

WYKORZYSTANIE MODELOWANIA DO ROZBUDOWY SYSTEMU ODWODNIENIA W ODKRYWKOWEJ KOPALNI WĘGLA BRUNATNEGO

NUMERICAL MODELLING FOR DEWATERING SYSTEM DEVELOPMENT IN A LIGNITE OPEN PIT MINE

EDWARD WIENCLAW¹, EUGENIUSZ KODA¹

Abstrakt. W artykule zaprezentowano przykład obliczeń numerycznych przepływu wód podziemnych, wykonanych na potrzeby wspomaganego projektowania zwałowiska wewnętrznego w wyrobisku kopalni węgla brunatnego Turów. Głównym celem przeprowadzonych obliczeń była prognoza zawadnienia zwałowiska nadkładu i jego bezpośredniego otoczenia. Opracowano model numeryczny przepływu wód podziemnych dla obecnie istniejącej/rozpoznanej sytuacji hydrogeologicznej w rejonie zwałowiska i poddano go weryfikacji w odniesieniu do stanu z lipca 2006 r. Wykorzystując zweryfikowany model przepływu wód podziemnych, opracowano model prognostyczny przepływu wód podziemnych dla projektowanego stanu formowania północnego zwałowiska wewnętrznego, przypadającego na 2015 r., i przeprowadzono na nim badania przepływu wód podziemnych. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem programu numerycznego FEMWATER z pakietu GMS. W prezentowanym przykładzie przepływ analizowano jako ustalony w czasie i przy założeniu idealnego zabezpieczenia terenu zwałowiska przed infiltracją opadów atmosferycznych. Wyniki badań modelowych wykazały, że teren zwałowiska będzie podtapiany. Wyniki obliczeń przepływu wód podziemnych są wykorzystywane do projektu rozbudowy systemu odwodnienia odkrywki i zwałowiska oraz rozbudowy monitoringu potencjalnych zagrożeń stateczności skarp zwałowiska w sąsiedztwie obiektów chronionych. Główne obiekty podlegające zabezpieczeniu w rejonie projektowanego zwałowiska to: filar Nysy Łużyckiej, droga międzynarodowa Trzciniec–Sieniawka oraz zaplecze techniczne i magazynowe kopalni. Wyniki obliczeń będą również wykorzystane do zaprojektowania technicznych zabezpieczeń zwałowiska w rejonie tych obiektów.

Słowa kluczowe: modelowanie numeryczne, przepływ wód podziemnych, zwałowisko, kopalnia odkrywkowa, odwodnienia.

Abstract. The paper presents the example of numerical modelling of groundwater flow, performed for the design assistance of waste soil dump from the Turów lignite open pit mine. The main purpose of the modelling was to predict water logging of the waste soil dump and its surroundings. Construction of a numerical model of groundwater flow for the currently recognized hydrogeological conditions in the waste soil dump area, and its verification as of July 2006, was performed. Using the verified model of groundwater flow, a prognostic model was developed for the year of 2015, since mining operations are intended to be extended into the northern part. The calculations were performed with the use of FEMWATER/GMS numerical program. The groundwater flow was analysed as a steady state through time, with an assumption of ideal protection of the waste soil dump against precipitation. The results of modelling indicate that the waste soil dump will be logged. Modelling test results of the groundwater flow will be applied for designing a dewatering system extension and a monitoring system of potential threat of slope stability of the waste soil dump constructed close to the protected objects. The main objects which need special protection during waste soil dump construction and dewatering are as follows: the Nysa Łużycka river bank, international road Trzciniec–Sieniawka and industrial infrastructure around the Turów lignite open mine. The modelling results will also be applied in designing adequate technical safety solutions to protect these objects.

Key words: numerical modelling, groundwater flow, waste soil dump, open pit mine, dewatering.

¹ Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa; e-mail: edward_wienclaw@sggw.pl; eugeniusz_koda@sggw.pl

WSTĘP

Prezentowany przykład obliczeń numerycznych przepływu wody podziemnej wykonano na potrzeby wspomagania projektowania północnego zwałowiska wewnętrznego w odkrywce kopalni węgla brunatnego Turów. Celem przeprowadzonych obliczeń była prognoza zawodnienia zwałowiska nadkładu i jego bezpośredniego otoczenia dla projektowanego stanu formowania zwałowiska przypadającego na 2015 rok. Wyniki badań prognostycznych miały odpowiedzieć na pytanie; czy odwodnienie wgłębne górotworu, realizowane zgodnie z przyjętą koncepcją, będzie wystarczająco skutecznie przeciwdziałać nadmiernemu zawodnieniu korpusu zwałowiska i chronić teren przed podtopieniem.

Obliczenia numeryczne wykonano według następującej procedury:

– opracowano model numeryczny przepływu wód podziemnych dla aktualnej sytuacji hydrogeologicznej w rejonie zwałowiska i poddano go kalibracji w odniesieniu do sytuacji hydrogeologicznej w kwietniu 2004 r. i następnie weryfikacji w odniesieniu do sytuacji z lipca 2006 r.;

– na bazie zweryfikowanego modelu opracowano model prognostyczny przepływu wód podziemnych dla projektowanego stanu formowania północnego zwałowiska wewnętrznego, przypadającego na 2015 r.

Model i obliczenia wykonano wykorzystując program numeryczny FEMWATER, sprzęgnięty z preprocesorem/postprocesorem GMS (EMRL, 2005).

OBIEKT BADAŃ

POŁOŻENIE I ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE

Odkrywkowa kopalnia węgla brunatnego Turów jest położona na terenie gminy Bogatynia, przy granicy państwowej z Niemcami (od zachodu) i Republiką Czeską (od południa i wschodu). Północno-zachodnią granicę odkrywki stanowi droga międzynarodowa Trzciniec–Sieniawka i rzeka graniczna Nysa Łużycka. Rzędna wody w rzece wzdłuż przyległego do odkrywki odcinka wynosi od 218,8 do 222,8 m n.p.m. Od północnego wschodu i wschodu granicą odkrywki jest rzeka Miedzianka, o rzędnych wody od 218,8 do 224,0 m n.p.m. Powierzchnia odkrywki wynosi 24 km², a powierzchnia docelowa 28 km². Głębokość odkrywki wynosi 230 m, docelowo 300 m. W odkrywce funkcjonują dwa pola wydobywcze: pole północne – na północ od uskoku głównego i pole południowe – na południe od uskoku (fig. 1).

Warunkiem kontynuowania odkrywkowej eksploatacji złoża węgla brunatnego jest zapewnienie dostatecznej pojemności zwałowisk pod zdejmowany nadkład. Od 2004 r. nadkład jest lokowany na terenie odkrywki w tych jej częściach, gdzie wyeksploatowano przemysłowe zasoby węgla.

Teren projektowanego zwałowiska o powierzchni 8 km² znajduje się w części północnej odkrywki (Pacia i in., 2004). Spąg zasobów przemysłowych węgla brunatnego leży najniżej w polu północnym, przy uskoku głównym (5 m p.p.m.). Jest to jednocześnie najniższa rzędna dna odkrywki i spągu projektowanego zwałowiska. W 2006 r. rozpoczęto formowanie podpoziomowego piętra zwałowego od dna odkrywki do rzędnej 65 m n.p.m., dowiązanego do odsłoniętej w tym rejonie płaszczyzny głównego uskoku tektonicznego. W następnych latach, tj. do 2015 r., poprzez formowanie kolejnych jedenastu wyższych pięter będzie następowało suk-

cesywne podnoszenie wierzchowiny zwałowiska do wysokości 295 m n.p.m.

Decydującym czynnikiem kształtującym geotechniczne warunki zwałowania i utrzymania długotrwałej stateczności zboczy zwałowiska będzie jego zawodnienie. Przed „zwałowaniem” dna odkrywki planuje się zdrenowanie podłoża w rejonie uskoku. Zakłada się, że po zdrenowaniu podłoża zwierciadło wody podziemnej wzdłuż linii uskoku będzie układało się na głębokości około 1 m. W koncepcji odwodnienia korpusu zwałowiska zakłada się także zachowanie dotychczasowego odwodnienia wgłębnej odkrywki oraz dąży się do wyeliminowania infiltracji opadów atmosferycznych w korpus zwałowiska.

PODŁOŻE PROJEKTOWANEGO ZWAŁOWISKA

Teren położony jest w niecce żytańskiej. Dno i boki niecki budują proterozoiczne granitoidy i towarzyszące im trzeciorzędowe bazalty. Nieckę wypełniają osady mioceńsko-plioceńskiej formacji brunatnowęglowej, wykształcone w postaci naprzemianległych kompleksów detrytycznych, ilastych i fitogenicznych (Dziedziak i in., 2002). Wyżej zalegają osady czwartorzędowe oraz grunty antropogeniczne dwóch istniejących zwałowisk: „starego” i północno-zachodniego.

W rejonie projektowanego zwałowiska wydzielono następujące kompleksy skał i gruntów (w kolejności od najstarszych do najmłodszych; Pacia i in., 2002; fig. 2a):

– trzeciorzędowo-paleozoiczny kompleks zwietrzelin granitoidów i bazaltów (ZW_{g-b}), opisany makroskopowo jako gliny ze żwirem. Powierzchnia stropu kompleksu jest zróżnicowana w przedziale od 100 do 210 m n.p.m. W konstrukcji modelu powierzchnię stropu zwietrzelin uznano za

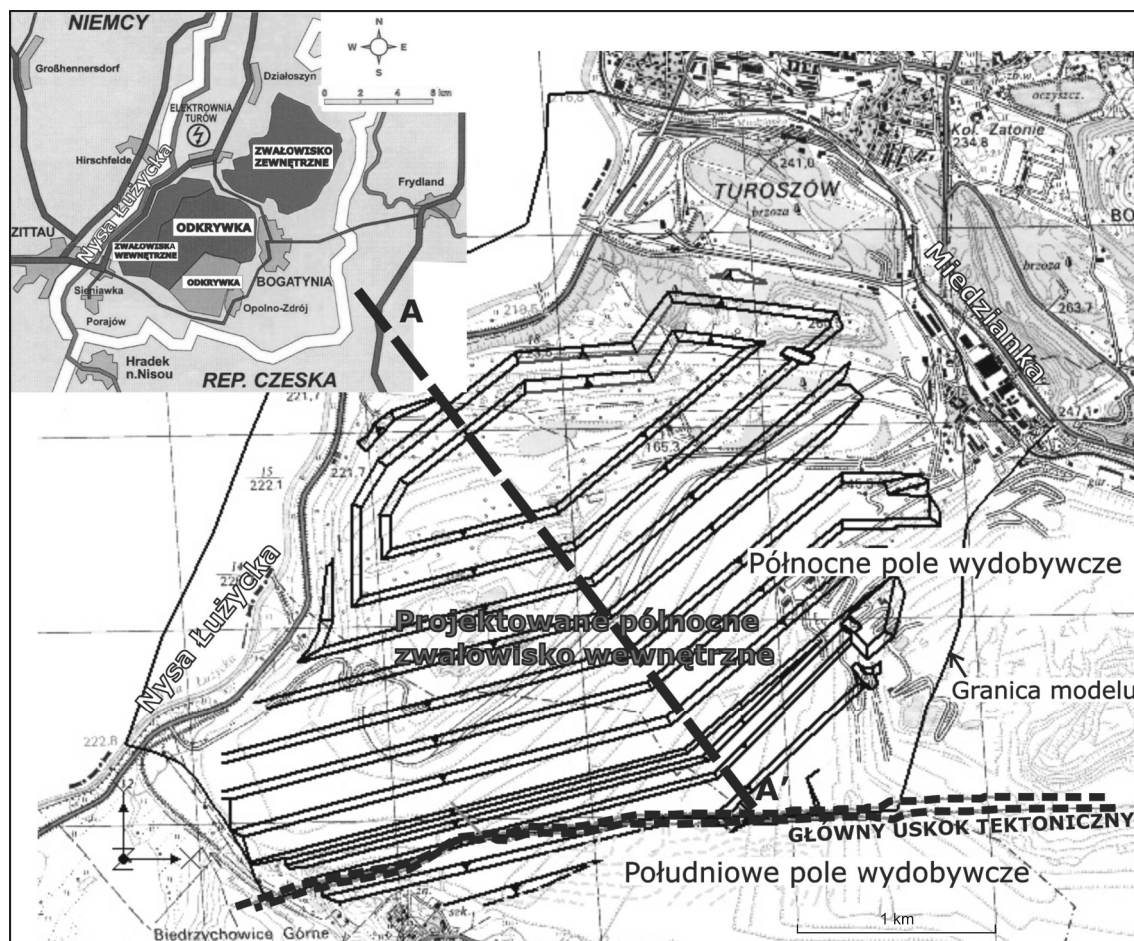


Fig. 1. Lokalizacja projektowanego północnego zwalowiska wewnętrznego w odkrywce kopalni węgla brunatnego Turów; A–A' – linia przekroju hydrogeologicznego

Location of the designed northern inner waste soil dump in the Turów lignite open pit mine;
A–A' – hydrogeological cross-section line

powierzchnię spagową modelu, poprzez którą możliwy jest przepływ wód podziemnych;

- kompleks podwęglowy (P_W), reprezentowany przez żwiry, pospółki, piaski i ily o łącznej miąższości 1–80 m i współczynnika filtracji określonym na podstawie obserwacji w otworach hydrogeologicznych – od $8,7 \cdot 10^{-7}$ do $9,8 \cdot 10^{-5}$ m/s. Współczynnik filtracji kompleksu skał oszacowany na podstawie tarowania modelu wynosi $k_x = k_y = 1,2 \cdot 10^{-5}$ m/s i $k_z = 5,8 \cdot 10^{-6}$ m/s;

- pierwszy pokład węgla brunatnego (W_I) o miąższości 5–20 m. W rejonach wypiętrzeń podłoża bazaltowego i granitowego (na zachód od Nysy Łużyckiej i północna część obszaru badań) warstwa węgla wyklinowuje się. Współczynnik filtracji pierwszego pokładu węgla określony na podstawie tarowania modelu wynosi $k_x = k_y = 3,5 \cdot 10^{-9}$ m/s i $k_z = 1,2 \cdot 10^{-9}$ m/s;

- kompleks międzywęglowy (M_W), reprezentowany przez żwiry, pospółki oraz piaski ilaste i pylaste o łącznej miąższości od kilku do 45 m. Współczynnik filtracji osadów określony na podstawie obserwacji w otworach hydrogeologicznych zawiera się w zakresie od $3,5 \cdot 10^{-6}$ do $1,7 \cdot 10^{-5}$ m/s, a okreś-

ony na podstawie tarowania modelu: $k_x = k_y = 3,5 \cdot 10^{-6}$ m/s i $k_z = 1,2 \cdot 10^{-6}$ m/s;

- drugi pokład węgla brunatnego (W_{II}), zachowany na obrzeżach odkrywki. Współczynnik filtracji tego pokładu węgla określony na podstawie obserwacji w otworach hydrogeologicznych zawiera się w zakresie od $4,6 \cdot 10^{-8}$ do $1,6 \cdot 10^{-4}$ m/s, a pozostałych po eksploatacji fragmentów drugiego pokładu węgla, szacowany na podstawie tarowania modelu: $k_x = k_y = 1,2 \cdot 10^{-6}$ m/s i $k_z = 1,2 \cdot 10^{-9}$ m/s;

- utwory czwartorzędowe (Q), występujące na obrzeżach wyrobiska, reprezentowane są przez piaski i żwiry rzeczne oraz wodnolodowcowe. Miąższość osadów wynosi 10–40 m. Współczynnik filtracji osadów szacowany na podstawie tarowania modelu: $k_x = k_y = k_z = 1 \cdot 10^{-4}$ m/s;

- grunty antropogeniczne istniejących zwalowisk: „starego” (Z_S) i północno-zachodniego ($Z_{P.Z}$) stanowią mieszaninę iłłów, glin, żwirów, pospółek, piasków, węgla, żużli, szlak i popiołów. Łączna miąższość gruntów antropogenicznych wynosi 5–70 m. Współczynnik filtracji gruntów „starego” zwalowiska określony na podstawie tarowania modelu wynosi $k_x = k_y = 4,6 \cdot 10^{-5}$ m/s i $k_z = 1,2 \cdot 10^{-5}$ m/s, a gruntów

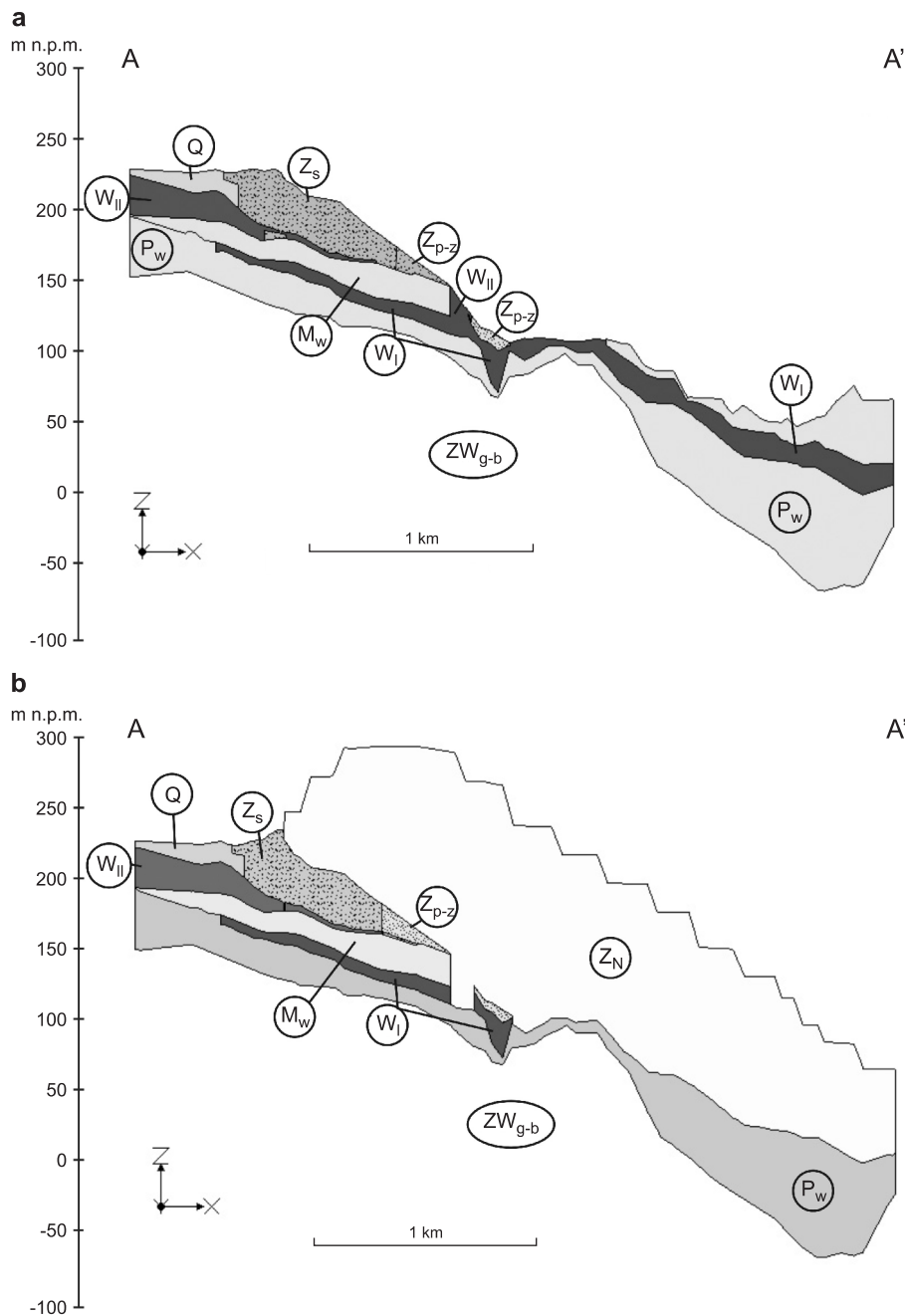


Fig. 2. Podłoże projektowanego północnego zwałowiska wewnętrznego kopalni węgla brunatnego Turów wzdłuż płaszczyzny przekroju A–A’; a – lata 2004–2006, b – 2015 r (objaśnienia symboli w tekście)

Subsoil of the designed northern inner waste soil dump in the Turów lignite open pit mine along A–A’ cross-section plane; a – in 2004–2006, b – predicted state in 2015 (for symbols see the text)

zwałowiska północno-zachodniego – $k_x = k_y = 5,8 \cdot 10^{-7}$ m/s i $k_z = 3,5 \cdot 10^{-7}$ m/s.

W celu utrudnienia infiltracji wody z Nysy Łużyckiej do odkrywki wzdłuż południowego odcinka koryta rzeki została wykonana bentonitowa przesłona przeciwfiltracyjna (B), charakteryzująca się współczynnikiem filtracji $k_x = k_y = 3,5 \cdot 10^{-10}$ m/s i $k_z = 1,2 \cdot 10^{-10}$ m/s. Przesłona zagłębiona jest do stropu drugiego pokładu węgla.

Grunty projektowanego północnego zwałowiska wewnętrznego (Z_N) będą mieszaniną utworów sypkich i spoiwych o założonej wartości współczynnika filtracji $k_x = k_y = 3,5 \cdot 10^{-7}$ m/s i $k_z = 1,6 \cdot 10^{-7}$ m/s. Wraz z postępem eksploatacji węgla brunatnego, geometria i sytuacja hydrogeologiczna podłoża ulegną zmianie. W 2015 r. podłożem projektowanego zwałowiska będą wyłącznie osady kompleksu podwęglowego (fig. 2b).

SYSTEMY ODWODNIENIA WGLĘBNEGO I MONITORING LOKALNY

Na terenie kopalni wykonywane są liczne wiercenia. Część z nich, zależnie od potrzeb, wykorzystywana jest jako studnie odwodnieniowe lub jako piezometry. W miarę postępu robót wydobywczych i zagospodarowywania terenu odkrywki większość otworów po spełnieniu swojego zadania jest likwidowana.

Północne pole wydobywcze jest odwadnianie następującymi systemami wglębnymi (Marek, Jakiel, 2004, 2006): studniami HS i chodnikami, studniami HO, studniami przelewowymi i przelewowo-pompowymi HP oraz drenażami podzwałowymi. Studnie HS, zafiltrowane w drugim pokładzie węgla i gruntach istniejącego zwałowiska, mają za za-

danie przechwytywanie i odprowadzanie wód dopływających na teren kopalni od strony Nysy Łużyckiej oraz odprowadzanie wody z chodników odwodnieniowych wydrążonych w drugim pokładzie węgla. W 2006 r. ich łączny wydatek wynosił $Q_{HS} = 2,55 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$. Studnie HO, zafiltrowane w kompleksie międzywęglowym i gruntach istniejącego zwałowiska, mają za zadanie odwadnianie tego poziomu i gruntów zwałowiska. Studnie HP odwadniają podwęglowy poziom wodonośny. W 2006 r. ich łączny wydatek wynosił $Q_{HO+HP} = 0,63 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$. Zadaniem drenaży podzwałowych, wykonanych pod istniejącymi zwałowiskami, jest odprowadzanie wód podziemnych dopływających na teren wyrobiska od strony Nysy Łużyckiej. W 2006 r. ich łączny wydatek wynosił $Q_{dp} = 1,53 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$.

MODEL PROGNOSTYCZNY PRZEPLYWU WÓD PODZIEMNYCH

Do budowy modelu przepływu wód podziemnych w korpusie projektowanego północnego zwałowiska wewnętrznego został użyty pakiet oprogramowania FEMWATER (Yeh, 1987; Lin i in., 1997). Podstawą modelu FEMWATER jest trójwymiarowe rozwiązanie zagadnienia przepływu wód podziemnych, opisanego równaniem Richadsa (El-Hames, Richards, 1995), opartego na schemacie metody elementu skończonego. W odróżnieniu od klasycznych równań filtracji przyjmowanych w zagadnieniach przepływu wód podziemnych, np. równanie Boussinesq'a (Macioszczyk, 1999), które opisuje ruch wody w warunkach pełnego nasycenia, równanie Richadsa opisuje ruch wody w obu strefach nasycenia: w strefie aeracji i strefie saturacji. Wartości parametrów gruntów i skał w strefie aeracji: różniczkową pojemność wodną, objętościową zawartość wody i względną przewodność hydrauliczną zdefiniowano w modelu jako funkcje opisane zależnościami podanymi przez van Genuchtena (1980) i zaczerpnięto z literatury (Carsel, Parrish, 1988).

Powierzchnia terenu odwzorowana na modelu wynosi 13 km^2 . Północno-zachodnia granica modelu przebiega po terytorium Niemiec, w odległości 300–400 m od Nysy Łużyckiej. Północno-wschodnią granicę stanowi rzeka Miedzianka. Południowa granica pokrywa się z przebiegiem uskoku głównego. Geometria modelu ściśle odwzorowuje geometrię wydzielonych warstw skał i gruntów podłoża, odpowiednio do przewidywanej sytuacji hydrogeologicznej w 2015 r., i geometrię projektowanego zwałowiska. Siatka 3-D modelu składa się z 71 000 elementów z 38 010 węz-

łami. Maksymalna rzędna siatki wynosi 295 m n.p.m., co odpowiada maksymalnej rzędnej powierzchni projektowanego zwałowiska. Minimalna rzędna siatki wynosi 73,5 m p.p.m. | odpowiednio do najniższego położenia spągu kompleksu podwęglowego wzdłuż uskoku tektonicznego.

W prezentowanym przykładzie przepływ wód podziemnych analizowano jako ustalony w czasie. Nysę Łużycką i Miedziankę odwzorowywano na modelu jako ograniczenia o warunkach brzegowych Dirichleta $H_D = H_{Rz}$, gdzie: H_{Rz} to rzędne wody w rzekach. System odwodnienia studniami i system drenaży podzwałowych odwzorowano na modelu odpowiednio do osiąganych wydatków odwodnienia, poprzez funkcję źródła q .

Powierzchnię terenu odwzorowano na modelu poprzez warunki brzegowe Neumanna $q_N = 0$ lub Dirichleta $H_D = H_T$ (H_T – rzędna terenu), w zależności od rozkładu wysokości hydraulicznej na powierzchni. Odwzorowanie powierzchni terenu poprzez warunek $q_N = 0$ odpowiada sytuacji rozpatrywanej w koncepcji odwodnienia korpusu zwałowiska, w której teren zwałowiska i tereny przyległe byłyby zabezpieczone przed infiltracją opadów atmosferycznych (ale także przed ewaporacją). Powierzchnie, dla których określony został warunek $H_D = H_T$, to tereny pozbawione strefy aeracji i uznane za prognozowane strefy podtopień.

Projektowany system odwodnienia wzdłuż głównego uskoku tektonicznego, przeciwdziałający zatopieniu odkrywki i projektowanego zwałowiska, odwzorowano poprzez warunki brzegowe Dirichleta $H_D = H_T - 1 \text{ m}$, zadane w węzłach przypisanych kompleksowi podwęglowemu.

WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Wyniki symulacji przepływu wód podziemnych opracowano w postaci przekroju hydrogeologicznego (fig. 3), na którym przedstawiono rozkład linii jednakowych wysoko-

ści hydraulicznych i ukształtowanie zwierciadła wody podziemnej, oraz mapy prognozowanych stref podtopień terenu (fig. 4).

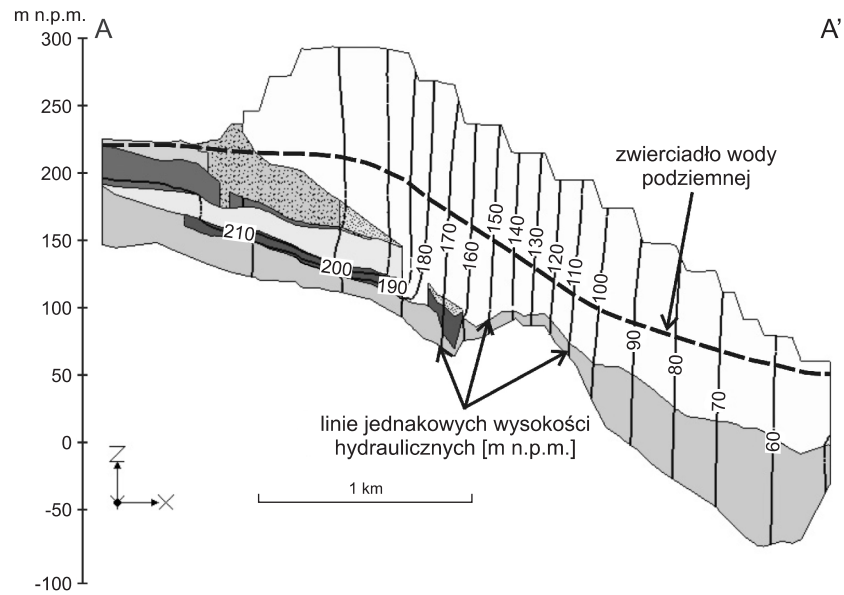


Fig. 3. Przekrój hydrogeologiczny przez korpus projektowanego północnego zwałowiska wewnętrznego kopalni węgla brunatnego Turów

Hydrogeological cross-section across the body of the designed northern waste soil dump in the Turów lignite open pit mine

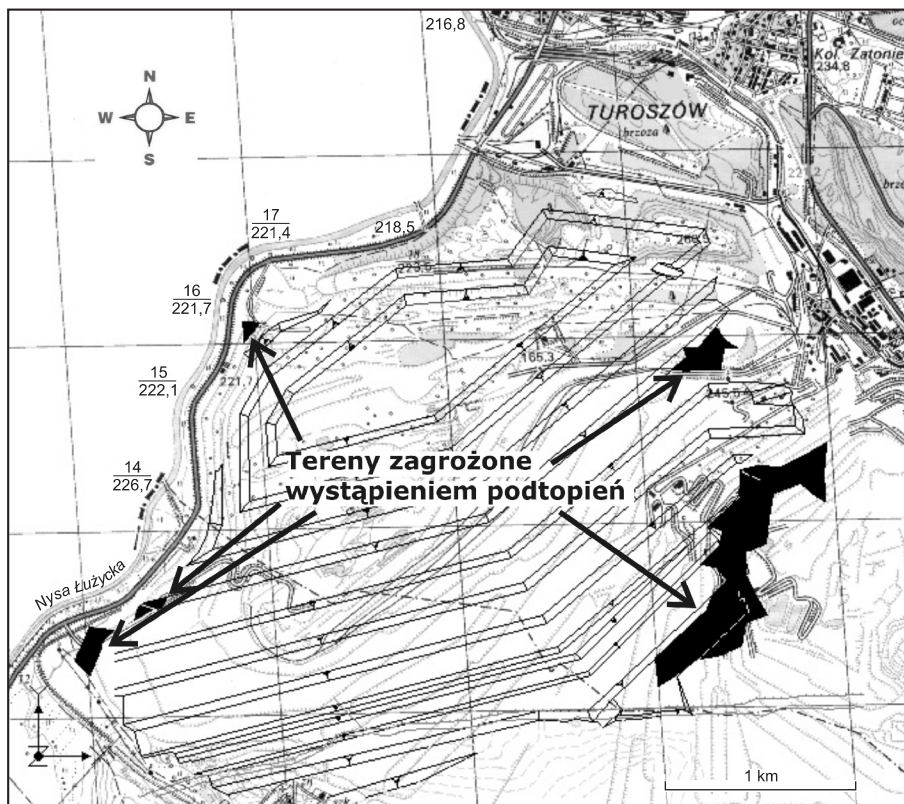


Fig. 4. Prognozowane strefy podtopień terenu projektowanego północnego zwałowiska wewnętrznego kopalni węgla brunatnego Turów i jego otoczenia

Prediction of water flooding zones in the designed northern waste soil dump in the Turów lignite open pit mine and in its surroundings

Rozkład linii jednakowych wysokości hydraulicznych wskazuje, że prognozowany przepływ wód podziemnych w korpusie zwałowiska, zarówno w strefie aeracji, jak i w strefie saturacji, ma charakter przepływu zbliżonego do płaskiego w planie. W podłożu zwałowiska, w miejscach występowania węgla brunatnego, przepływ ma charakter przestrzenny.

Prognozowane swobodne zwierciadło wody podziemnej, rozumiane jako powierzchnia o ciśnieniu równym ciśnieniu atmosferycznemu, występuje na głębokości od zera na terenach zagrożonych wystąpieniem podtopień do kil-

kudziesięciu metrów poniżej powierzchni wierzchowiny zwałowiska.

Terenami zagrożonymi wystąpieniem podtopień u podnóża zachodniego stoku projektowanego zwałowiska są: teren w pobliżu Nysy Łużyckiej oraz południowo-zachodni fragment zwałowiska i terenów przyległych. Kolejnymi obszarami zagrożonymi wystąpieniem podtopień są: fragment wschodniej części zwałowiska i zbocze powyżej oraz południowo-wschodni fragment podnóża zwałowiska i terenów przyległych.

PODSUMOWANIE

W metodyce modelowania przepływu wód podziemnych za klasyczne etapy modelowania uważane są kalibracja i weryfikacja modelu (Dąbrowski i in., 2004; Małecki i in., 2006). Prezentowany prognostyczny model przepływu wód podziemnych dla zwałowiska nadkładu z odkrywkowej kopalni węgla brunatnego został opracowany na bazie modelu, który poddano kalibracji i weryfikacji, ale dla sytuacji hydrogeologicznej podłoża zwałowiska z lat 2004–2006. Oba modele różnią się wyraźnie zarówno co do geometrii brył modeli i geometrii odwzorowanych warstw osadów i gruntów, jak i co do odwzorowanych warunków brzegowych wymuszających przepływ. Ponieważ model prognostyczny będzie mógł być zweryfikowany dopiero po uformowaniu zwałowiska, obecnie nie jest traktowany jako model dokładny do prognozowania przepływu wód podziemnych,

lecz jako model opracowany na potrzeby wspomagania projektowania zwałowiska.

Wyniki badań modelowych wykonanych przy założeniu zabezpieczenia zwałowiska przed infiltracją opadów atmosferycznych wykazały, że mimo to teren zwałowiska będzie podtapiany.

Wyniki badań modelowych przepływu wód podziemnych posłużą do projektowania rozbudowy systemu odwodnienia i systemu monitorowania potencjalnych zagrożeń stateczności zboczy zwałowiska nadkładu, formowanego w bezpośrednim sąsiedztwie obiektów wymagających szczególnej ochrony: koryto rzeki granicznej Nysy Łużyckiej, droga państwowa i infrastruktura przemysłowa w otoczeniu kopalni.

LITERATURA

- CARSEL R.F., PARRISH R.S., 1988 – Developing joint probability distribution of soil-water retention characteristics. *Water Resour. Res.*, **24**, 5: 755–769.
- DĄBROWSKI S., GÓRSKI J., KAPUŚCIŃSKI J., PRZYBYŁEK J., SZCZEPAŃSKI A., 2004 – Metodyka określania zasobów eksploatacyjnych wód podziemnych. Wyd. Medyczne Borgis, Warszawa.
- DZIEDZIAK J., WOŃCIAK M., PACHOLEWSKI A., 2002 – Objasnienia do Mapy hydrogeologicznej Polski w skali 1:50 000, ark. Bogatynia. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- EL-HAMES A.S., RICHARDS K.S., 1995 – Testing the numerical difficulty applying Richards' equation to sandy and clayey soils. *J. Hydrol.*, **167**: 381–391.
- EMRL, 2005 – Groundwater modeling system tutorial volume I–IV. Brigham Young University, UT.
- LIN H.C., RICHARDS D.R., YEH G.T., CHENG J.R., CHENG H.P., JONES N.L., 1997 – FEMWATER: a three-dimensional finite element computer model for simulating density-dependent flow and transport in variably saturated media. Technical Report CHL-97-12, U.S. Army Corps of Engineers.
- MACIOSZCZYK T., 1999 – Matematyczne podstawy opisu ruchu i migracji wód podziemnych dla modelowania i sterowania ich zasobami. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **388**: 157–178.
- MAŁECKI J.J., NAWALANY M., WITCZAK S., GRUSZCZYŃSKI T., 2006 – Wyznaczanie parametrów migracji zanieczyszczeń w ośrodku porowatym dla potrzeb badań hydrogeologicznych i ochrony środowiska. Poradnik metodyczny. Uniwersytet Warszawski, Warszawa.
- MAREK Z., JAKIEL A., 2004, 2006 – Raporty o stanie odwodnienia i zagrożeń wodnych KWB Turów. Arch. KWB Turów, Bogatynia.
- PACIA G., SOWIŃSKI L., TYLIKOWSKI M., 2002 – Dokumentacja geologiczno-inżynierska i hydrogeologiczna podłoża i otoczenia projektowanego północnego zwałowiska wewnętrznego w KWB „Turów” S.A. Arch. Biuro Projektów Górniczych i Geologicznych Sp. z o.o., Wrocław.
- PACIA G., TOMCZYSZYN E., TYLIKOWSKI M., 2004 – Projekt formowania północnego zwałowiska wewnętrznego i jego zboczy transportowych. Arch. Biuro Projektów Górniczych i Geologicznych Sp. z o.o., Wrocław.

Van GENUCHTEN M.T., 1980 – A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Sc. Soc. J.*, **44**: 892–898.

YEH G.T., 1987 – 3D FEMWATER: a three-dimensional finite element computer model of water flow through saturated-unsaturated media. PSU Technical Report. Department of Civil Engineering, The Pennsylvania State University, University Park, PA.