

ANALIZA NUMERYCZNA WPŁYWU PIĘTRZENIA PROJEKTOWANEGO ZBIORNIKA RETENCYJNEGO BOBOSZÓW NA WODY PODZIEMNE, ZLEWIA NYSY KŁODZKIEJ

NUMERICAL ANALYSIS OF THE WATER DAMMING INFLUENCE ON THE GROUNDWATER SYSTEM IN THE AREA OF PROJECTED ATTENUATION RESERVOIR BOBOSZÓW, NYSA KŁODZKA RIVER CATCHMENT

PIOTR HERMANOWSKI¹, JERZY MICHALAK²

Abstrakt. Budowa suchych zbiorników retencyjnych jest powszechnie stosowanym sposobem przeciwdziałania powodziom poprzez czasowe zatrzymanie powodziowej fali wezbraniowej. Piętrzenie wód powierzchniowych wywołuje jednocześnie zmiany reżimu wód podziemnych na skutek podniesienia bazy drenażowej oraz częściowego zablokowania przepływu wód podziemnych w konsekwencji budowy zapory. Analiza wpływu piętrzenia wody w projektowanym zbiorniku retencyjnym Boboszów na Nysie Kłodzkiej została przeprowadzona na podstawie numerycznej symulacji przepływu wód podziemnych, wykonanej przy wykorzystaniu metody elementów skończonych. Wyniki przeprowadzonych symulacji wskazują na wzrost wysokości zwierciadła wód podziemnych poniżej zapory o około 1–2 m w okresie maksymalnego piętrzenia zbiornika, w stosunku do stanu obecnego. Zmiana reżimu hydrogeologicznego, związana z piętrzeniem zbiornika, pociąga również za sobą wzrost prędkości przepływu wód podziemnych o około rząd wielkości pod zaporą oraz zwiększenie wydatku strumienia wód podziemnych w bezpośredniej bliskości zapory.

Słowa kluczowe: suchy zbiornik retencyjny, metoda elementów skończonych, przepływ wód podziemnych pod zaporą, piętrzenie wody, zlewnia Nysy Kłodzkiej.

Abstract. Attenuation reservoirs are common and one of the most effective parts of integrated flood protection systems since they are temporally able to reduce the outflow peak from a mountainous catchment. Water lifting within reservoirs results in alternations of groundwater flow velocities and fluxes, and it locally hampers groundwater drainage due to water dam building. Influence of water lifting in the area of projected attenuation reserve Boboszów in the upper part of the Nysa Kłodzka catchment was analysed based on the finite elements groundwater flow model. Results of the numerical simulations show an increase of groundwater level by about 1–2 m in the area below the water dam for the time of maximum water lifting. Modification of hydrogeological conditions due to water impoundments results in the increase of groundwater velocities by about one order of magnitude under the dam, and in a significant increase of groundwater fluxes in the vicinity of the dam.

Key words: attenuation reservoir, finite element code, groundwater flow under water dam, water lifting, Nysa Kłodzka River catchment.

WSTĘP

Jednym ze sposobów przeciwdziałania powodziom jest budowa zbiorników retencyjnych, a w przypadku zlewni górskich istotne znaczenie odgrywa retencja w zbiornikach o małej pojemności, tzn. nieprzekraczającej 5 mln m³. Ty-

powymi zbiornikami przeciwpowodziowymi są jednak zbiorniki suche, tzn. takie, których piętrzenie odbywa się tylko w okresie wystąpienia powodziowej fali wezbraniowej, przekraczającej możliwości drenażowe koryta rzecznego.

¹ Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Instytut Geologii, ul. Maków Polnych 16, 61-606 Poznań; e-mail: piotr.hermanowski@amu.edu.pl

² Arcadis Sp. z o.o., ul. Puławska 182, 02-670 Warszawa; e-mail: j.michalak@arcadis.pl

Zatem zadaniem budowli piętrzących, ograniczających suche zbiorniki retencyjne, jest krótkoterminowa retencja wody.

Każde przedsięwzięcie prowadzące do spiętrzenia wód powierzchniowych powoduje podniesienie wysokości bazy drenażowej zarówno dla wód powierzchniowych, jak i dla wód podziemnych. W konsekwencji drenaż części zasobów wód podziemnych może się odbywać w innym kierunku, niż miało to pierwotnie miejsce (Van Everdingen, 1972; Kasztelan, Przybyłek, 2004). Inne konsekwencje są związane ze wzrostem ciśnienia hydrostatycznego działającego na dno zbiornika, którego wielkość zależna jest od wysokości piętrzenia. W przypadku braku izolacji dna zbiornika przez utwory słabo przepuszczalne, podczas piętrzenia zbiornika ciśnienie hydrostatyczne jest natychmiast przekazywane do ośrodka wód podziemnych, co pociąga za sobą konsekwencje w postaci zmian hydrodynamicznych przepływu wód podziemnych. Z relatywnie szybkim wzrostem ciśnienia hydrostatycznego mamy do czynienia w okresie powodzi, kiedy formuje się fala wezbraniowa, a jej czasowe zatrzymanie w zbiorniku retencyjnym powoduje wzrost ciśnień, szczególnie w otoczeniu budowli piętrzącej. W zależności od

struktury hydrogeologicznej danego obszaru ciśnienie może być przekazywane na znaczne odległości, powodując wypływ wód podziemnych na obszarach, gdzie dotychczas nie obserwowano tego typu zjawisk (np. Snow, 1972). Przekazywanie ciśnień piezometrycznych w środowisku wód podziemnych może być szczególnie zauważalne, gdy mamy do czynienia z ośrodkiem porowatym o dobrych parametrach filtracyjnych lub z ośrodkiem szczelinowym, gdzie system spękań umożliwia szybki przepływ wód podziemnych.

Analiza wpływu piętrzenia wód powierzchniowych na reżim wód podziemnych wymaga zatem przeprowadzenia badań hydrogeologicznych pozwalających oszacować zmiany hydrodynamiczne, które w konsekwencji mogą doprowadzić do podtopień obszarów położonych poniżej zapory, jak również mają wpływ na stateczność zboczy (Iverson, Major, 1987) i stabilność budowli piętrzącej (Roeloffs, 1994).

Celem tego opracowania jest prześledzenie zmian hydrodynamicznych związanych z budową suchego zbiornika retencyjnego, zaprojektowanego w obszarze występowania spękanych skał kredowych, na podstawie numerycznych symulacji hydrogeologicznych.

CHARAKTERYSTYKA HYDROGEOLOGICZNA OBSZARU BADAŃ

Jednym z najbardziej zagrożonych występowaniem powodzi obszarów w Polsce jest Kotlina Kłodzka. W okresie ostatnich kilkunastu lat kilkakrotnie na tym terenie wystąpiły powodzie, których skutki można zaobserwować do dnia dzisiejszego. Najbardziej katastrofalne w skutkach były powodzie w latach 1997 i 2010. Duże zagrożenie powodziowe w Kotlinie Kłodzkiej jest związane z ukształtowaniem terenu, co w konsekwencji wystąpienia wysokich opadów powoduje szybki przepływ wody w potokach górskich i jej kumulowanie w postaci fali wezbraniowej.

Obszar badań jest zlokalizowany w południowej części Kotliny Kłodzkiej, w dolinie Nysy Kłodzkiej, pomiędzy miejscowościami Pisary i Boboszów (fig. 1). Zapórę zbiornika planuje się wykonać w dolnej części doliny, w miejscowości Boboszów na około 180 km biegu rzeki. Nachylenie zboczy doliny w bezpośredniej bliskości zapory osiąga maksymalne wartości około 30%, po jej północnej stronie. Południowa część doliny ma łagodniejsze nachylenie zboczy, osiągające wartości około 20% w okolicy zapory. Najwyższe wzniesienia terenu położonego w bezpośredniej bliskości projektowanego zbiornika osiągają rzędne wysokościowe powyżej 540 m n.p.m., podczas gdy dno doliny znajduje się na około 490 m n.p.m. Średni roczny przepływ wody z wielolecia (SSQ) w Nysie Kłodzkiej na wysokości zapory wynosi około 0,32 m³/s (Grzegorzczak i in., 1994). Średnie roczne opady atmosferyczne na obszarze badań kształtują się pomiędzy 720 a 820 mm, jednak opady wywołujące wezbrania powodziowe osiągają wartości znacznie odstające od wartości średnich. Suma 5-dniowych sum opadów w okresie od 3 do 7 lipca 1997 r. wynosiła na obszarze badań około 300 mm (Szalińska i in., 2008).

Na powierzchni wzniesień okalających dolinę Nysy Kłodzkiej występują osady kredy górnej (piaskowce ilaste, piaskowce drobnoziarniste oraz margle), osiągające w profilu pionowym miąższość kilkuset metrów (około 700 m w miejscowości Pisary; fig. 2). Skały te można również obserwować lokalnie w odsłonięciach znajdujących się w dolnych partiach doliny. Piaskowce występujące w części stropowej utworów kredowych są silnie zwietrzałe. W niższych partiach doliny występują gliny deluwialne, a dno doliny wzdłuż Nysy Kłodzkiej tworzą piaski i żwiry fluwialne oraz występujące lokalnie osady zastoiskowe tarasów zalewowych (iły i muły), bezpośrednie podłoże tych utworów stanowią osady kredy górnej (fig. 3).

Pod względem hydrogeologicznym na obszarze badań można wydzielić dobrze przepuszczalne utwory piaszczysto-żwirowe o nieciągłym rozprzestrzenieniu, występujące na powierzchni wzdłuż Nysy Kłodzkiej. Miąższość tych utworów nie przekracza 3 m, a współczynnik filtracji, oszacowany na podstawie krzywej uziarnienia, wynosi od $2,9 \cdot 10^{-4}$ do $1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s. W miejscu projektowanej zapory przeprowadzono również badania współczynnika filtracji metodą zalewania otworu. Badania przeprowadzono dla utworów tworzących przypowierzchniową warstwę wodonośną budowaną przez piaski drobnoziarniste, a uzyskane wartości wynoszą około $2,9 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Badania parametrów hydraulicznych utworów kredowych, jak i głębokość ich występowania zostały rozpoznane na podstawie wierceń, głównie zlokalizowanych w okolicy projektowanej zapory. W utworach kredy górnej możemy wyróżnić dwie odmienne pod względem parametrów hy-

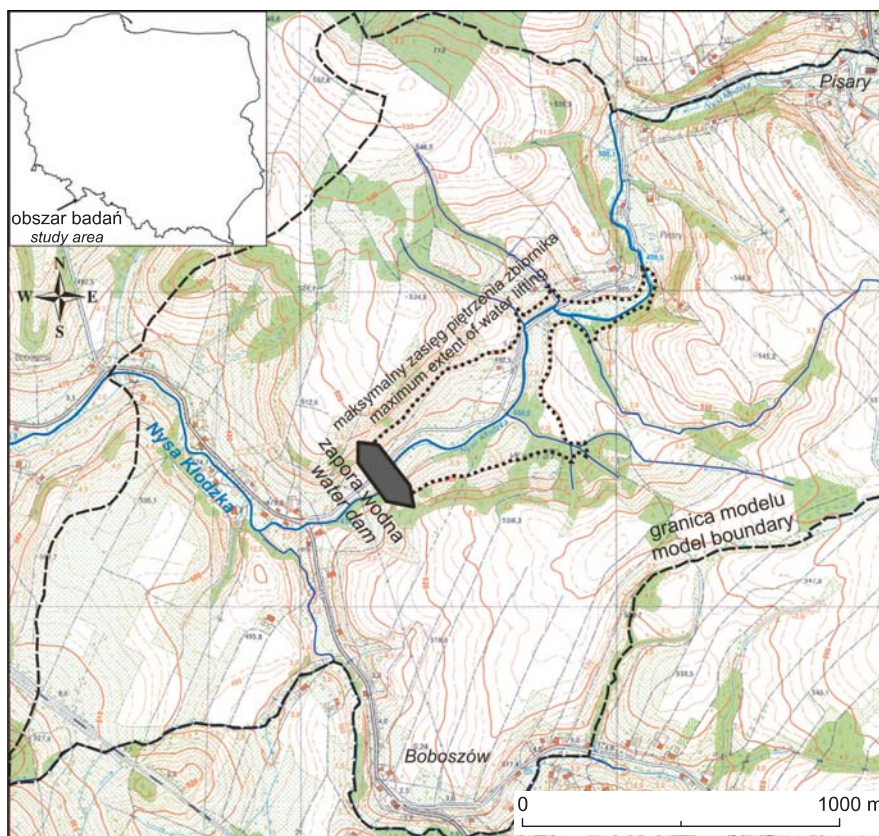


Fig. 1. Lokalizacja projektowanego suchego zbiornika retencyjnego Boboszków wraz z granicą obszaru objętego badaniami modelowymi

Location of the projected attenuation reservoir Boboszków and the groundwater modelling area boundary

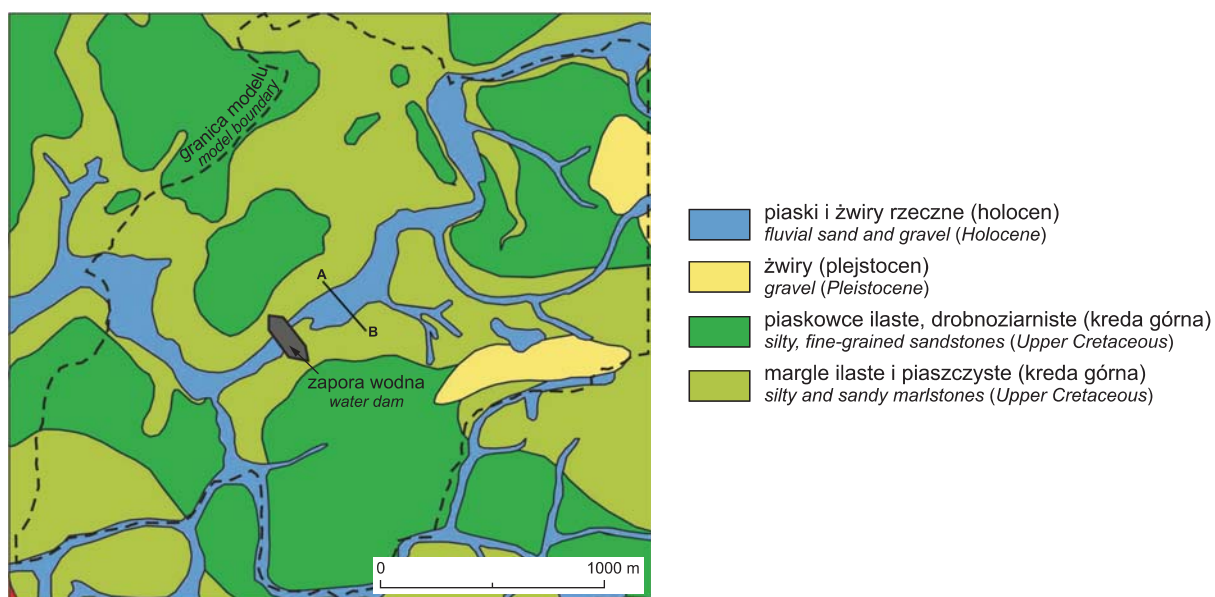


Fig. 2. Schematyczna mapa geologiczna obszaru badań (Sawicki, 1962 – zmienione)

A–B – linia przekroju geologicznego, fig. 3

Schematic geological map of the study area (Sawicki, 1962 – modified)

A–B – geological cross-section line presented in Fig. 3

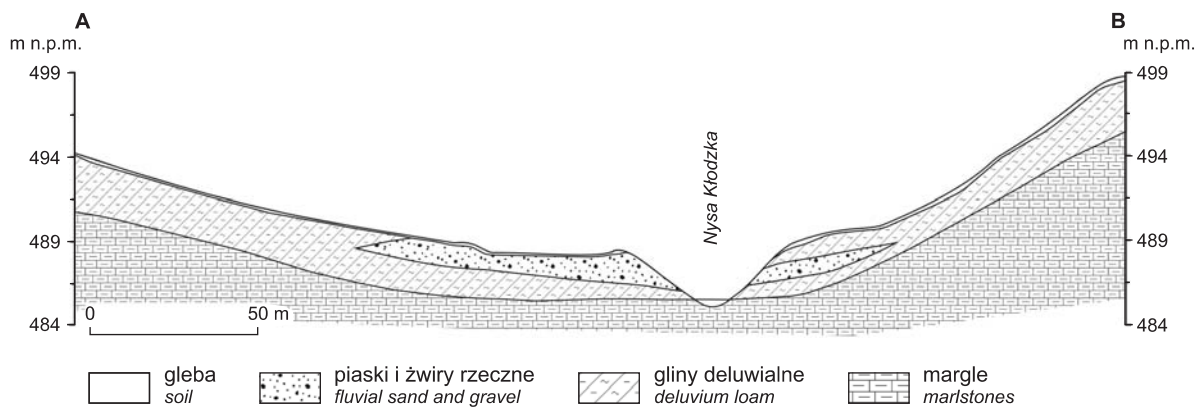


Fig. 3. Schematyczny przekrój geologiczny (lokalizacja na fig. 2)

Schematic geological cross-section (for location see Fig. 2)

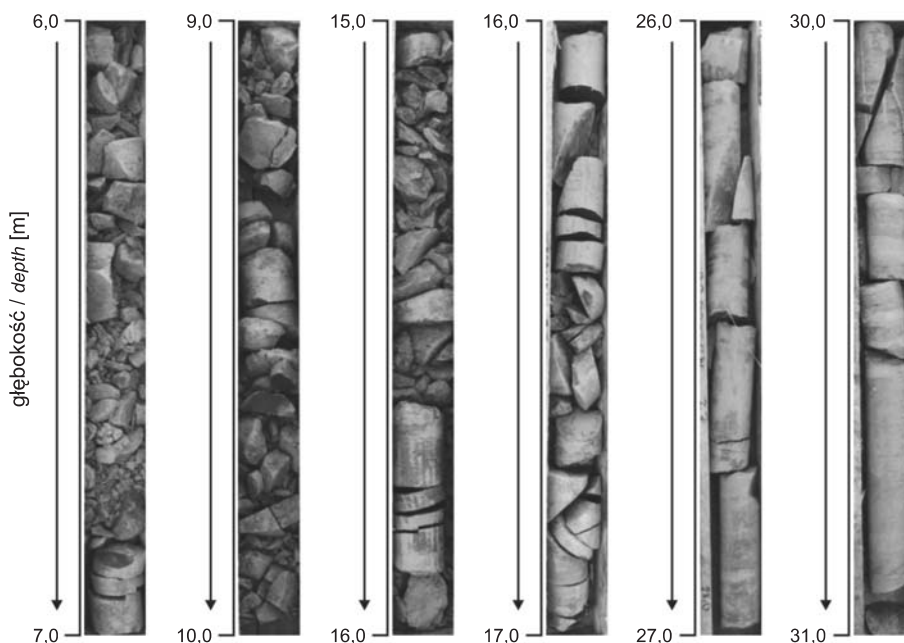


Fig. 4. Rdzeń wiertniczy przedstawiający zmianę stopnia spękań skal kredowych spowodowanych wietrzeniem, w zależności od głębokości

Drilling core presenting the difference in the amount of cracks in the Cretaceous rocks due to weathering processes in relation to the core depth

draudycznych strefy wodonośne. Pionowa strefowość parametrów hydraulicznych utworów kredy górnej jest konsekwencją działania procesów wietrzeniowych. W części stropowej można zaobserwować dezintegrację skał powstałą na skutek kongelacji, poprzedzonej powstaniem gęstej sieci drobnych uskoków (fig. 4). Średnia miąższość tej strefy wynosi około 17 m, a średni współczynnik filtracji oszacowany na podstawie pomiarów wodochłonności wynosi około $1,5 \cdot 10^{-5}$ m/s. Występowanie silnie zwietrzałych utworów kredowych potwierdzono we wszystkich wierceniach, się-

gających, w zależności od lokalizacji wiercenia, poniżej spągu utworów aluwialnych lub deluwialnych. Pomiary wodochłonności wykazały znaczącą zmianę parametrów filtracyjnych poniżej tej strefy, tzn. w obrębie utworów niezwiertzałych, w obrębie których przepływ wód podziemnych odbywa się głównie poprzez sieć spękań tektonicznych. Granica pomiędzy utworami kredowymi wykazującymi różny stopień zwietrzenia i tym samym różne parametry filtracyjne występuje na głębokości około 20 m. Średnia wartość współczynnika filtracji niezwiertzałych utworów kredowych

oszacowana na podstawie pomiarów wodochłonności przeprowadzonych w 11 otworach rozpoznawczych wynosi $1,5 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Z uwagi na typowy, niejednorodny układ spękań w obrębie skał kredowych można przypuszczać, że parametry fil-

tracyjne tych utworów wykazują dużą zmienność przestrzenną na obszarze badań, zależną od szczelinowatości ośrodka. Jednakże na całym obszarze badań należy się spodziewać występowania dwóch opisanych stref o różnych parametrach filtracyjnych.

MODEL NUMERYCZNY

W celu prześledzenia hydrodynamicznych zmian przepływu wód podziemnych, związanych ze spiętrzeniem zbiornika retencyjnego w okresie formowania się fali wezbraniowej, został wykonany model numeryczny. Z uwagi na geometrię budowy hydrogeologicznej obszaru związaną z lokalizacją obszaru badań w regionie górskim oraz w celu wiernego odwzorowania geometrii zbiornika retencyjnego i cieków powierzchniowych model numeryczny opracowany został w programie MicroFEM version 3.50.76, który wykorzystuje metodę elementów skończonych, gdzie dzięki trójkątnej siatce dyskretyzacyjnej możliwe jest wierne odwzorowanie geometrii poszczególnych warstw oraz przebiegu struktur krzywoliniowych (fig. 5). Symulacje numeryczne zostały przeprowadzone dla dwóch wariantów, z których pierwszy odwzorowuje aktualne warunki hydrodynamiczne (zgodne z pomiarami zwierciadła wód podziemnych przeprowadzonymi jesienią 2011), a drugi jest symulacją warunków powstałych w wyniku maksymalnego piętrzenia wody w zbiorniku retencyjnym, tj. do rzędnej 498,7 m n.p.m.

Wyznaczone granice modelu przebiegają w większości wzdłuż granic naturalnych, które w południowej i północnej części obszaru stanowią cieki powierzchniowe (odwzorowane na modelu warunkiem brzegowym III rodzaju), granica zachodnia modelu została poprowadzona wzdłuż wododziału, a jedynie wschodnia granica jest granicą pozbawioną związku z hydrografią obszaru lub granicą występowania struktur hydrogeologicznych (fig. 1). Granicę zachodnią i wschodnią modelu odwzorowano warunkiem brzegowym I rodzaju. Niemniej jednak zarówno granica wschodnia modelu, jak i pozostałe granice modelu zostały znacząco odsunięte od obszaru, którego analiza jest najważniejsza z punktu widzenia zmian hydrodynamicznych, tj. od obszaru znajdującego się w bezpośredniej bliskości zapory wodnej. Przyjęta na modelu wartość opadów atmosferycznych wynosi 1000 mm/rok. Wyznaczony zasięg modelu numerycznego pokrywa obszar około 4600 km². Siatka dyskretyzacyjna została zagęszczona na obszarze maksymalnego zasięgu piętrzenia zbiornika oraz poniżej projektowanej zapory wodnej, w konsekwencji składa się ona z 9018 elementów (fig. 5).

Pomimo występowania na całym obszarze bezpośrednich kontaktów hydraulicznych pomiędzy wszystkimi rozpoznawanymi warstwami hydrogeologicznymi, wydzielonymi na podstawie ich parametrów filtracyjnych, tj. warstwa wodonośnych utworów czwartorzędowych oraz zwietrzałych drobnoziarnistych piaskowców kredowych (warstwa I modelu), war-

stwa silnie spękanych utworów kredy górnej (warstwa II modelu) oraz warstwa mniej spękanych utworów kredy górnej (warstwa III modelu), każde z tych wydzielen jest reprezentowane na modelu jako oddzielna warstwa. Dodatkowo w stropowej części modelu (w obrębie warstwy I modelu) odwzorowano występowanie nieciągłych osadów słabo przepuszczalnych odpowiadających glinom deluwialnym, lokalnie powodujących naporowe warunki filtracji wód podziemnych. Każdą odwzorowaną na modelu warstwę dobrze przepuszczalną reprezentuje parametr wodoprzewodności, którego szacunkowa średnia wartość dla warstwy utworów czwartorzędowych wynosi około 109,0 m²/d (maks. 245,9 m²/d). Dla warstwy reprezentującej utwory kredy górnej przyjęto średnią wartość wodoprzewodności utworów silnie spękanych wynoszącą 21,6 m²/d. Miąższość najniższej warstwy modelu, tj. warstwy reprezentującej utwory kredy górnej o parametrach filtracyjnych znacznie niższych od wyżej leżących utworów silnie spękanych, nie została rozpoznana na obszarze badań, a na modelu przyjęto jej wartość równą 50 m. Przyjęta wartość miąższości najniższej warstwy modelu umożliwia symulację przepływu wód podziemnych w strefie intensywnej wymiany wód,

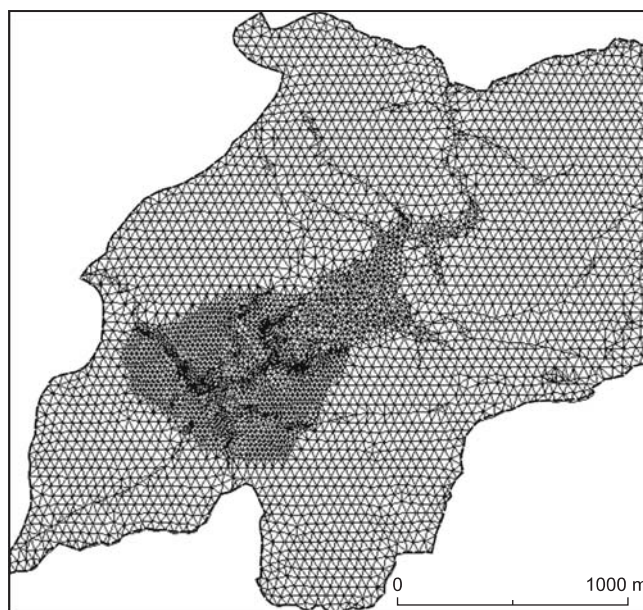


Fig. 5. Siatka dyskretyzacyjna zastosowana na modelu numerycznym

Finite element grid used in the numerical model

a zatem w strefie mającej największe znaczenie dla dynamiki wód podziemnych w konsekwencji budowy budowli piętrzącej. Spąg warstwy III modelu numerycznego stanowi jednocześnie dolną granicę modelu. Dla najniższej warstwy modelu przyjęto zunifikowaną wartość wodoprzewodności wynoszącą $6,5 \text{ m}^2/\text{d}$.

Pierwszy z modeli odwzorowujący aktualne warunki hydrogeologiczne poddano weryfikacji, opierając się na pomiarach wysokości zwierciadła wody, uzyskując wartości zbliżone do rzeczywistych. Na bazie pierwszego modelu wykonano kolejną symulację, odzwierciedlającą warunki powstałe w konsekwencji budowy zapory i maksymalnego spiętrze-

nia wód zbiornika. Uzyskanie warunków zgodnych ze stanem maksymalnego piętrzenia zbiornika retencyjnego symulowano, wprowadzając stałą wartość wysokości zwierciadła wody (warunek brzegowy I rodzaju), równą maksymalnej rzędnej piętrzenia zbiornika ($498,7 \text{ m n.p.m.}$) na obszarze zgodnym z granicami projektowanego zbiornika. Dodatkową modyfikacją było zasymulowanie braku przepływu wód podziemnych ($Q = 0$) w miejscu projektowanej zapory, do głębokości występowania spągu silnie spękanych utworów kredowych. Przyjęcie takiego rozwiązania powinno być zgodne z projektem technicznym zapory, ponieważ wydaje się niezbędne z punktu widzenia stateczności konstrukcji.

PRZEPIY WÓD PODZIEMNYCH

Rzędne położenia zwierciadła wody obliczone na modelu dla warunków odzwierciedlających aktualny stan hydrodynamiczny wykazują bardzo zbliżone wartości dla wszystkich modelowanych warstw, co wynika z braku izolacji pomiędzy tymi warstwami. Uzyskany obraz hydroizohips nawiązuje do morfologii obszaru badań. Kierunki przepływu wód podziemnych odzwierciedlają drenujący charakter

wszystkich cieków powierzchniowych zlokalizowanych na obszarze badań, a główną bazę drenażową stanowi Nysa Kłodzka, do której bezpośrednio lub pośrednio poprzez jej dopływy odprowadzane są wody podziemne występujące w strefie ich aktywnej wymiany. Drenaż wód podziemnych poprzez najwyższą warstwę modelu, odpowiadającą dobrze przepuszczalnym utworom czwartorzędowym oraz zwietrza-

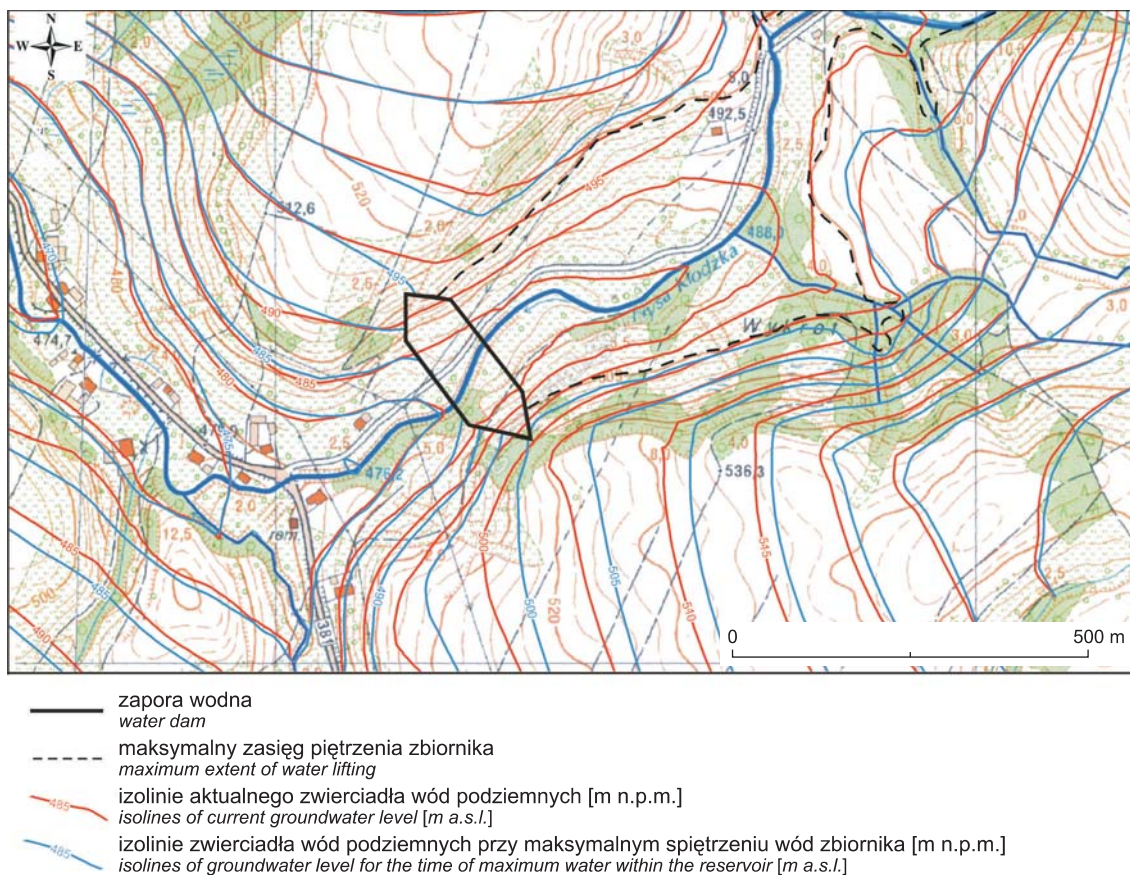


Fig. 6. Mapa położenia zwierciadła wód podziemnych dla stanu aktualnego oraz obliczonego dla maksymalnej wysokości piętrzenia zbiornika

Present-day groundwater level surface and groundwater level simulated for the maximum water-lifting scenario

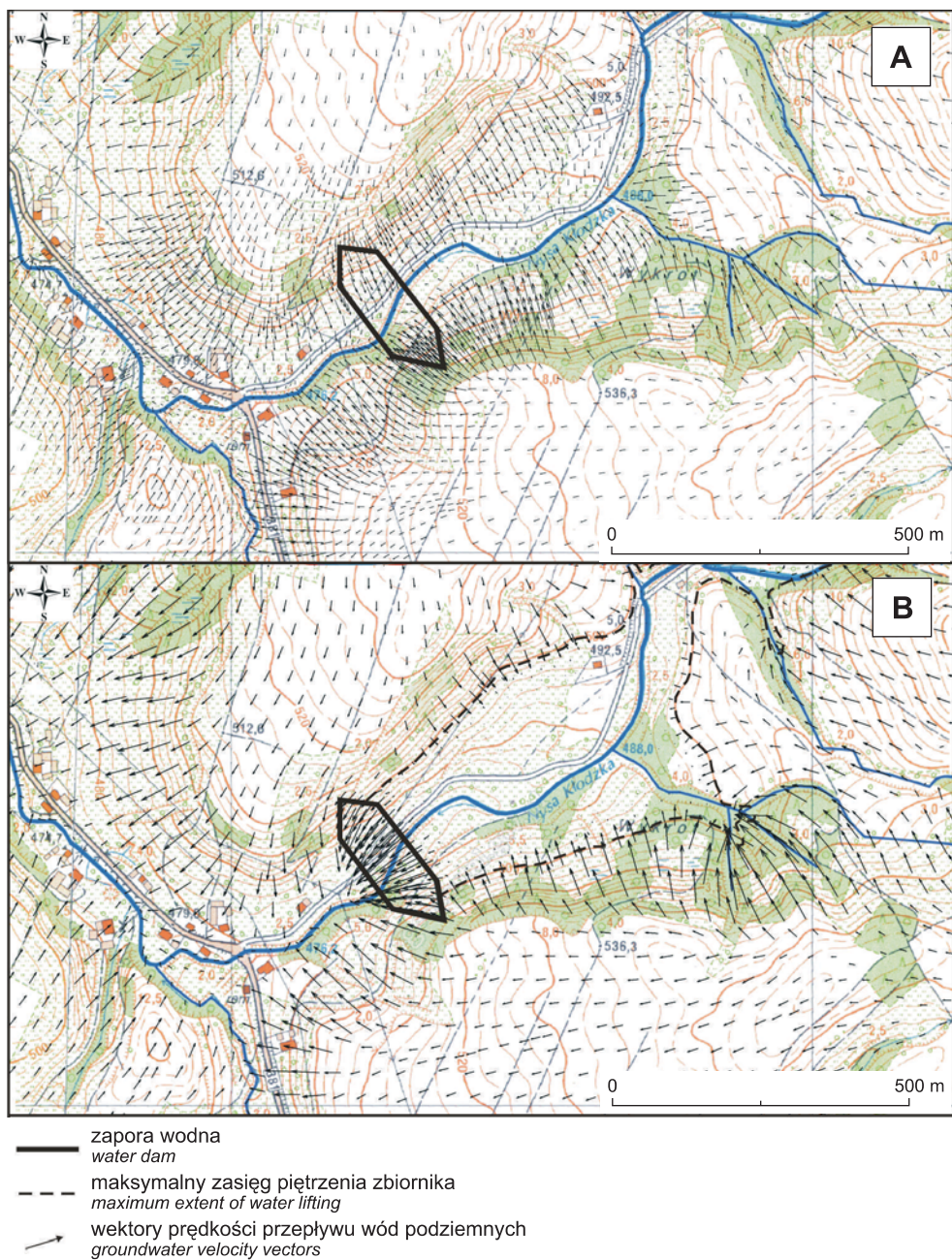


Fig. 7. Mapa przedstawiająca wektory prędkości przepływu wód podziemnych dla spękanych utworów kredy górnej (warstwa III modelu)

A – mapa dla warunków aktualnych, B – mapa dla maksymalnego piętrzenia wód podziemnych

Groundwater velocity vectors in the fractured Upper Cretaceous rocks (layer III of the numerical model)

A – present-day conditions, B – maximum water-lifting scenario

łym piaskowcom kredy górnej, jest częściowo utrudniony z uwagi na jej nieciągłe rozprzestrzenienie, w konsekwencji wody podziemne występujące w tej warstwie w obszarach, na których nie są drenowane przez cieki powierzchniowe lub nie wydostają się na powierzchnię w postaci wysięków, zasilają warstwę silnie spękanych utworów kredowych (II warstwa modelu). Wyżej leżąca warstwa utworów kredowych (II warstwa modelu) wykazuje częściowo warunki naporowe, a wody podziemne, których przepływ odbywa się w warunkach

naporowych, w miejscach, gdzie wyklinowują się utwory słabo przepuszczalne, zasilają wyżej leżącą warstwę dobrze przepuszczalnych utworów czwartorzędowych (I warstwa modelu). Największe prędkości przepływu wód podziemnych, w obrębie wszystkich modelowanych warstw, wykazują zbieżność z obliczonym gradientem hydraulicznym i występują w dolnej części zboczy doliny Nysy Kłodzkiej.

Model odzwierciedlający maksymalny stan piętrzenia zbiornika wykazuje różnice w wysokości położenia zwier-

ciadła wody w stosunku do poprzedniej symulacji. Największe różnice pomiędzy aktualną wysokością położenia zwierciadła wody a zwierciadłem ukształtowanym dla warunków maksymalnego spiętrzenia wód zbiornika wykazują obszary położone na południe od projektowanej zapory, gdzie różnica rzędnej zwierciadła wody wynosi około 2 m (fig. 6). Po północnej stronie zapory różnica wysokości zwierciadła wody dla poszczególnych symulacji wynosi około 1 m. Zmianie w stosunku do warunków aktualnych ulegają również kierunki przepływu wód podziemnych, jednak zmiany te zaznaczają się jedynie na obszarze położonym w bezpośredniej bliskości zapory (fig. 7). W obrębie warstwy II wody podziemne opływają symulowaną zaporę, poniżej której następuje ich drenaż. Podobna sytuacja jest obserwowana dla warstwy III modelu, a dodatkowo w obrębie tej warstwy zaznacza się intensywny drenaż pod zaporą, w kierunku prostopadłym do osi zapory.

Uwidaczniają się również lokalne zmiany w prędkościach przepływu wód podziemnych, zaznaczające się w obrębie każdej z modelowanych warstw. Wektory prędkości przepływu wód podziemnych dla I warstwy modelu ulegają zmniejszeniu o około 50% na obszarze powyżej projektowanej zapory wodnej, natomiast poniżej zapory nie zaznaczają się znaczące różnice prędkości przepływu wód podziemnych w obrębie tej warstwy. W warstwie II i III modelu zaznacza się, podobnie do warstwy I, spadek prędkości przepływu wód podziemnych powyżej symulowanej zapory. Na obszarze znajdującym się poniżej zapory prędkość przepływu wód podziemnych ulega nieznacznemu wzrostowi.

Największą zmianę zarówno kierunków, jak i prędkości przepływu wód podziemnych w stosunku do symulacji odzwierciedlającej aktualne warunki hydrodynamiczne można zaobserwować w obrębie warstwy III modelu, na obszarze znajdującym się bezpośrednio pod zaporą (fig. 7), gdzie prędkość przepływu wód podziemnych wynosi około $3 \cdot 10^{-7}$ m/s i jest o nieco ponad rząd wielkości większa od wartości obliczonej dla aktualnych warunków. Pierwotny kierunek drenażu wód podziemnych w kierunku Nysy Kłodzkiej ulega zmianie o około 90° , a prędkość przepływu wód podziemnych wzrasta prawie trzykrotnie.

Aby prześledzić ilościowo skutki piętrzenia wód powierzchniowych, obliczono na modelu wielkości przepływu wód podziemnych dla poszczególnych warstw, dla dwóch przekrojów o długości około 150 m. Przekroje, dla których przeprowadzono obliczenia, wyznaczono po obu stronach zapory wzdłuż jej osi podłużnej, oba przekroje rozpoczynają się na przeciwległych krańcach zapory. Obliczenia wykazały wzrost przepływu wód podziemnych o około $94,2 \text{ m}^3/\text{d}$ w warstwie I modelu, a w warstwach II i III odpowiednio $13,1 \text{ m}^3/\text{d}$ i $11,2 \text{ m}^3/\text{d}$. Podane wartości przekładają się na wzrost przepływu wód podziemnych w stosunku do warunków aktualnych o 19,8% dla warstwy I, 4,3% dla warstwy II oraz 12,4% dla warstwy III. Dla obszaru znajdującego się bezpośrednio pod projektowaną zaporą wydatek strumienia wód podziemnych wzrośnie o około $31,5 \text{ m}^3/\text{d}$, co stanowi około 19% wydatku obliczonego na modelu pozbawionym występowania zapory.

DYSKUSJA

Budowa suchych zbiorników retencyjnych jest powszechnie wykorzystywanym i skutecznym sposobem redukcji powodziennej fali wezbraniowej na obszarach górskich oraz na ich przedpolu (np. Taufmannová, Jeníček, 2011), jednak pociąga za sobą zmiany hydrodynamiczne, których symulacja jest możliwa dzięki analizie numerycznej.

Maksymalne piętrzenie suchych zbiorników retencyjnych jest zwykle procesem krótkotrwałym. Jednakże w przypadku występowania skał porowatych o bardzo dobrych parametrach filtracyjnych lub skał szczelinowatych warunki te sprzyjają procesowi wzmożonej filtracji wód podziemnych oraz szybkiego przekazywania ciśnień piezometrycznych. Piętrzenie wód zbiornika retencyjnego powoduje jednocześnie wzrost ciśnień porowych bezpośrednio pod budowlą piętrzącą, co zwiększa potencjał erozyjny strumienia filtracyjnego, wymuszając często zastosowanie rozwiązań hydrotechnicznych, których zadaniem jest wydłużenie drogi filtracji i tym samym obniżenie ciśnień porowych bezpośrednio pod zaporą (Attewell, Farmer, 1976). Przeprowadzona symulacja numeryczna dla stanu maksymalnego piętrzenia wód zbiornika zakłada brak filtracji wód podziemnych bezpośrednio pod zaporą, do głębokości około 20 m, w konse-

kwencji zaznacza się znaczący wzrost prędkości przepływu wód podziemnych poniżej tej granicy (wynoszący około rząd wielkości). Badania hydrogeologiczne sugerują, że poniżej tej głębokości występują skały charakteryzujące się niższymi parametrami filtracyjnymi niż zalegające nad nimi silnie spękane utwory kredowe oraz fluwialne utwory czwartorzędowe, a zatem umożliwienie przepływu wód podziemnych powyżej strefy, gdzie utwory kredowe przyjmują niższe wartości współczynnika filtracji, zwiększy siłę erozyjną strumienia filtracyjnego, co mogłoby mieć wpływ na stabilność budowli piętrzącej.

Podniesienie bazy drenażowej poprzez spiętrzenie wód zbiornika powoduje podniesienie wysokości zwierciadła wód podziemnych poniżej zapory. Symulacja numeryczna pozwala oszacować wzrost wysokości zwierciadła wody o około 1–2 m, a w konsekwencji warunki te mogą skutkować powstawaniem wypływów wód podziemnych na powierzchnię na obszarach, gdzie dotychczas tego typu zjawisk nie obserwowano. Wzrost wysokości zwierciadła wód podziemnych powoduje jednocześnie wzrost ciśnień porowych w skałach tworzących zbocza dolin, co może być jedną z przyczyn powstawania osuwisk, szczególnie w przy-

padku, kiedy utwory o niskim stopniu skonsolidowania podścielają utwory słabo przepuszczalne (Semenza, Ghirotti, 2000). Tego typu warunki występują jedynie lokalnie na obszarze badań, gdzie słabo przepuszczalne utwory stanowią warstwę naporową dla wód podziemnych występujących w strefie silnie spękanych utworów kredowych. Niekorzystnym procesem przyczyniającym się do powstawania osuwisk jest również raptowny spadek wysokości zwierciadła wody, prowadzący do zachwiania równowagi warunków hydraulicznych z uwagi na szybsze tempo opadania zwierciadła wód podziemnych niż tempo rozchodzenia się ciśnienia porowego (González de Vallejo, Ferrer, 2011).

Prześledzenie tempa wzniosu wysokości zwierciadła wody, jak i jego opadania możliwe jest jedynie na podstawie symulacji przeprowadzonych dla warunków nieustalonych. Analizy numeryczne opracowywane dla warunków nieustalonych wymagają jednak wykorzystania obszernej bazy danych zawierającej informacje z długiego okresu obserwacyjnego. Z uwagi na brak tego typu danych nieuzasadniona staje się analiza warunków nieustalonych. Pewne kontrowersje może jednak budzić przyjęty model koncepcyjny, zakładający warunki ustalone zgodne z maksymalną rzędną piętrzenia wód zbiornika. Można zakładać, że proces ustalonej

filtracji wód podziemnych zostałby ukształtowany w konsekwencji długoterminowego utrzymywania maksymalnej rzędnej piętrzenia zwierciadła wody w zbiorniku retencyjnym. Należy jednak zwrócić uwagę, że budowa geologiczna obszaru stwarza potencjalne możliwości szybkiego przekazywania ciśnień piezometrycznych poprzez sieć spękań występujących w obrębie utworów kredowych. Dodatkowym elementem, nieuwzględnianym na modelu, jest wzrost wysokości opadów atmosferycznych poprzedzający okres napełniania zbiornika, pociągający za sobą zwiększoną infiltrację wód, co w przypadku kilkudniowych intensywnych opadów może w skrajnych przypadkach doprowadzić do powstawania osuwisk (np. Corominas, Moya, 1999). Uzasadnione jest zatem przyjęcie warunków filtracji ustalonej jako konsekwencji równoczesnego podnoszenia się zwierciadła wód podziemnych w rezultacie intensywnych opadów atmosferycznych oraz stopniowego piętrzenia zbiornika retencyjnego. Ustalone warunki filtracji wód podziemnych, zgodne z przyjętym schematem symulacji hydrogeologicznej, mogą mieć charakter krótkoterminowy, jednakże nie wpływa to na poprawność i zasadność przeprowadzonych symulacji numerycznych.

PODSUMOWANIE

Numeryczna analiza wpływu piętrzenia wód powierzchniowych na dynamikę wód podziemnych na obszarze projektowanego suchego zbiornika retencyjnego Boboszów wykazała istotne zmiany zarówno w kierunkach przepływu, jak i wydatku strumienia wód podziemnych jedynie na obszarze znajdującym się w bezpośredniej bliskości budowli piętrzącej. Najistotniejsze znaczenie pod względem hydrotechnicznym ma wzrost prędkości przepływu wód podziemnych pod zaporą, o około rząd wielkości, obserwowany w obrębie szczelinowatych skał kredowych, których strop występuje

na głębokości około 20 m. Prędkości przepływu wód podziemnych w obrębie szczelinowatych skał kredowych wyniosą około $3 \cdot 10^{-7}$ m/s.

Podniesienie wysokości bazy drenażowej w konsekwencji piętrzenia zbiornika retencyjnego spowoduje wzrost rzędnej zwierciadła wód podziemnych o około 1–2 m poniżej budowli piętrzącej, co przy jednoczesnym zwiększeniu wydatku strumienia wód podziemnych stwarza niebezpieczeństwo powstawania osuwisk na zboczach doliny Nysy Kłodzkiej.

LITERATURA

- ATTEWELL P.B., FARMER I.N., 1976 — Principles of engineering geology. Chapman and Hall, London.
- COROMINAS J., MOYA J., 1999 — Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat river basin, Eastern Pyrenees, Spain. *Geomorphology*, **30**, 79–93.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO L.I., FERRER M., 2011 — Geological engineering. CRC Press, Taylor & Francis Group, London.
- GRZEGORCZYK K., KRAWCZYK J., NOWAK A., DĄBROWSKI S., WIJURA A., FISTEK J., 1994 — Dokumentacja hydrogeologiczna zasobów wód podziemnych w kat. C rejonu rowu Nysy Kłodzkiej i niecki Batorowa. Arch. Przeds. Geol., Wrocław.
- IVERSON R.M., MAJOR J.J., 1987 — Rainfall, ground-water flow, and seasonal movement at Minor Creek landslide, northwestern California: Physical interpretation of empirical relations. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **99**, 4: 579–594.
- KASZTELAN D., PRZYBYŁEK J., 2004 — Badania modelowe wpływu zbiornika retencyjnego Jeziorsko na wody podziemne doliny Teleszyny. W: Modelowanie przepływu wód podziemnych (red. J. Gurwin, S. Staško). *Acta Univ. Wratisl. Hydrogeol.*, **2729**: 81–92.
- ROELOFFS E.A., 1994 — An updated numerical simulation of the ground-water flow system for the Castle Lake debris dam, Mount St. Helens, Washington, and implications for dam stability against heave. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 94-4075.
- SAWICKI L., 1962 — Szczegółowa Mapa Geologiczna Sudetów w skali 1:25 000, ark. Międzylesie. Wyd. Geol., Warszawa.

- SEMENZA E., GHIROTTI M., 2000 — History of the 1963 Vaiont slide; the importance of geological factors. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, **59**: 87–97.
- SNOW D.T., 1972 — Geodynamics of seismic reservoirs. Proceedings symposium on percolation through fissured rocks: 1–19. Deutsche Gesellschaft Erd-Grubbau Stuttgart, T2-J.
- SZALIŃSKA W., URBAN G., OTOPIŃSKI I., 2008 — Próba oszacowania wysokości opadów wywołujących wezbrania letnie w dorzeczu środkowej Odry. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, **9**: 227–238.
- TAUFMANNOVÁ A., JENÍČEK M., 2011 — Impact of polder system on flooding in the Rolava River basin. *Geografie*, **116**, 2: 130–143.
- Van EVERDINGEN R.O., 1972 — Observed changes in groundwater regime caused by the creation of Lake Diefenbaker, Saskatchewan. *Canadian Department of the Environment, Inland Waters Branch Technical Bulletin*, **59**.

SUMMARY

Attenuation reservoirs are one of the most effective parts of integrated flood protection systems as they are temporarily able to reduce the outflow peak from a mountainous catchment. Water lifting within reservoirs produces a relatively high hydrostatic pressure, and if the reservoir bed is not isolated by low-permeable sediments, the pressure is easily and rapidly transmitted to aquifers. In consequence, alternations of groundwater flow velocities and fluxes can occur in the vicinity of a dam. Additionally, water dam building locally hampers groundwater drainage, so the discharge area is partly reduced.

In the project stage of reservoirs, it is crucial to make predictions regarding the response of the groundwater system due to an increase in hydrostatic pressure since it can produce new springs (e.g. Snow, 1972) and can influence slope stability (Iverson, Major, 1987).

The aim of this study is a numerical simulation of groundwater response due to water lifting in the projected attenuation reservoir located in the Nysa Kłodzka River catchment – southern Poland, in the area of fissured Cretaceous rocks.

Geology of the study area is mainly represented by fissured Cretaceous sandstones and marlstones, up to 700 m thick. These sediments are characterised by different hydraulic properties in the upper part – about 17 m thick, and below this zone. Average hydraulic conductivities of Cretaceous rocks estimated based on 11 slug tests are $1.5 \cdot 10^{-5}$ m/s (in the upper part) and $1.5 \cdot 10^{-5}$ m/s (in the lower part). The uppermost geological layer, observed mainly in the outcrops, is represented by strongly weathered Cretaceous rocks. In the lower parts of the valley slopes, clay diluvium

occurs. The valley bed along the Nysa Kłodzka River is composed of about 3-m thick well-permeable fluvial deposits with hydraulic conductivity ranging from $2.9 \cdot 10^{-4}$ to $1.5 \cdot 10^{-3}$ m/s. Numerical simulation of groundwater flow was designed by using MicroFEM finite element code which is the best method in terms of mimicking the geometry of geological units. Hydrogeology of the study area was generalised to three layers with different transmissivity values derived from available hydrogeological and lithological data.

Results of the numerical simulation show an increase of groundwater level by ca. 1–2 m in the area below the water dam for the time of maximum water lifting (Fig. 6). Modification of hydrogeological conditions due to water impoundments results in an increase of groundwater velocities by about one order of magnitude to about $3 \cdot 10^{-7}$ m/s under the dam. The increase in groundwater fluxes estimated for 150-m long sections located on both sides of the dam are about 94.2 m³/d for model layer I, and 13.1 m³/d and 11.2 m³/d for layers II and III, respectively. The increase of groundwater flux below the dam is estimated to be about 31.5 m³/d and is about 19% higher than currently in this area.

The results of the groundwater modelling shows a significant change in groundwater flow velocities and fluxes observed in the vicinity of the projected dam and below it. The increase of groundwater level connected with groundwater fluxes higher than currently observed can likely produce landslides of unconsolidated sediments below the dam. The crucial thing that should be taken into consideration during the dam projecting process is the significant increase in groundwater flow velocity under the dam.