	390,5	30,0	237,3	30,3	237,7	66,0	285,3	403,1	29,4	371,0	16,5	354,5	4 954,7	7,2
Izobutan	59,8	71,0	104,2	38,2	69,0	647,5	39,1	611,4	30,0	271,2	30,3	272,3	66,0	365,1	640,9	12,6	363,6	18,5	345,1	4 723,0	7,3
MM	59,9	71,0	104,2	38,2	69,0	145,1	51,6	119,4	30,0	–141,1	30,0	–141,0	66,0	–70,4	140,3	16,5	339,6	0,9	338,7	4 720,8	7,2
Metanol	60,6	63,2	102,2	43,9	95,0	1 176,8	30,0	1 068,4	30,0	–92,8	30,0	–92,7	58,2	–17,6	1 095,4	3,7	317,3	0,4	316,9	4 644,8	6,8

Tabela 7.6.4.2. Parametry termiczne i kaloryczne czynników roboczych oraz wyniki obliczeń dla wariantu B dla strefy ŻNIN.

Table 7.6.4.2. Thermal and calorific parameters of the operating media, as well as calculation results for the option B for the ŻNIN location.

Lokalizacje ŻNIN: T_{g1} = 105°C, T_{g2} = 60°C, $\dot{V}_g$ = 100 m^3/h, ΔT_{ppl} = 5K, ΔT_S = 3K, wariant B																				
Woda termalna					Parametry charakterystyczne czynnika											Układ ORC				
czynnik roboczy	T_{g4}	ΔT_2	T_{g3}	ΔT_1	T_{n1}	h_{n1}	T_{n2s}	h_{n2s}	T_{n3}	h_{n3}	T_{n4s}	h_{n4s}	$T_{n5} = T_{n6}$	h_{n5}	h_{n6}	m_n	N_t	N_p	N_{ORC}	Q_d	η_{ORC}
	°C	°C	°C	°C	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	kJ/kg	kg/s	kW	kW	kW	kW	%
R227ea	103,7	29,7	78,8	4,8	77,0	370,2	43,6	355,8	30,0	234,6	30,7	235,4	74,0	291,6	366,3	34,9	402,2	36,8	365,4	4 706,4	7,8
R1234ze	104,1	36,1	73,5	5,5	71,0	251,7	35,2	233,0	30,0	64,9	30,5	65,7	68,0	121,5	247,8	25,3	377,8	28,3	349,5	4 706,4	7,4
R236fa	104,1	36,1	73,4	5,4	71,0	407,5	41,9	390,9	30,0	237,3	30,3	237,7	68,0	288,1	404,3	27,7	367,3	17,0	350,3	4 706,4	7,4
Iizobutan	104,2	38,2	71,1	5,1	69,0	647,5	39,1	611,4	30,0	271,2	30,3	272,3	66,0	365,1	640,9	12,5	362,3	18,4	343,9	4 706,4	7,3
MM	104,2	38,2	71,1	5,1	69,0	145,1	51,6	119,4	30,0	–141,1	30,0	–141,0	66,0	–70,4	140,3	16,4	338,6	0,9	337,7	4 706,4	7,2
Metanol	102,2	44,8	62,6	5,2	93,0	1 173,8	30,0	1 068,4	30,0	–92,8	30,0	–92,7	57,4	–19,7	1 094,7	3,7	313,3	0,3	313,0	4 706,4	6,7

Tabela 7.6.4.3. Parametry termiczne i kaloryczne czynników roboczych oraz wyniki obliczeń dla wariantu C dla strefy ŻNIN

Table 7.6.4.3. Thermal and calorific parameters of the operating media, as well as calculation results for the option C for the ŻNIN location

Lokalizacje ŻNIN: T_{g1} = 105°C, T_{g2} = 47°C, $\dot{V}_g$ = 100 m^3/h, ΔT_{ppl} = 5K, ΔT_S = 3K, wariant C																				
Woda termalna					Parametry charakterystyczne czynnika											Układ ORC				
czynnik roboczy	T_{g4}	ΔT_2	T_{g3}	ΔT_1	T_{n1}	h_{n1}	T_{n2s}	h_{n2s}	T_{n3}	h_{n3}	T_{n4s}	h_{n4s}	$T_{n5} = T_{n6}$	h_{n5}	h_{n6}	m_n	N_t	N_p	N_{ORC}	Q_d	η_{ORC}
	°C	°C	°C	°C	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg	kJ/kg	kg/s	kW	kW	kW	kW	%
R227ea	103,5	47,5	61,7	5,7	59,0	361,4	39,8	352,3	30,0	234,6	30,3	235,0	56,0	267,1	358,2	48,0	347,2	24,3	322,9	6 066,0	5,3
R1234ze	103,9	51,9	57,2	5,2	55,0	243,8	34,5	232,3	30,0	64,9	30,3	65,3	52,0	96,7	240,3	34,0	311,6	18,6	293,0	6 066,0	4,8
R236fa	103,9	51,9	57,4	5,4	55,0	397,6	38,1	387,6	30,0	237,3	30,1	237,5	52,0	266,1	394,7	37,9	304,3	11,1	293,2	6 066,0	4,8
Izobutan	104,0	54,0	55,2	5,2	53,0	626,9	36,2	606,0	30,0	271,2	30,2	271,8	50,0	322,1	620,8	17,1	285,9	11,8	274,0	6 066,0	4,5
MM	104,0	54,0	55,6	5,6	53,0	120,8	43,0	106,1	30,0	–141,1	30,0	–141,0	50,0	–102,2	116,1	23,2	271,7	0,6	271,1	6 066,0	4,5
Metanol	103,2	59,8	48,7	5,3	58,0	1 119,8	30,0	1 068,4	30,0	–92,8	30,0	–92,8	43,4	–57,8	1 081,5	5,0	205,7	0,2	205,5	6 066,0	3,4

7.6.5. Model numeryczny pracy dubletu geotermalnego

W rejonie Żnina poziom perspektywiczny dla eksploatacji energii geotermalnej stanowią horyzonty wodonośne spągowej części utworów jury dolnej, w których prognozowana temperatura złożowa może dochodzić do 111°C (rejon otworu Damasławek 22; Zboińska, 1989). W strefie perspektywicznej miąższość osadów jury dolnej wynosi około 115 m. Charakteryzuje je niewysoka przepuszczalność rzędu 20 mD, sporadycznie osiągająca wartość do 100 mD (wg pomiarów laboratoryjnych), oraz mineralizacja wód zbiornikowych wynosząca około 180 g/dm^3. Z tych względów w modelowaniu wykorzystano dodatkowo moduł TOUGH2-EWASG, uwzględniający wpływ zasolenia wód.

Przyjęto, że temperatura zatłaczanej solanki będzie wynosić 30°C, co pozwoliłoby na wykorzystanie ciepła wód geotermalnych zarówno do wytwarzania energii elektrycznej w układach binarnych jak i na zagospodarowanie pozostałej ilości ciepła na cele grzewcze, rekreacyjne, balneologiczne i inne.

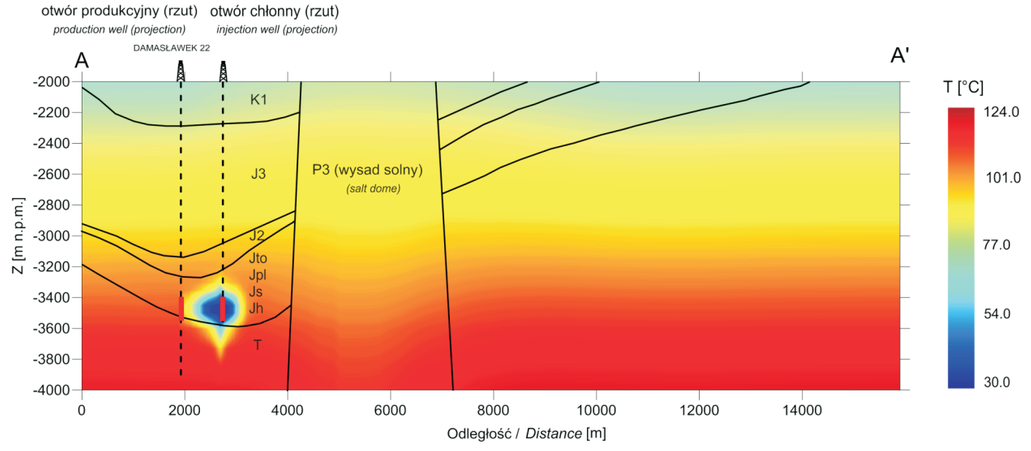
Dla przyjętego interwału czasu prowadzenia analiz modelowych przyjęto stałą wydajność dubletu równą 100 m^3/h. W modelu przyjęto także, że odległość pomiędzy otworem produkcyjnym i chłonnym będzie wynosić około 800 m. Wobec przyjętej wartości przepuszczalności oraz spodziewanej miąższości utworów wodonośnych jury dolnej dystans ten powinien być wystarczający dla uzyskiwania stabilnej temperatury na wypływie przez założony 50-letni okres eksploatacji, podczas której spadek temperatury złożowej w otworze produkcyjnym nie powinien przekroczyć 5°C.

Z przeprowadzonych symulacji wynika, że po 50 latach prognozowany spadek ciśnienia złożowego w strefie otworu produkcyjnego wyniesie około 4,05 MPa (ok. 374 m słupa solanki) (zał. 7.6.3 – rys. 3a i 4). Natomiast represja ciśnienia w otworze chłonnym, wywoływana zatłaczaniem schłodzonej solanki, wyniesie według obliczeń symulacyjnych około 8,63 MPa (zał. 7.6.3 – rys. 3b i 4). Przeszło dwukrotnie wyższe ciśnienie niezbędne do powrotnego wtłoczenia wody do złoża w stosunku do ciśnienia eksploatacji po 50 latach (zał. 7.6.3 – rys. 4) jest efektem wzrostu wartości lepkości dynamicznej solanki z około $4{,}2 \cdot 10^{-4}$ Pa·s do $11{,}9 \cdot 10^{-4}$ Pa·s, głównie wskutek spadku temperatury. Wyznaczone wartości zmian ciśnienia (4,05 MPa oraz 8,63 MPa) uwzględniają wyłącznie warunki przepływu przez warstwę złożową. Nie uwzględniają natomiast oporów przepływu w odwiertach, które mogą być istotne przy założonej wydajności rzędu 100 m^3/h. Korzystnym efektem eksploatacyjnym będzie natomiast wygrzewanie się otworu eksploatacyjnego, co wskutek wzrostu objętości wody powinno przyczynić się do znacznego podniesienia zwierciadła wody.

Wyniki symulacji analizowanego wariantu eksploatacji wskazują, że wychłodzenie wód złożowych w strefie przyfiltrowej otworu produkcyjnego wyniesie niespełna 4°C po okresie 50 lat (zał. 7.6.3 – rys. 3a). Na załączniku 7.6.3 – rys. 4 oraz rysunku 7.6.5.1 przedstawiono charakter wychłodzenia strefy dubletu otworów wzdłuż przekroju przechodzącego przez otwory. Symulacja wskazuje, że wychłodzenie złoża nastąpi głównie w rejonie otworu chłonnego – z malejącą intensywnością w kierunku otworu produkcyjnego. Pierwsze objawy niewielkiego spadku temperatury są prognozowane po okresie około 20 lat.

7.6.6. Prognoza efektów finansowych, energetycznych, ekologicznych i społecznych

Głównym źródłem energii dla miejscowości Żnin jest kotłownia o mocy 23,2 MW, a długość sieci ciepłowniczej wynosi 23,5 km (por. rozdział 7.6.1). Założono, że sieć ciepłownicza zaprojektowana



Rys. 7.6.5.1. Temperatura prognozowana w strefie Żnina (przekrój AA') po 50 latach eksploatacji instalacji binarnej

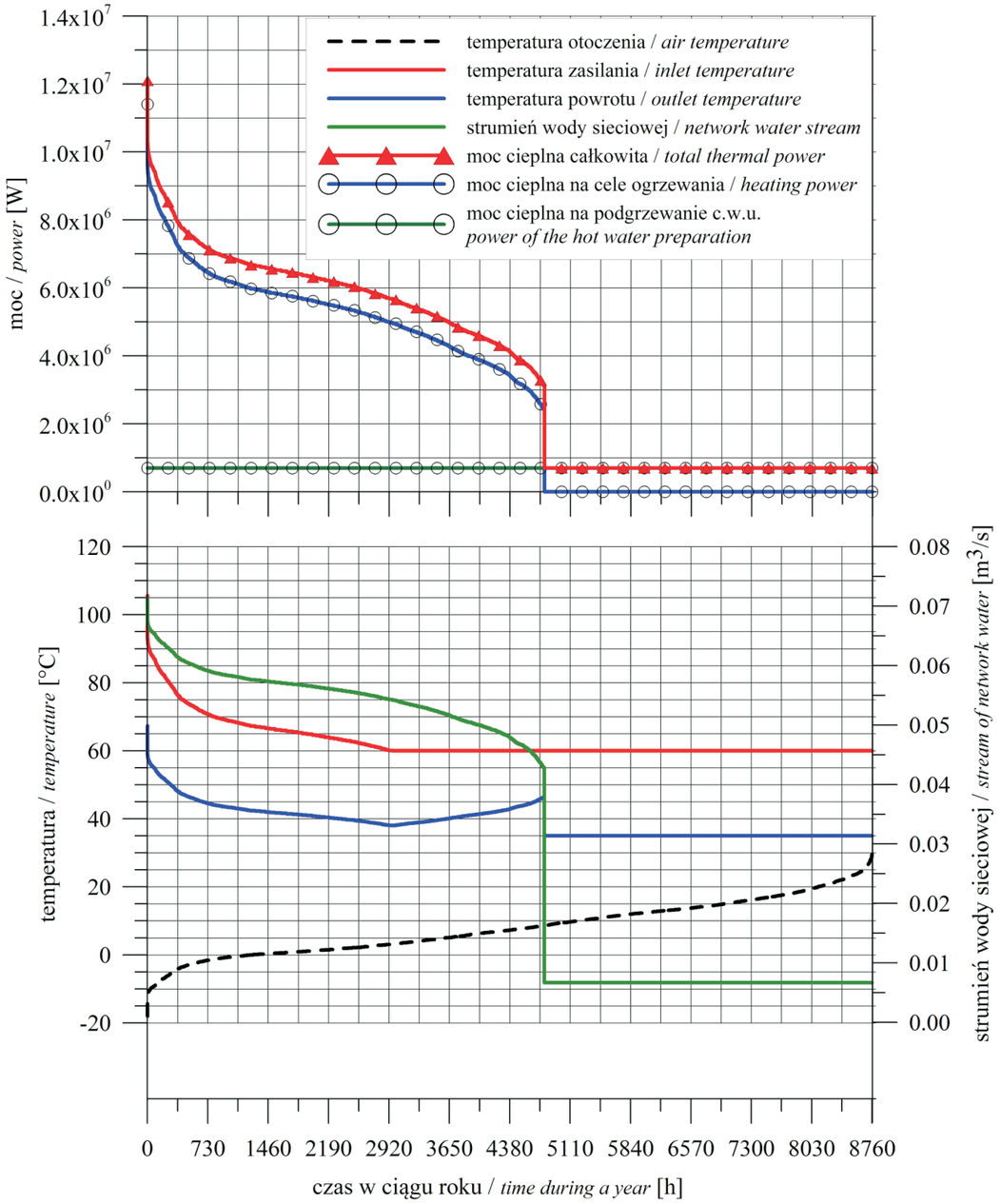
Fig. 7.6.5.1. Forecasted temperature in the Żnin region (AA' cross-section) after 50 years of binary installation operation

jest na parametry nominalne 110/70°C. Całkowita moc cieplna maksymalna związana z geotermią, a możliwa do pozyskania w omawianym wariancie, wynosi około 10 MW. Z obliczeń wynika, że instalacja geotermalna może rocznie wytwarzać około 140 TJ/rok energii cieplnej (tab. 7.6.6.1). Harmonogram pracy źródeł energii w czasie przedstawia rysunek 7.6.6.2. Moc elektryczna maksymalna wytwarzana w binarnej siłowni geotermalnej wynosi około 797 kW (tab. 7.6.6.1). Siłownia geotermalna będzie pracować na potrzeby instalacji geotermalnej, pomniejszając ilość energii elektrycznej napędzającej pompy (obiegowe i geotermalne) pobieranej z sieci. Niestety, ze względu na wysokie przewidywane ciśnienie depresji (4,05 MPa) i represji (8,63 MPa) zapotrzebowanie na elektryczną moc napędową pomp obiegu geotermalnego będzie na tyle duże, że nie osiągnie się mocy elektrycznej netto większej od 0 W. Eksploatacja wody termalnej będzie wymagała stałej konsumpcji energii elektrycznej pochodzącej z sieci elektroenergetycznej. Wytwarzana moc elektryczna obiegu binarnego może jedynie to zapotrzebowanie pomniejszać – co przedstawiono na rysunku 7.6.6.2.

Prognozowane nakłady inwestycyjne związane z wdrożeniem proponowanego rozwiązania oszacowano na około 88 mln zł (tab. 7.6.6.2). Cenę sprzedaży energii cieplnej odbiorcy finalnemu oszacowano na 75,6 zł/GJ netto (tab. 7.6.6.2). Stanowi to wartość typową dla energii cieplnej pochodzącej z sieciowego gazu ziemnego (Pająk, Bujakowski 2013a).

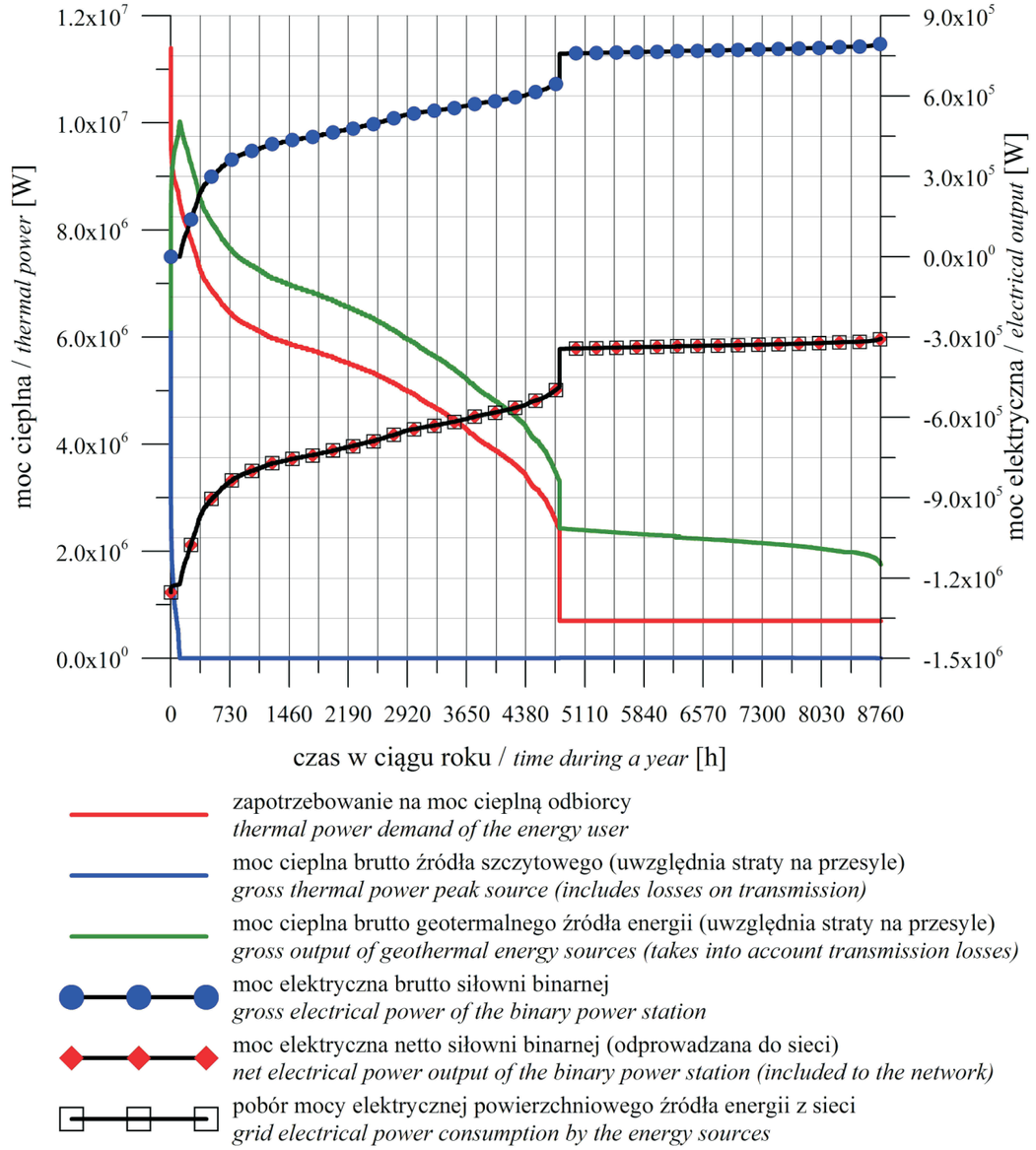
Efekty ekologiczne w postaci redukcji emisji zanieczyszczeń związanej z pracą rozważanej instalacji geotermalnej przedstawiono w tabeli 7.6.6.3.

Efekty społeczne wykorzystania wód termalnych w rejonie Żnina wiązać się będą z powstaniem nowych miejsc pracy, w liczbie około 13, w rejonie uruchomienia inwestycji. Biorąc pod uwagę możliwość budowy na bazie analizowanych wód również obiektów balneo-rekreacyjnych, liczba miejsc pracy wzrosłaby znacząco. Miejsca, w których uruchomiono dotychczas instalacje geotermalne wykorzystujące te wody w celach balneo-rekreacyjnych, świadczą o dużym zainteresowaniu



Rys. 7.6.6.1. Definicja odbiorcy energii dla lokalizacji Żnin

Fig. 7.6.6.1. Energy end-user characteristic for Żnin location



Rys. 7.6.6.2. Moc cieplna i elektryczna wytwarzana przez źródło energii dla lokalizacji Żnin

Fig. 7.2.6.2. Heat and electric power generated by the energy source in Żnin location

klientów tego typu usługami. Takie przedsięwzięcia stymulują lokalny rynek usług i znacząco wpływają na wzrost atrakcyjności turystycznej. Zyskuje na tym branża gastronomiczna, hotelarska, rozwija się rynek różnorodnych usług.

Tabela 7.6.6.1. Parametry techniczne dla instalacji źródła energii dla lokalizacji Żnin

Table 7.6.6.1. Technical parameters for the heat source installation in Żnin location

Parametr	Wartość
Lokalizacja	Żnin
Głębokość otworu produkcyjnego [m]:	3660
Średnica otworu produkcyjnego [m]:	0,244475
Stan otworu produkcyjnego:	nowy
Strumień nominalny (maksymalny) wody termalnej [m^3/h]:	250
Temperatura wody w warstwie wodonośnej [°C]:	100
Poziom zwierciadła statycznego w otworze produkcyjnym [m p.p.t.]:	100
Ciśnienie depresji [MPa]:	4,05
Głębokość otworu chłonnego [m]:	3660
Stan otworu chłonnego:	nowy
Poziom zwierciadła statycznego w otworze chłonnym[m p.p.t.]:	100
Ciśnienie represji [MPa]:	8,63
Projektowana temperatura schłodzenia wody termalnej w siłowni binarnej [°C]:	54,8
Projektowana temperatura wody termalnej na głowicy otworu produkcyjnego [°C]:	98,53
Temperatura minimalna (projektowa) powietrza zewnętrznego [°C]:	-18
Temperatura projektowa zasilania instalacji odbiorcy [°C]:	105,67
Temperatura projektowa powrotu z instalacji odbiorcy [°C]:	67,33
Nominalny (maksymalny) strumień czynnika dla instalacji odbiorcy [m^3/h]:	256,8
Moc cieplna całkowita odbiorcy [kW]:	12098,3
Moc cieplna centralnego ogrzewania dla odbiorcy [kW]:	11400
Moc cieplna przygotowania ciepłej wody użytkowej dla odbiorcy [kW]:	698,3
Całkowite zapotrzebowanie na energię cieplną odbiorcy [GJ/rok]:	101449,1
Całkowita moc cieplna zainstalowana w źródle energii (uwzględnia straty mocy na przesyle) [kW]:	17257,3
Całkowita ilość energii cieplnej wytworzonej przez źródło energii (uwzględnia straty na przesyle) [GJ/rok]:	141274,1
Całkowita moc cieplna zainstalowana w części geotermalnej [kW]:	10025,8
Całkowita ilość energii cieplnej wytworzonej z geotermii (uwzględnia straty na przesyle) [GJ/rok]:	140739,7
Całkowita moc cieplna zainstalowana w ciepłowni szczytowej [kW]:	7231,5
Całkowita ilość energii cieplnej wytworzonej przez kotłownię szczytową (uwzględnia straty na przesyle) [GJ/rok]:	534,4
Całkowita moc elektryczna zainstalowana w geotermalnej siłowni binarnej [kW]:	796,8
Całkowita ilość energii elektrycznej wytworzonej przez siłownię binarną brutto (uwzględnia potrzeby całej własne instalacji) [MWh/rok]:	5279,4
Ilość energii elektrycznej wytworzonej przez siłownię binarną netto (po odjęciu potrzeb własnych instalacji = energia sprzedana) [MWh/rok]:	0
Długość całkowita rurociągu z wodą termalną (od głowic otworów do ciepłowni) [m]:	200
Średnica nominalna rury przewodowej dla rurociągu z wodą termalną (od głowic otworów do ciepłowni) [m]:	0,27145
Stan rurociągu z wodą termalną:	nowy
Długość całkowita rurociągu od ciepłowni geotermalnej do ciepłowni szczytowej [m]:	500
Średnica nominalna rury przewodowej dla rurociągu od ciepłowni geotermalnej do ciepłowni szczytowej [m]:	0,27511
Stan rurociągu od ciepłowni geotermalnej do ciepłowni szczytowej:	nowy
Długość całkowita rurociągu od ciepłowni szczytowej do odbiorcy energii cieplnej [m]:	23500
Średnica nominalna rury przewodowej dla rurociągu od ciepłowni szczytowej do odbiorcy energii [m]:	0,27511
Stan rurociągu od ciepłowni szczytowej do odbiorcy:	istnieje
Maksymalne opory przepływu na rurociągach ciepłowniczych przesyłowych (z wyłączeniem rurociągu z wodą termalną) [MPa]:	1,702
Maksymalne opory przepływu na rurociągu z wodą termalną [MPa]:	0,0152
Maksymalne ciśnienie do pokonania przez pompy geotermalne (ciśnienie represji minus ciśnienie depresji) [MPa]:	12,68
Średnie roczne straty energii cieplnej na przesyle [ułamek energii cieplnejwytworzonej w źródle energii]:	0,28

Tabela 7.6.6.2. Zestawienie parametrów ekonomicznych dla instalacji powierzchniowego źródła energii dla lokalizacji Żnin

Table 7.6.6.2. List of the economic parameters for the surface energy source installation in Żnin location

Parametr	Wartość
Cena netto zakupu energii elektrycznej [zł/kWh]:	0,488
Cena netto sprzedaży energii elektrycznej [zł/kWh]:	0,24
Cena netto zakupu gazu ziemnego wysokometanowego [zł/m^3]:	1,626
Cena netto sprzedaży energii cieplnej gwarantująca finansową rentowność inwestycji [zł/GJ]:	75,6
Całkowite prognozowane nakłady inwestycyjne (główne komponenty zestawiono poniżej) [tys zł]:	87763
Nakłady inwestycyjne na otwór produkcyjny [tys zł]:	31084
Nakłady inwestycyjne na otwór chłonny [tys zł]:	31084
Nakłady inwestycyjne na siłownię binarną [tys zł]:	7247
Nakłady inwestycyjne na szczytowe kotły gazowe [tys. zł]:	2531
Nakłady inwestycyjne na pompy geotermalne (głębinowa i stacja pomp zatłaczania) [tys. zł]:	6290
Nakłady inwestycyjne na pompy obiegowe [tys zł]:	306
Nakłady inwestycyjne na wymienniki ciepła [tys zł]:	1623
Nakłady inwestycyjne na rurociągi połączeniowe [tys zł]:	1603
Nakłady inwestycyjne na budynek ciepłownigeotermalnej i szczytowej [tys. zł]:	2706
Całkowite koszty obsługi instalacji (główne składniki kosztów zestawiono poniżej) [tys zł/rok]:	7670
Amortyzacja środków trwałych [tys. zł/rok]:	4441
Koszty obsługi, remontów, konserwacji [tys. zł/rok]:	878
Koszty zakupu nośników energii [tys. zł/rok]:	2351
Przychody z tytułu sprzedaży energii (szczegółowo zestawiono poniżej) [tys zł/rok]:	7670
Przychody z tytułu sprzedaży energii cieplnej [tys zł/rok]:	7670
Przychody z tytułu sprzedaży energii elektrycznej [tys. zł/rok]:	0

Tabela 7.6.6.3. Zestawienie parametrów ekologicznych dla instalacji powierzchniowego źródła energii dla lokalizacji Żnin

Table 7.6.6.3. List of the ecological parameters for the surface energy source installation in Żnin location

Parametr	Wartość
Roczna emisja B(a)P dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0,001
Roczna emisja sadzy dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0,086
Roczna emisja pyłu dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	1,817
Roczna emisja CO_2 dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	13528,917
Roczna emisja CO dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	12,884
Roczna emisja NO_x w przeliczeniu na NO_2 dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	14,577
Roczna emisja SO_2 dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	30,819
Roczna emisja węglowodorów alifatycznych dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	6,08
Roczna emisja w. węglowodorów aromatycznych dla wariantu z wykorzystaniem geotermii [Mg/rok]:	0,707
Roczne ograniczenie emisji B(a)P [Mg/rok]:	0,14
Roczne ograniczenie emisji sadzy [Mg/rok]:	72,529
Roczne ograniczenie emisji pyłu [Mg/rok]:	288,784
Roczne ograniczenie emisji CO_2 [Mg/rok]:	1405,736
Roczne ograniczenie emisji CO [Mg/rok]:	794,356
Roczne ograniczenie emisji NO_x w przeliczeniu na NO_2 [Mg/rok]:	-6,524
Roczne ograniczenie emisja SO_2 [Mg/rok]:	72,453
Roczne ograniczenie emisji węglowodorów alifatycznych [Mg/rok]:	34,324
Roczne ograniczenie emisji wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych [Mg/rok]:	39,697

Zał. 7.6.1

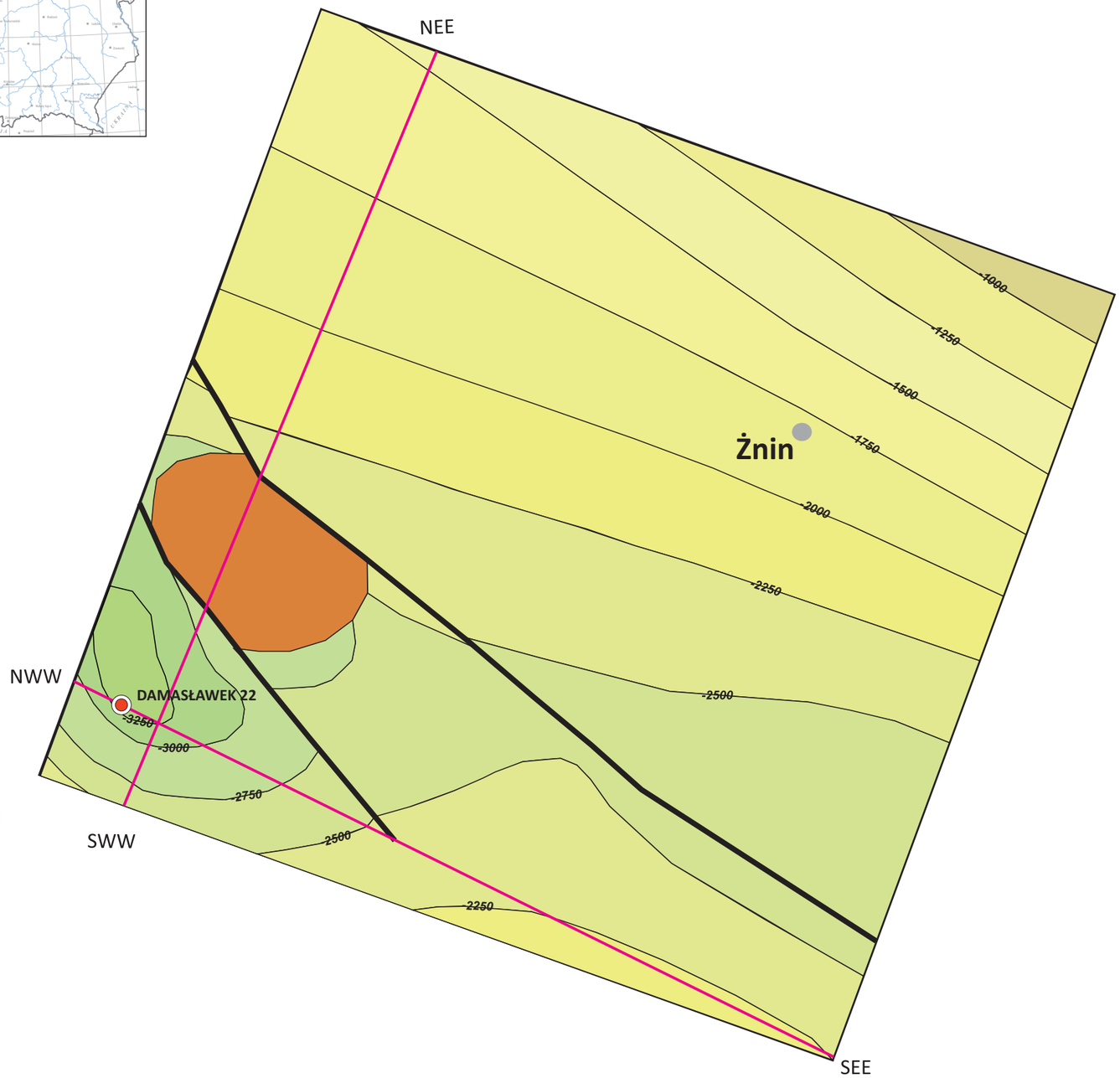
MAPA STROPU UTWORÓW DOLNEJ JURY W STREFIE ŻNINA*

Encl. 7.6.1

MAP OF THE TOP OF LOWER JURASSIC IN THE ŻNIN AREA

*na podstawie: Górecki (red.), 2006
(based on: Górecki (ed.), 2006)





Głębokość [m n.p.m.]
Depth [m a.s.l.]

- -1000
- -1250
- -1500
- -1750
- -2000
- -2250
- -2500
- -2750
- -3000
- -3250

LEGENDA:
LEGEND:

- Uskoki — *Faults*
- Struktury sole — *Salt structures*
- Otwory — *Boreholes*
- Główne miasto — *Main city*
- Linie przekrojów geologicznych (Zał. 7.6.2) — *Cross-section lines (Encl. 7.6.2)*
- -3300 — Izohipsy stropu utworów jury dolnej [m n.p.m.] — *Isohypses of the top of Lower Jurassic formation [m a.s.l.]*

0 2 4 km

WYKONANO NA ZAMÓWIENIE MINISTRA ŚRODOWISKA ZA ŚRODKI FINANSOWE WYPŁACONE PRZEZ NARODOWY FUNDUSZ OCHRONY ŚRODOWISKA I GOSPODARKI WODNEJ

PRZEKROJE GEOLOGICZNE PRZEZ STREFĘ ŻNINA (przebieg na zał. 7.6.1)*

GEOLOGICAL CROSS-SECTIONS THROUGH THE ŻNIN AREA (line at encl. 7.6.1)



NIECKA MOGILEŃSKO-ŁÓDZKA

Przekrój NWW-SEE
Cross section NWW-SEE

SWW [m n.p.m.] *[m a.s.l.]* — **NEE** [m n.p.m.] *[m a.s.l.]*

Damasławek 22
(rzut - 800 m z NW; *projected 800 m from NW*)

Słup solny Damasławka

0, -1000, -2000, -3000, -4000, -5000, -6000, -7000

Kz, K_1+K_2, J_3, J_2, J_1, T_3, T_2, T_1, P_3

Przekrój SWW-NEE
Cross section SWW-NEE

NIECKA MOGILEŃSKO-ŁÓDZKA

NWW [m n.p.m.] *[m a.s.l.]* — **SEE** [m n.p.m.] *[m a.s.l.]*

Damasławek 22

Strefa słupa solnego Damasławka (Damasławek salt dome zone)

0, -1000, -2000, -3000, -4000, -5000

Kz, K_2, K_1, J_3, J_2, J_1, T_3

Kz	Kenozoik *Cenozoic*	K_2	Kreda górna *Upper Cretaceous*	J_3	Jura górna *Upper Jurassic*	T_3	Trias górny *Upper Triassic*
K_1	Kreda dolna *Lower Cretaceous*	J_2	Jura środkowa *Middle Jurassic*	T_2	Trias środkowy *Middle Triassic*		
K_1+K_2	Kreda dolna i górna *Lower & Upper Cretaceous*	J_1	Jura dolna *Lower Jurassic*	T_1	Trias dolny *Lower Triassic*		

P_3	Perm górny *Upper Permian*	otwory	*boreholes*
		otwory rzutowane	*projected boreholes*
		uskoki	*faults*

0 — 1 — 2 km

*na podstawie: Olczak, 1965; Zboińska, 1987; Górecki (red.), 2006; Czapowski, 2013
(based on: Olczak, 1965; Zboińska, 1987; Górecki (ed.), 2006; Czapowski, 2013)

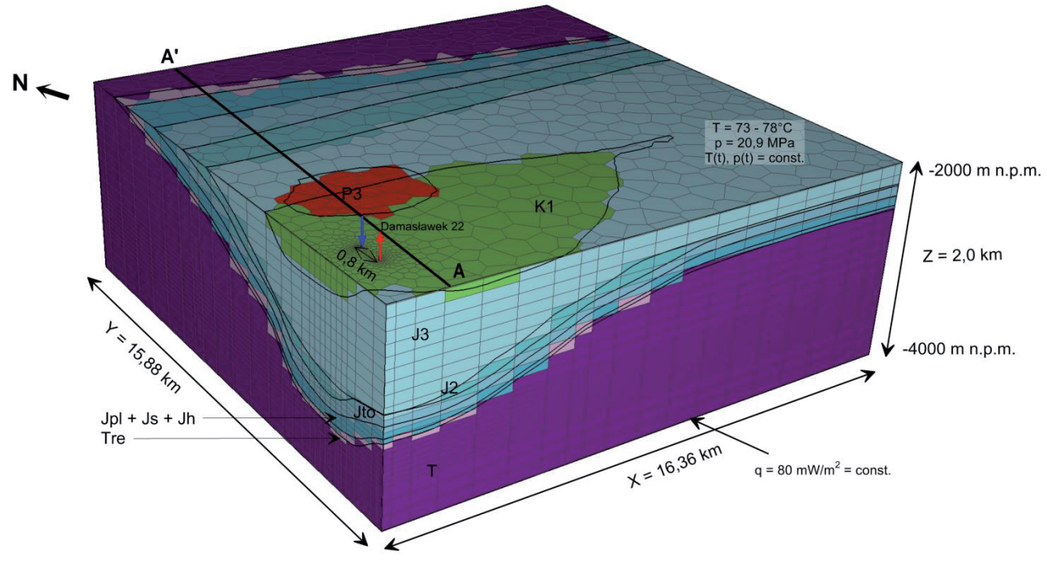
WYKONANO NA ZAMÓWIENIE MINISTRA ŚRODOWISKA ZA ŚRODKI FINANSOWE WYPŁACONE PRZEZ NARODOWY FUNDUSZ OCHRONY ŚRODOWISKA I GOSPODARKI WODNEJ

WYNIKI MODELOWANIA NUMERYCZNEGO W STREFIE ŻNINA

NUMERICAL MODELING RESULTS IN THE ŻNIN AREA

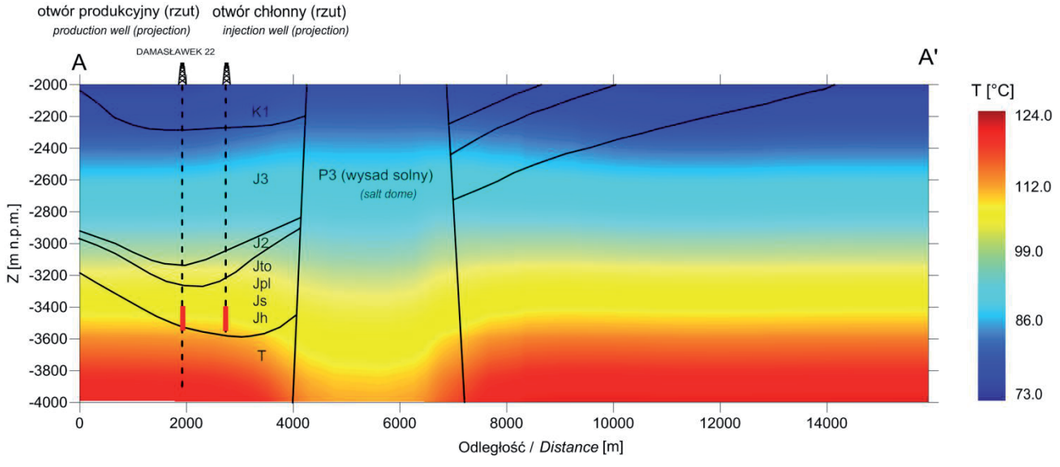
Zał. 7.6.3

Encl. 7.6.3



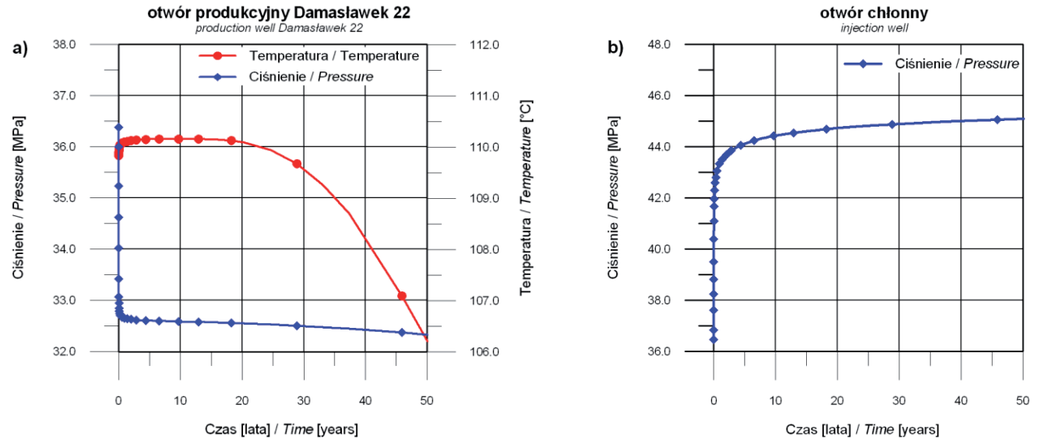
Rys. 1. Model numeryczny strefy Żnina

Fig. 1. Numerical model of the Żnin area



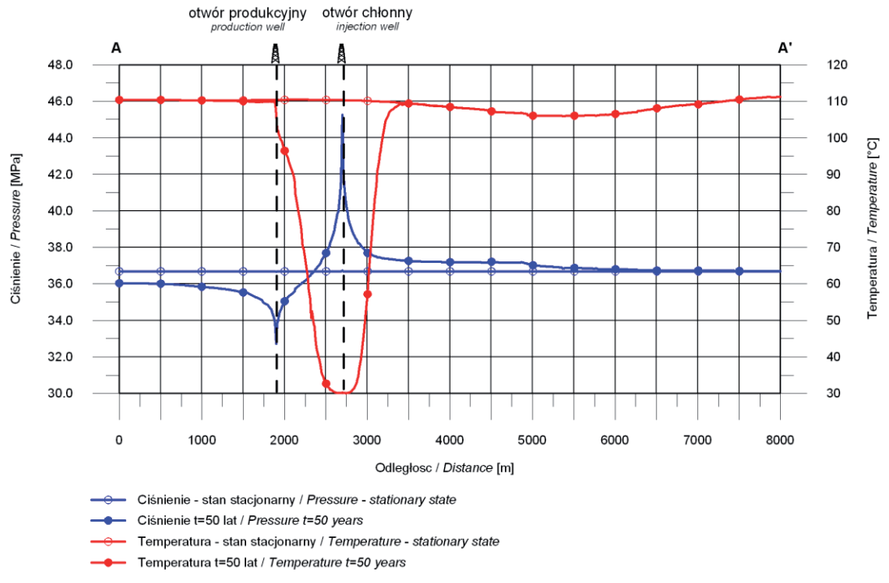
Rys. 2. Prognozowany rozkład temperatury w modelu stanu przedeksploatacyjnego wzdłuż przekroju AA'

Fig. 2. Forecasted temperature distribution prior to exploitation along the AA' cross section



Rys. 3. a) Zmiana temperatury i ciśnienia złożowego w funkcji czasu w otworze produkcyjnym Damasławek 22, b) zmiana ciśnienia złożowego w otworze chłonnym na głębokości z = -3475 m n.p.m. dla wydajności dubletu Q = 100 m^3/h

Fig. 3. a) Change of the reservoir temperature and pressure versus time in the production well Damasławek 22, b) change of the reservoir pressure in the injection well at the depth z = -3475 m a.s.l. for the doublet flow rate Q = 100 m^3/h



Rys. 4. Zmiana temperatury złożowej oraz ciśnienia złożowego wzdłuż fragmentu przekroju AA' na głębokości z = -3475 m n.p.m. dla wydajności dubletu Q = 100 m^3/h

Fig. 4. Cross-sectional change of the reservoir temperature and pressure along part of the AA' cross section at the depth z = -3475 m a.s.l. for the doublet flow rate Q = 100 m^3