

*Edward Wienclaw**, *Zbigniew Marek***, *Tadeusz Kaczarewski***, *Eugeniusz Koda**

MODEL PRZEPŁYWU WÓD PODZIEMNYCH DLA ZWAŁOWISKA NADKŁADU Z ODKRYWKOWEJ KOPALNI WĘGLA BRUNATNEGO

1. Wprowadzenie

Prezentowany model numeryczny przepływu wód podziemnych opracowano do wspomagania projektowania zwałowiska wewnętrznego w wyrobisku KWB „Turów”; warunkiem kontynuowania odkrywkowej eksploatacji złoża „Turów” jest bowiem zapewnienie dostatecznej pojemności zwałowisk pod zdejmowany nadkład. Od 2004 roku nadkład jest lokowany na terenie odkrywki w tych jej częściach, w których wyeksploatowano przemysłowe zasoby węgla. W roku 2006 rozpoczęto formowanie podziemnego piętra zwałowego od spągu wyrobiska do rzędnej 65 m n.p.m., dowiązanego do odsłoniętej w tym rejonie płaszczyzny uskoku tektonicznego. W następnych latach — do roku 2015, poprzez formowanie wyższych pięter, będzie następowało sukcesywne podnoszenie wierzchowiny zwałowiska do 285÷295 m n.p.m. W składzie gruntów zwałowych dominować będą utwory ilaste. Decydującym czynnikiem kształtującym geotechniczne warunki zwałowania i utrzymania długotrwałej stateczności zboczy zwałowiska będzie jego zawodnienie, wynikające także z infiltracji opadów atmosferycznych. W koncepcji odwodnienia korpusu zwałowiska dąży się do wyeliminowania infiltracji opadów atmosferycznych.

Jednym ze szczegółowych celów badań wykonanych z wykorzystaniem modelu, było wykonanie prognozy podtopienia terenu zwałowiska w warunkach projektowanego na 2015 rok stanu jego formowania, przy założeniu idealnego zabezpieczenia terenu zwałowiska przed infiltracją opadów atmosferycznych.

Model został opracowany z wykorzystaniem pakietu GMS/FEMWATR [3, 5]. Podstawą modelu FEMWATER jest rozwiązanie zagadnienia przepływu wód podziemnych opisanego równaniem Richardsa z zastosowaniem trójwymiarowych elementów skończonych.

* Katedra Geoinżynierii, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa

** BOT KWB „Turów” SA, Bogatynia

2. Podstawowe równanie różniczkowe modelu i wybrane opcje analizy

W programie FEMWATER podstawowym równaniem do modelowania przepływu wód podziemnych jest równanie Richardsa [2]:

$$F(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot [k(h) \cdot \nabla (h + z)] + q \quad (1)$$

gdzie:

$F(h)$ — różniczkowa pojemność wodna ($d\theta/dh$) (L^{-1}),

θ — objętościowa zawartość wody ($L^3 L^{-3}$),

h — wysokość ciśnienia hydrostatycznego (L),

t — czas (T),

$k(h) = k_r \cdot k_s$ — tensor przewodności hydraulicznej (L/T),

k_r — względna przewodność hydrauliczna ($-$),

k_s — tensor przewodności hydraulicznej strefy saturacji (współczynnik filtracji) (L/T),

z — wysokość położenia (L),

q — człon źródłowy [$(L^3/T)/L^3$].

W strefie saturacji: $F = 0$ (dąży do zera w FEMWATER), θ i k_r przyjmują wartości maksymalne (θ równa się porowatości, natomiast $k_r = 1$). W modelu FEMWATER zależności: $F(h)$, $\theta(h)$ i $k_r(h)$ mogą być zdefiniowane jako funkcje opisane zależnościami podanymi przez van Genuchtena [8] lub/i jako funkcje liniowe.

Warunki początkowe dla równania przepływu:

$$h = h_i(w, y, z) \quad \text{na } R, \quad (2)$$

gdzie:

R — obszar działania;

h_i — określany warunek początkowy, który może być otrzymany przez pomiary pola albo przez rozwiązanie wersji równania (1) dla stanu ustalonego.

Warunki brzegowe dla równania przepływu:

— warunki Dirichleta:

$$h = h_d(x_b, y_b, z_b, t) \quad \text{na } B_d, \quad (3)$$

— warunki Neumanna:

$$-n \cdot k_r k_s \cdot \nabla h = q_n(x_b, y_b, z_b, t) \quad \text{na } B_n, \quad (4)$$

— warunki Cauchy’ego:

$$-n \cdot k_r k_s \cdot (\nabla h + \nabla z) = q_c(x_b, y_b, z_b, t) \text{ na } B_c, \quad (5)$$

gdzie:

(x_b, y_b, z_b) — współrzędne na brzegach;

n — wektor jednostkowy normalny do brzegu;

h_d, q_n i q_c — odpowiednio określana wartość funkcjonału Dirichleta, przepływu Neumanna i przepływu Cauchy’ego;

B_d, B_n i B_c — odpowiednio brzegi Dirichleta, Neumanna i Cauchy’ego.

Możliwe są także bardziej złożone warunki „mieszane”, pozwalające uwzględniać warunki zmienne w okresie opadów albo warunki zmienne poza okresem opadów.

Równanie przepływu (1) podporządkowuje warunki początkowe i brzegowe równaniom od (3) do (5) i rozwiązane jest metodą elementów skończonych Galernika.

Model może być używany zarówno dla stanu ustalonego przepływu, jak i dla przepływu zmiennego w czasie.

Obliczone i wydrukowane mogą być następujące zestawy informacji [4]:

- 1) Informacje o przepływie na brzegach (prędkość zmian, przyrost oraz suma przepływu).
- 2) Wysokość hydrauliczna rozumiana jako suma wysokości położenia i wysokości ciśnienia hydrostatycznego (podawana w każdym węźle).
- 3) Wysokość ciśnienia hydrostatycznego (podawana w każdym węźle).
- 4) Natężenie przepływu (podawane w każdym węźle).
- 5) Objętościowa zawartość wody (podawana w punkcie Gaussa każdego elementu).
- 6) Prędkość Darcy’ego (podawana w każdym węźle).

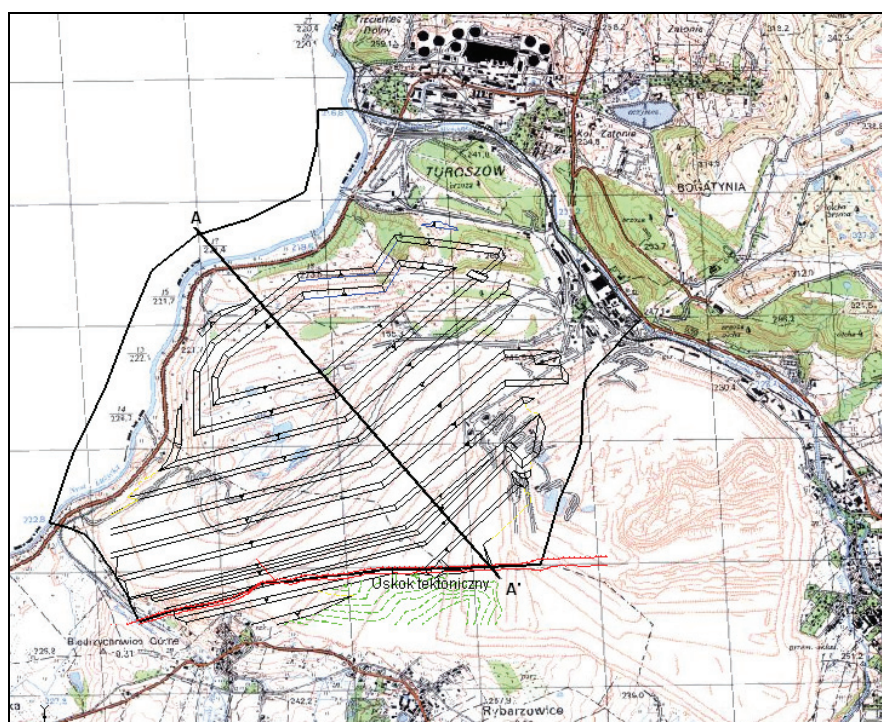
3. Konstrukcja siatki 3-D, parametry materiałów, warunki brzegowe

Granice terenu projektowanego zwałowiska Kopalni Węgla Brunatnego „Turów” oraz terenów przyległych objętych badaniami modelowymi przepływu wód podziemnych przedstawiono na rysunku 1. Północno-zachodnia granica modelu przebiega w odległości od 300 do 400 m na zachód od Nysy Łużyckiej. Północno-wschodnią granicę stanowi rzeka Miedzianka. Granica południowa pokrywa się z przebiegiem uskoku tektonicznego. Powierzchnia terenu badań wynosi 13 km².

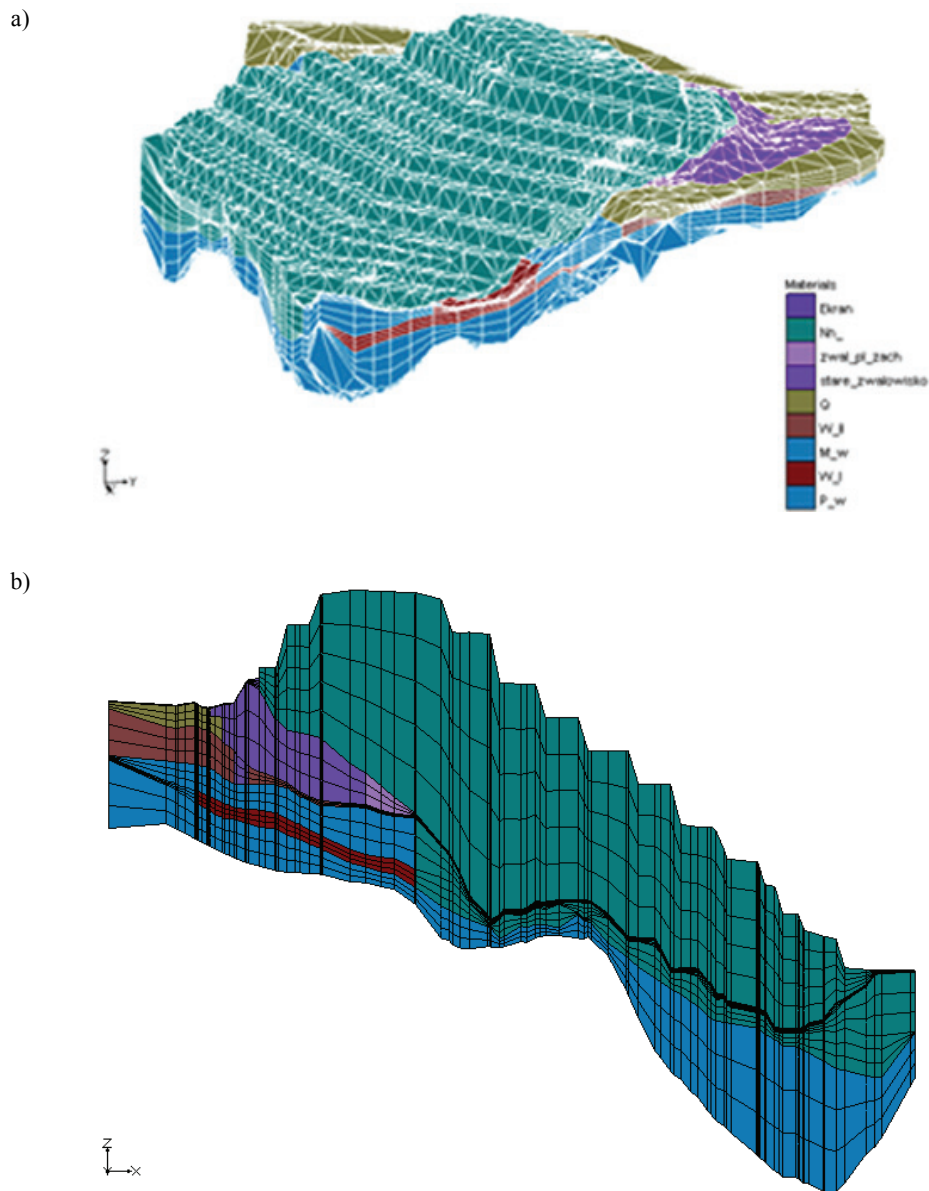
Siatka 3-D modelu składa się z 71 000 elementów (graniastosłupy o podstawie trójkąta) i 38 010 węzłów (rys. 2). Maksymalna rzędna siatki wynosi 295 m n.p.m., co odpowiada maksymalnej rzędnej powierzchni projektowanego zwałowiska. Minimalna rzędna siatki wynosi 73,5 m ppm — odpowiednio do najniższego położenia spągu wodonośnej warstwy podwęglowej wzdłuż uskoku tektonicznego.

Na modelu, odpowiednio do rozpoznania budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych w rejonie projektowanego zwałowiska [1, 6] i projektu zwałowiska [7], odwzorowano przestrzenny rozkład następujących warstw osadów i gruntów/materiałów:

- ekran przeciwfiltracyjny, wykonany wzdłuż koryta Nysy Łużyckiej (bentonit) o współczynniku filtracji strefy saturacji $k_s = k_{sy} = 3,5 \cdot 10^{-10}$ m/s i $k_{sz} = 1,2 \cdot 10^{-10}$ m/s,
- grunty antropogeniczne projektowanego zwałowiska (N_n) o $k_{sx} = k_{sy} = 3,5 \cdot 10^{-7}$ m/s i $k_{sz} = 1,6 \cdot 10^{-7}$ m/s,
- grunty antropogeniczne istniejącego zwałowiska północno-zachodniego (Zwał_pl_zach) o $k_{sx} = k_{sy} = 5,8 \cdot 10^{-7}$ m/s i $k_{sz} = 3,5 \cdot 10^{-7}$ m/s,
- grunty antropogeniczne istniejącego starego zwałowiska (Stary_zwał) o $k_{sx} = k_{sy} = 4,6 \cdot 10^{-5}$ m/s i $k_{sz} = 1,2 \cdot 10^{-5}$ m/s,
- osady czwartorzędowe (Q) o $k_{sx} = k_{sy} = k_{sz} = 1 \cdot 10^{-4}$ m/s,
- fragmenty drugiego pokładu węgla (W_II) o $k_{sx} = k_{sy} = 1,2 \cdot 10^{-6}$ m/s i $k_{sz} = 1,2 \cdot 10^{-9}$ m/s,
- grunty warstwy międzywęglowej (M_w) o $k_{sx} = k_{sy} = 3,5 \cdot 10^{-6}$ m/s i $k_{sz} = 1,2 \cdot 10^{-6}$ m/s,
- pierwszy pokład węgla (W_I) o $k_{sx} = k_{sy} = 3,5 \cdot 10^{-9}$ m/s i $k_{sz} = 1,2 \cdot 10^{-9}$ m/s,
- warstwę podwęglową (P_w) o $k_{sx} = k_{sy} = 1,2 \cdot 10^{-5}$ m/s i $k_{sz} = 5,8 \cdot 10^{-6}$ m/s,



Rys. 1. Lokalizacja projektowanego zwałowiska KWB „Turów” (A–A’ — linia przekroju)



Rys. 2. Siatka modelu FEMWATER projektowanego zwałowiska KWB „Turów”:
 a) 3-D, b) wzdłuż płaszczyzny przekroju A–A’ (przewyższenie skali pionowej $\times 5$).

Wartości parametrów poszczególnych warstw osadów i gruntów/materiałów modelu dla strefy aeracji, jak: różniczkową pojemność wodną $F(h)$, objętościową zawartość wody $\theta(h)$ i względną przewodność hydrauliczną $k_r(h)$ zestawiono w tabeli 1.

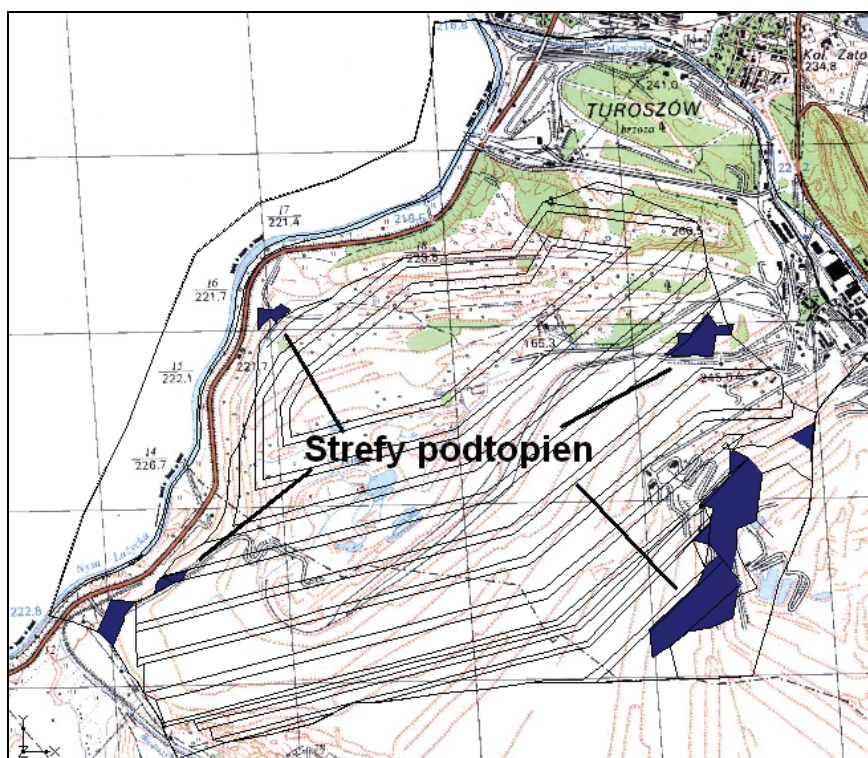
TABELA I
Parametry gruntów/materiałów przyjęte do modelowania numerycznego

Grunt/Materiał	Wartości parametrów strefy aeracji				
	Różniczkowa pojemność wodna $F(h)$; gdzie h [m]	Objętościowa zawartość wody $\theta(h)$; gdzie h [m]	Względna przewodność hydrauliczna $k_r(h)$; gdzie h [m]		
Bentonit	$F(-70) = 0,0005$	$\theta(-70) = 0,3254$	$\theta(0) = 0,38$	$k_r(-70) = 0,0041$	$k_r(0) = 1,0$
N_n	$F(-70) = 0,0005$	$\theta(-70) = 0,3254$	$\theta(0) = 0,38$	$k_r(-70) = 0,0041$	$k_r(0) = 1,0$
Zwał_pl_zach	$F(-70) = 0,0005$	$\theta(-70) = 0,3254$	$\theta(0) = 0,38$	$k_r(-70) = 0,0041$	$k_r(0) = 1,0$
Stary_zwał	$F(-70) = 0,0005$	$\theta(-70) = 0,3254$	$\theta(0) = 0,38$	$k_r(-70) = 0,0041$	$k_r(0) = 1,0$
Q	$F(-70) = 0,0005$	$\theta(-70) = 0,3254$	$\theta(0) = 0,38$	$k_r(-70) = 0,0041$	$k_r(0) = 1,0$
W_II	$F(-100) = 0,00426$	$\theta(-100) = 0,034$	$\theta(0) = 0,46$	$k_r(-100) = 2,5E-8$	$k_r(0) = 1,0$
M_w	$F(-100) = 0,00385$	$\theta(-100) = 0,045$	$\theta(0) = 0,43$	$k_r(-100) = 2,5E-8$	$k_r(0) = 1,0$
W_I	$F(-100) = 0,00426$	$\theta(-100) = 0,034$	$\theta(0) = 0,46$	$k_r(-100) = 2,5E-8$	$k_r(0) = 1,0$
P_w	$F(-100) = 0,00385$	$\theta(-100) = 0,045$	$\theta(0) = 0,43$	$k_r(-100) = 2,5E-8$	$k_r(0) = 1,0$

Jako podstawowe strefy zasilania wód podziemnych badanej części górotworu rejonu kopalni odwzorowywano na modelu rzeki: Nysę Łużycką i Miedziankę (ograniczenia o warunku brzegowym Dirichleta). Założono przy tym, że górotwór będzie odwadniany wzdłuż jego południowej granicy (ograniczenie Dirichleta) oraz poprzez istniejące obecnie systemy odwodnienia wgłębnego: system odwodnienia studniami i system drenaży podzwałowych. Odwodnienie terenu zwałowiska poszczególnymi studniami i drenami poziomymi odwzorowano na modelu poprzez funkcję źródła q . Powierzchnię terenu odwzorowano na modelu poprzez „zmiennie” warunki brzegowe: warunek Neumanna $q_N = 0$ lub warunek Dirichleta, o wysokości $H_D = H_T$, gdzie H_T to rzędna terenu.

4. Prognoza podtopienia terenu zwałowiska

Pod pojęciem podtopienie rozumie się teren pozbawiony strefy aeracji. Prognoza podtopienia terenu zwałowiska, przy założeniu idealnego zabezpieczenia zwałowiska przed infiltracją wody z powierzchni terenu, przedstawiona jest na rysunku 3.



Rys. 3. Prognozowane strefy podtopień — wyniki badań modelowych dla założonej sytuacji hydrogeologicznej bez infiltracji opadów atmosferycznych w korpus 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 terenami zagrożonymi wystąpieniem podtopień są: fragment wschodniej części zwałowiska i zbocze powyżej oraz południowo-wschodni fragment podnóża zwałowiska i terenów przyległych.

5. Wnioski

Wyniki badań modelowych wykonanych przy założeniu idealnego 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, formowanego w bezpośrednim sąsiedztwie obiektów wymagających szczególnej ochrony, takich jak: koryto rzeki granicznej Nysy Łużyckiej, droga państwowa i infrastruktura przemysłowa w otoczeniu kopalni. Posłużą także do projektowania odpowiednich zabezpieczeń technicznych chroniących te rejony i obiekty.

LITERATURA

- [1] BOT KWB TURÓW. Raport o stanie odwodnienia i zagrożeń wodnych BOT KWB TURÓW SA za I półrocze 2006 roku. Oprac.: Marek Z., Jakiel A., Nowak J., Wiśniewski J. Bogatynia. BOT KWB Turów SA 2006
- [2] *El-Hames A.S., Richards K.S.*: Testing the numerical difficulty applying Richards' equation to sandy and clayey soils. *Journ. Hydrol.*, 167, 1995, 381–391
- [3] EMRL. Groundwater modeling system tutorial volume I–IV. Brigham Young University, UT, 2003
- [4] *Kamiński R., Kijkowski J., Wienclaw E.*: Możliwości zastosowania programu FEMWATER w hydrotechnice. IX Konferencja Naukowa nt. „Metody Numeryczne do Projektowania i Analizy Konstrukcji Hydrotechnicznych”. Kraków – Korbielów, 1997, 17–24
- [5] *Lin H.C., Richards D.R., Yeh G.T., Cheng J.R., Cheng H.P., Jonem N.L.*: 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, 1997, 151
- [6] PROGiG. Dokumentacja geologiczno-inżynierska i hydrogeologiczna podłoża i otoczenia północnego zwałowiska wewnętrznego w KWB „Turów” SA Etap II. Oprac.: *Pacia G., Sowiński L., Tylikowski M.*, Wrocław, 2002
- [7] PROGiG. Projekt formowania północnego zwałowiska wewnętrznego i jego zboczy transportowych. Oprac.: *Pacia G., Tomczyszyn E., Talikowski M.*, Wrocław, 2004
- [8] *Van Genuchten M.T.*: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Sci. Soc. Journ.*, vol. 44, 1980, 892–898