

*Tomasz Strzelecki**, *Michał Strzelecki***

MODEL NUMERYCZNY ODWODNIENIA ZŁOŻA WĘGLA BRUNATNEGO ZŁOCZEW

1. Wprowadzenie

W pracy oparto się na wynikach opracowanej koncepcji zagospodarowania złoża [2] dla potrzeb „Studium wykonalności zagospodarowania złoża węgla brunatnego Złoczew”. Na podstawie powyższego opracowania można stwierdzić, że złożo węgla brunatnego „Złoczew” zalega w północno-wschodniej części monokliny przedsudeckiej w obrębie tektonicznej strefy zapadliskowej, zwanej rowem Złoczewa. Jest to struktura kulisowa walnej strefy dyslokacyjnej Poznań–Kalisz–Radomsko [1]. Walne uskoki ramowe rowu Złoczewa o orientacji WNW–ESE poprzysuwane są licznymi subprostopadłymi uskokami o kierunku SW–NE, wzdłuż których nastąpił zrzut utworów podłoża mezozoicznego i po części osadów kenozoicznych wypełniających zapadlisko. Bloki zawarte między uskokami cechują się różnym stopniem pionowego przemieszczenia względem utworów występujących w ich osłonie. Ruchy tektoniczne, które doprowadziły do wypiętrzenia terenu oraz powstania uskoków miały miejsce na przełomie kredy i trzeciorzędu. Na początku sedimentacji miocenińskiej w wyniku działania tensji horyzontalnej nastąpiło odnowienie sieci uskoków, które utworzyły zarysy rowu Złoczewa. Ostateczne ukształtowanie zapadliska nastąpiło w górnym plejstocenie. Głębokość rowu Złoczewa osiąga średnio 150–250 m, a maksymalnie przekracza 340 m.

2. Warunki hydrogeologiczne

Obszar złoża Złoczew należy do lewobrzeżnej części zlewni rzeki Warty. Odwodnienie powierzchniowe obszaru zlewni następuje poprzez sieć rowów melioracyjnych i liczne mniejsze ciekę do rzeki Warty przepływającej po wschodniej stronie złoża w odległości około 3 km,

* Instytut Geotechniki i Hydrotechniki, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska, Wrocław

** KGHM CUPRUM sp. z o.o., Centrum Badawczo-Rozwojowe, Wrocław

rzeki Pysznej (dopływu Oleśnicy) na południu, rzeki Oleśnicy na południowy zachód i rzeki Berdynówki (dopływu Oleśnicy) na północny zachód. Rzeka Oleśnica wpada do Warty w odległości około 4 km od złoża i ma charakter drenujący. W zachodniej części obszaru złożowego (dolinie rzeki Oleśnicy) występuje obszar podmokłości oraz zespół niewielkich jezior. Według podziału regionalnego słodkich wód podziemnych [3] obszar złożowy węgla brunatnego „Złoczew” leży w regionie Warty, subregion Warty nizinny. Natomiast w podziale na jednostki hydrogeologiczne jest to region wielkopolski, podregion kaliski i rejon Złoczewa–Osjakowa [4]. Występują tutaj trzy piętra wodonośne: czwartorzędowe i trzeciorzędowe z wodami porowymi oraz jurajskie z wodami szczelinowymi i szczelinowo–krasowymi. W dokumentacji geologicznej z 1979 r. [6] przyjmuje się, że wszystkie jednostki stratygraficzne stwierdzone na tym terenie łączą się ze sobą hydraulicznie i stanowią jeden poziom wodonośny. Jednakże poszczególne piętra wodonośne różnią się składem litologicznym, procentowym udziałem warstw przepuszczalnych, uziarnieniem oraz wielkością współczynnika filtracji. Czwartorzędowe piętro wodonośne charakteryzuje się bardzo zmiennymi miąższościami i wykształceniem litologicznym, zarówno w profilu pionowym jak i poziomym. Wydziela się tutaj dwa poziomy wodonośne: w utworach piaszczystych o zwierciadle swobodnym i w utworach piaszczysto–żwirowych o zwierciadle naporowym. Pierwszy poziom, występujący na glinach zwałowych, mułkach i piaskach zastoiskowych, zalega lokalnie i bardzo płytko. Drugi poziom znajduje się w piaszczysto–żwirowych utworach wodnolodowcowych oraz rzecznych osadach plejstocenijskich i holocenijskich. Trzeciorzędowe piętro wodonośne jest nieciągłe, stąd ma niewielkie i bardzo lokalne znaczenie gospodarcze. Grunty sypkie, czyli piaski i podrzędnie żwiry stanowią około 70% wszystkich osadów trzeciorzędowych, a 50% w obrębie całego nadkładu węgla brunatnego. Miąższość utworów piaszczystych w granicach złoża wynosi średnio od 96,5 m do 100 m. Poza złożem sumaryczna grubość osadów piaszczystych wynosi średnio około 50 m. Jurajskie piętro wodonośne występuje na całym obszarze złożowym w silnie spękanych i szczelinowatych wapieniach oksfordu i kimerydu. Większość istniejących form krasowych to pory o wielkości do dwóch milimetrów, wapienie takie określa się jako porowate.

Występujący wśród wapieni rumosz, żwir, ilowce lub okruchy węgla brunatnego stanowią wypełnienie szczelin krasowych lub kawern. Warunki hydrogeologiczne są zmienne w zależności od zalegania serii węglanowej, wykształcenia nadkładu i rodzaju struktur tektonicznych. Dotychczasowy stan rozpoznania złoża węgla brunatnego „Złoczew” można określić jako wstępny.

3 Założenia wstępne i dane wejściowe do obliczeń

Problem stworzenia modelu numerycznego przepływu filtracyjnego w rozważanym obszarze warstw przepuszczalnych w bezpośrednim sąsiedztwie rzeki Warta wymagał zebrania szczegółowych danych geometrycznych, danych geologicznych i hydrogeologicznych oraz danych projektu robót górniczych.

W celu wykonania obliczeń numerycznych symulacji zwierciadła wód podziemnych konieczne było stworzenie modelu geometrycznego badanego obszaru polegającego na:

transformacji rastrów map topograficznych i tematycznych obszaru, wykonaniu wektorowej mapy zasadniczej, utworzeniu numerycznego modelu terenu, utworzeniu numerycznego modelu hydrogeologicznego w systemie PDE FLEX 6 w oparciu o model matematyczny Boussinesq, przeniesienie danych geometrycznych z numerycznej mapy zasadniczej do hydrogeologicznego modelu obliczeniowego oraz wykonanie skryptów w systemie PDE FLEX zawierających warunki graniczne w przypadku wersji obliczeń dotyczących przepływu nieustalonego, warunki brzegowe w przypadku obliczeń przepływu ustalonego, edycji wyników obliczeń numerycznych wszystkich wersji obliczeń i transferu wyników obliczeń do programu InRoads. Kolejnym etapem prac było utworzenie numerycznego modelu hydrogeologicznego wzdłuż rzeki Warta.

Wektoryzacja map przeprowadzona została w środowisku Microstation [8]. Wektoryzacji podlegała rzeka Warta, warstwie, skarpy, punkty wysokościowe znajdujące się wewnątrz przyjętego obszaru. Ponadto na mapę wektorową naniesione zostały skarpy projektowanej kopalni Złoczew oraz projektowane systemy odwadniające. Poszczególne dane zostały umieszczane na osobnych warstwach, tak aby można je było wprowadzić do programu InRoads. Kolejnym etapem prac było utworzenie numerycznego modelu hydrogeologicznego wzdłuż rzeki Warta.

Wektoryzacja mapy na podstawie skalibrowanych rastrów została wykonana w układzie trójwymiarowym, a otrzymane dane wyeksportowane następnie do programu InRoads, który generuje numeryczny model powierzchni terenu oraz spągu i stropu warstwy wodonośnej.

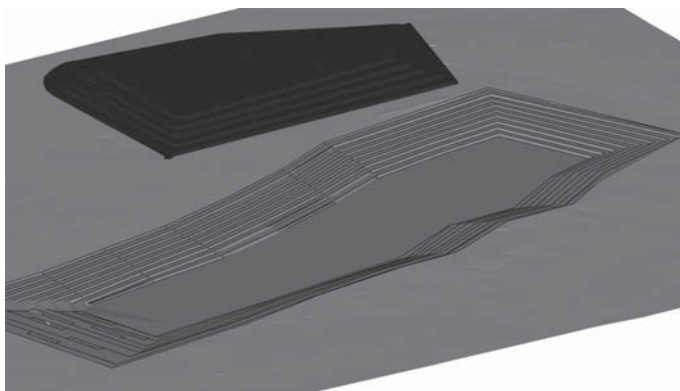
Na obecnym etapie prac wykonano te elementy trójwymiarowej, które są niezbędne do wykonania pierwszego numerycznego modelu przepływu filtracyjnego. Obliczenia te wykonano dla przypadku niskich wielkości przepływu wody w rzekach. Dane do obliczeń w zakresie poziomu wody w korycie rzeki uzyskano z mapy topograficznej w skali 1:10000 i 1:25 000 w układzie wysokościowym Kronsztadt 86 dla rzeki Warta. Dane te wprowadzono na trójwymiarową mapę numeryczną wzdłuż koryta rzeki przyjmując następujące założenia upraszczające: pominięto w wektoryzacji dwie rzeki przepływające ponad terenem przyszłej kopalni odkrywkowej, zakładając, że rzeki te będą przepływać w korycie w pełni uszczelnionym, brzeg południowy i zachodni obszaru przyjęto jako brzegi nieprzepuszczalne.

Na podstawie rastra mapy topograficznej wykonano trójwymiarową mapę powierzchni terenu umieszczając na odpowiednim poziomie izolinie wysokości terenu oraz wprowadzając punkty wysokościowe. Wykonano również model planowanej odkrywki wraz ze zwałowiskiem zewnętrznym (rys. 1).

4. Numeryczny model przepływu filtracyjnego

4.1. Model matematyczny przepływu filtracyjnego

W celu wykonania obliczeń numerycznych metodą MES wykorzystane zostanie równanie Boussinesq, które zgodnie z pracą [5] dla przepływu nieustalonego sprowadza się do postaci (1).



Rys. 1. Planowany model kopalni odkrywkowej oraz zwałowiska zewnętrznego

$$k \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(M \frac{\partial(H)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(M \frac{\partial(H)}{\partial y} \right) \right] + \mu_e \frac{\partial(H)}{\partial t} \quad (1)$$

gdzie:

H — wysokość hydrauliczna względem przyjętego poziomu odniesienia,

M — miąższość warstwy wodonośnej,

k — wartość uśrednionego współczynnika filtracji,

ε — intensywność infiltracji,

μ_e — porowatość efektywna gruntu.

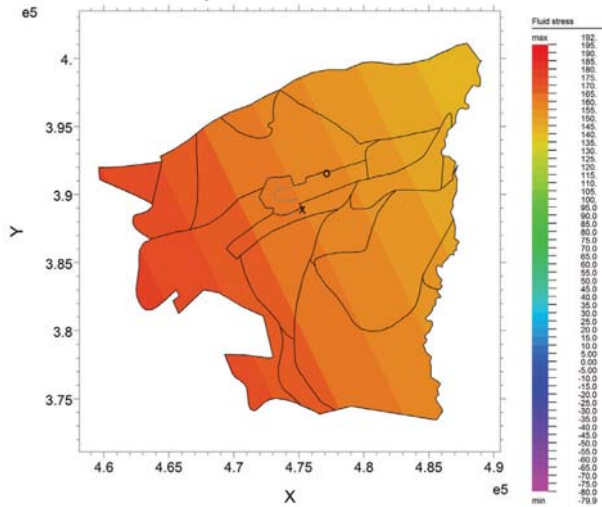
Powyższe równanie Boussinesq'a jest przyjętym modelem matematycznym do obliczeń zwierciadła swobodnego filtracji w przedmiotowym obszarze. Do kalibracji modelu zostały wykorzystane wyniki pomiarów poziomu wody w odwiertach i studniach w badanym obszarze.

4.2. Obliczenia przepływu wód podziemnych

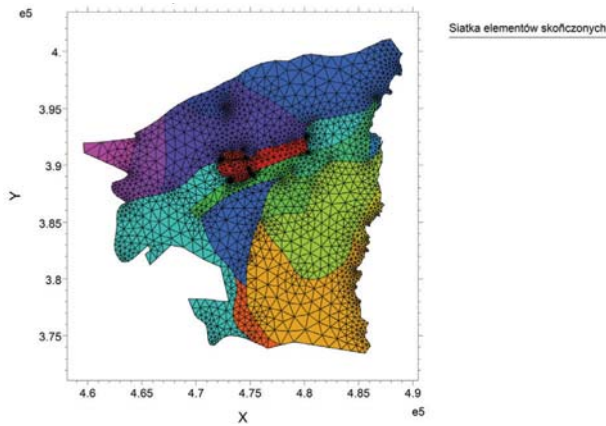
Przepływ nieustalony wymaga określenia warunku początkowego w postaci kształtu zwierciadła swobodnego przed rozpoczęciem odwodnienia. W tym celu wykorzystano mapę hydroizohips dla rozważanego terenu i wygenerowano w narzędziach InRoads i MicroStation numeryczny model zwierciadła wody przed odwodnieniem. Po wykonaniu siatki grid wyeksportowano dane obrazujące kształt zwierciadła swobodnego do programu FlexP-DE 6 [7]. Kształt początkowy w postaci izol linii piezometrycznej powierzchni ciśnienia prezentuje rysunek 2.

Podział obszaru na 24 regiony wraz z wygenerowaną przez system siatkę elementów skończonych przedstawiono na rysunku 3.

Obliczenia obejmowały funkcję wysokości hydraulicznej $H(x, y, t)$ która dla modelu Boussinesq'a określa poziom zwierciadła swobodnego wód podziemnych w czasie, linie prądu $\Psi = \text{const}$ (Ψ — funkcja prądu), pole wektorowe prędkości filtracji $\vec{v} = (v_x, v_y, t)$ oraz wydatek Q dopływający do drenaży kopalni Złoczew określony wzorem całkowym (2).



Rys. 2. Warunek początkowy dla obliczeń przepływu nieustalonego



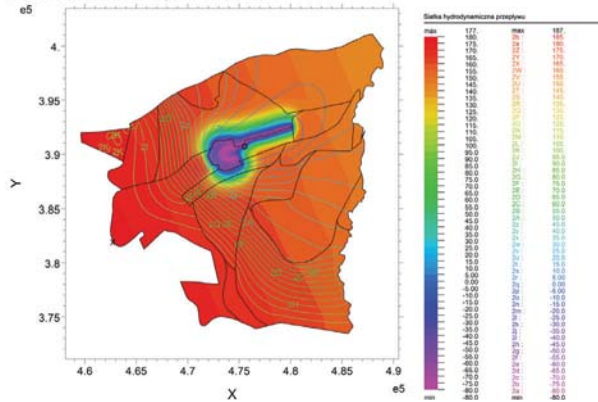
Rys. 3. Podział obszaru na regiony wraz z siatką elementów skończonych dla pierwszego kroku czasowego

$$Q = \int_{p_1}^{p_2} v_n dl \quad (2)$$

Siatka elementów skończonych zmieniała się dla każdego kroku czasowego. Dla pierwszego kroku czasowego zawierała 22 533 węzłów siatki trójkątnej co daje 11019 wygenerowanych elementów skończonych. Następnie system dynamicznie zmieniał gęstość siatki MES. Edycję wyników system wygenerował dla 25 kroków czasowych. Poniżej przedstawiono wyniki dla dwóch kroków czasowych: 1 miesiąca i po dziesięciu latach.

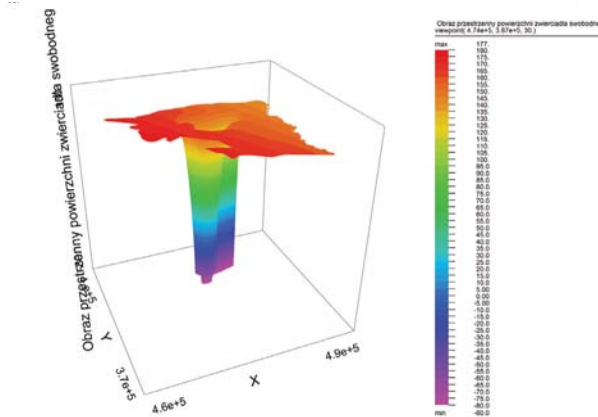
4.2.1. Wyniki obliczeń po jednym miesiącu odwadniania.

Wykres hydroizohips po jednym miesiącu odwadniania dla całego obszaru przedstawiono na rysunku 4.



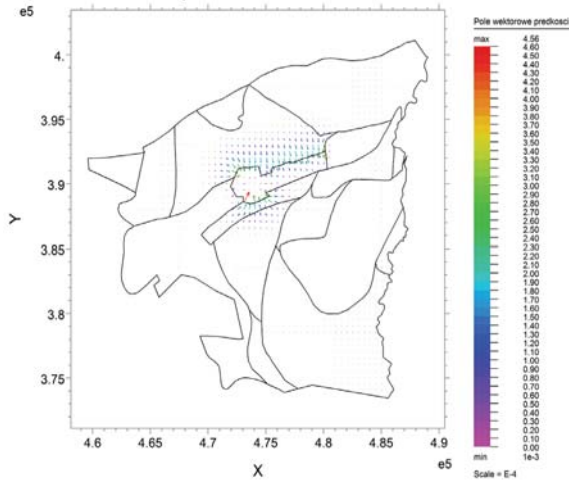
Rys. 4. Wykres hydroizohips po jednym miesiącu odwadniania kopalni

Jak widać z wykresu zasięg leja depresji po jednym miesiącu odwadniania jest niewielki i tylko w nieznacznym stopniu modyfikuje początkowy kształt piezometrycznej powierzchni ciśnienia wody w regionie. Powyższy kształt leja depresji obrazuje w układzie 3D wykres (rys. 5). Pokazany na wykresie lej depresji został przedstawiony w mocno skażonej skali.



Rys. 5. Wykres leja depresji po jednym miesiącu odwadniania

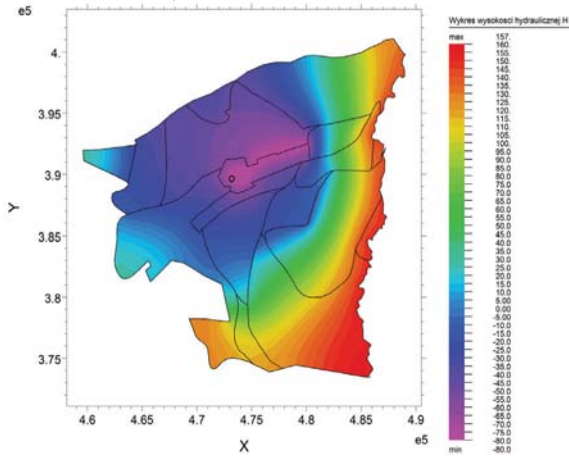
Wektorowe pole prędkości dla tego przedziału czasu odwadniania przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Pole wektorowe prędkości po jednym miesiącu odwadniania

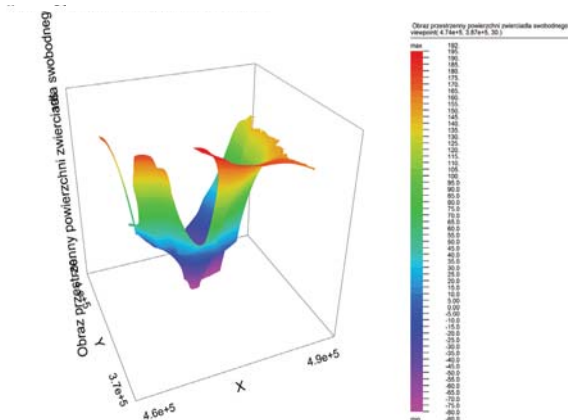
4.2.2. Wyniki obliczeń po dziesięciu latach odwadniania

Wykres hydroizohips po dziesięciu latach odwadniania dla całego obszaru przedstawiono na rysunku 7.



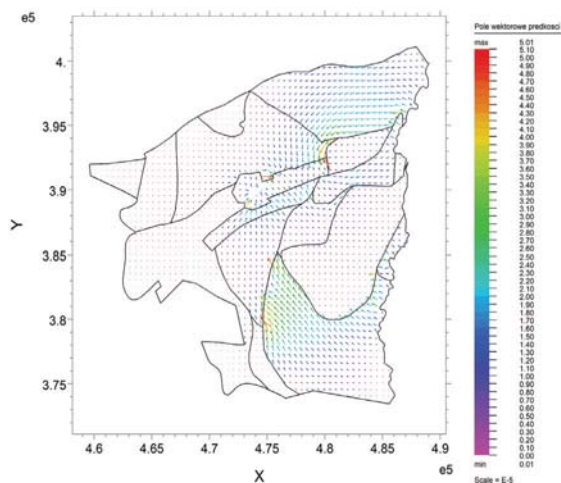
Rys. 7. Wykres hydroizohips po dziesięciu latach odwadniania kopalni

Jak widać z wykresu zasięg leja depresji po dziesięciu latach odwadniania jest na tyle znaczny, że można przyjąć go jako o prawie ostateczny — zbliżony do leja depresji dla $t \rightarrow \infty$ (patrz przepływ ustalony). Powyższy kształt leja depresji obrazuje w układzie 3D wykres na rysunku 8.



Rys. 8. Wykres leja depresji po dziesięciu latach odwadniania

Wektorowe pole prędkości dla tego przedziału czasu odwadniania przedstawiono na rysunku 9.

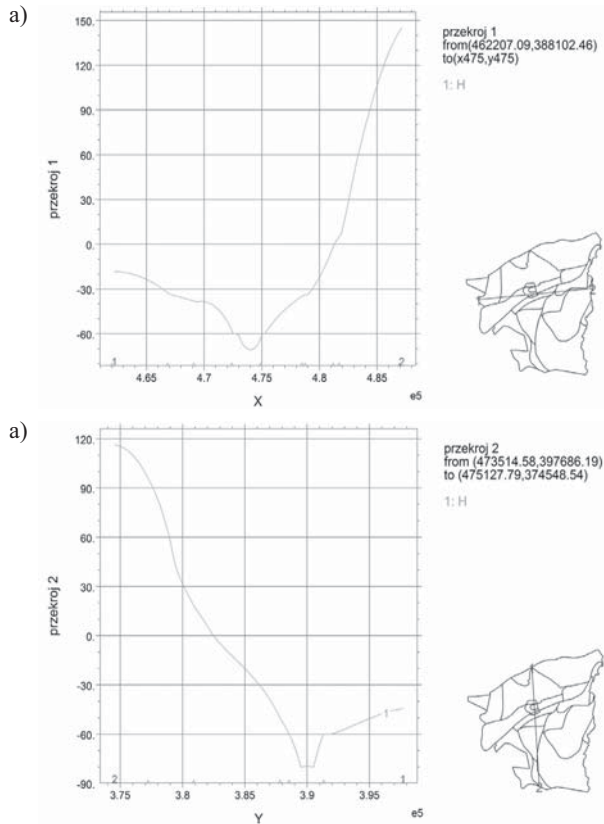


Rys. 9. Pole wektorowe prędkości po dziesięciu latach odwadniania

Podobnie jak przypadku przepływu ustalonego przedstawiono poniżej na rysunkach 10a) i 10b) kształt leja depresji wzdłuż przekroju wschód–zachód i północ–południe.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone prace w zakresie numerycznego modelu terenu i numerycznego modelu spągu warstwy nieprzepuszczalnej pozwoliły na zbudowanie numerycznego modelu terenu i przeanalizowaniu ewolucji zwierciadła wody w czasie. Model może być kalibro-



Rys. 10. Przekroje poprzeczne po dziesięciu latach odwadniania

wany po ewentualnym rozpoczęciu prac górniczych. Istotnym parametrami pozwalającymi na weryfikację uzyskanych wyników w odniesieniu do rzeczywistego kształtu leja depresji są współczynniki filtracji dla poszczególnych wyodrębnionych podobszarów filtracji i wielkości infiltracji wód z powierzchni terenu. Istotną zaletą zastosowanych metod obliczeń MES jest możliwość relatywnie łatwego przejścia z obliczeń filtracji do obliczeń pełzania górotworu w okolicy odkrywki i analizy stanu granicznego dla poszczególnych faz odwodnienia kopalni.

LITERATURA

- [1] *Stachy J.* (red): Atlas hydrologiczny Polski., wraz z opisem T. I i II. Wyd. Geologiczne, Warszawa, 1987
- [2] Studium wykonalności zagospodarowania złoża węgla brunatnego ZŁOCZEW — Koncepcja zagospodarowania złoża węgla brunatnego ZŁOCZEW. Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Wrocław, listopad 2009
- [3] *Sawicki J.*: Ważniejsze typy bilansu wód podziemnych Polski południowo-zachodniej. Archiw. Wydz. Geologii Uniw. Warszawskiego, 1978, (nie publ.)

- [4] *Sawicki J.*: Zmiany naturalnej infiltracji opadów do warstw wodonośnych pod wpływem głębokiego, górniczego drenażu. Ofic. Wyd. Politechn. Wrocławskiej, Wrocław 2000
- [5] *Strzelecki T.*: Modelowanie przepływów przez ośrodki porowate. DWE, Wrocław, 2008
- [6] *Zygar J.*: Kompleksowa dokumentacja geologiczna złoża węgla brunatnego „Złoczew” w kategorii C-2. Kombinat Geologiczny Zachód. Centr. Archiw. Geologiczne PIG nr 4327/197, Wrocław, 1979, (nie publ.)
- [7] Flex PDE 6, Ver. 6, www.pdesolution.com, PDE Solutions Inc, 2009
- [8] MicroStation V8i, www.bentley.com, Bentley Corp., 2010