

ZAGROŻENIE WÓD PODZIEMNYCH W OCENIE ODDZIAŁYWANIA NA ŚRODOWISKO PLANOWANEJ RENATURALIZACJI ZBIORNIKA RETENCYJNEGO TURAWA

GROUNDWATER HAZARD REGARDING ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF RENATURALISATION OF THE TURAWA RESERVOIR

JACEK GURWIN¹

Abstrakt. Opracowane studium wykonalności wraz z oceną oddziaływania na środowisko dotyczące renaturalizacji zbiornika retencyjnego Turawa, zostało wykonane na podstawie multidyscyplinarnego projektu badawczego stanu ekologicznego zbiornika z lat 2003–2004, w ramach którego prowadzono kilkuletnie obserwacje w sieci monitoringu wód podziemnych. Były one podstawą do przeprowadzenia analizy uwarunkowań środowiskowych i zagrożenia w zakresie wód podziemnych. W artykule przedstawiono krótką charakterystykę koncepcji rekultywacji zbiornika i związanych z tym zagrożeń, w celu wskazania znaczenia monitoringu hydrogeologicznego w trakcie i po zakończeniu prac związanych z renaturalizacją.

Słowa kluczowe: zagrożenie wód podziemnych, zanieczyszczenia, renaturalizacja zbiorników retencyjnych, zbiornik Turawa.

Abstract. A complex feasibility study including an environmental impact assessment of renaturalisation concept was made on the basis of the multidisciplinary research project for assessing ecological conditions of the Turawa reservoir that was completed in 2003/2004. An important aspect of investigations was to develop a groundwater monitoring network in the vicinity of the lake which gives opportunity to analyse environmental conditions with respect to groundwater hazard and protection. The concept of recultivation is briefly presented and the role and significance of continuing hydrogeological monitoring during and after technical works and treatments are emphasized.

Key words: groundwater hazard, contamination, renaturalisation of storage reservoirs, Turawa reservoir.

WSTĘP

Badania związane ze stanem środowiska w rejonie zbiornika retencyjnego Turawa (Jeziora Turawskiego) są prowadzone od lat 80. XX w., gdy w ramach kampanii badawczej przeprowadzonej przez Instytut Nauk Geologicznych Uniwersytetu Wrocławskiego dokonano pierwszej oceny procesów sedymentacyjnych, hydrogeologicznych i hydrogeochemicznych (Teisseyre i in., 1981, 1984). Wieloletnie doświadczenia spowodowały, że zbiornik ten został wybrany do projektu pilotażowego, który posłużył wypracowaniu stan-

dardowej metodologii pomiarowo-badawczej w zakresie oceny stanu ekologicznego i metod renaturyzacji zbiorników retencyjnych.

Na podstawie obszernych prac badawczych, wykonanych przez konsorcjum dziesięciu zespołów (koordynowanych również przez ING UWroc.), w ramach projektu „Ocena stanu ekologicznego Jeziora Turawskiego w celu opracowania działań na rzecz jego poprawy” (Gurwin i in., 2004a, b, 2005c) stwierdzono, że głównym źródłem substan-

¹ Instytut Nauk Geologicznych, Uniwersytet Wrocławski, pl. M. Borna 9, 50-205 Wrocław; e-mail: jacek.gurwin@ing.uni.wroc.pl

cji odżywczych odpowiedzialnych za eutrofizację (zakwity sinicowe) są osady dennie. Kolejnym poważnym problemem związanym z Jeziorem Turawskim jest zanieczyszczenie osadów metalami ciężkimi (w tym zwłaszcza kadmem).

Koncepcja renaturalizacji zbiornika Turawa została wstępnie opracowana w ramach wyżej wymienionego projektu badawczego (Gurwin i in., 2004a; Skowronek i in., 2004), a następnie uszczegółowiona i przedstawiona w publikacjach (Skowronek i in., 2005; Gurwin, Skowronek, 2006). Jednak był to wciąż etap propozycji zastosowania optymalnych technik remediacyjnych, bez dokładnych analiz środowiskowych, technicznych i finansowych. Dlatego w latach 2008–2009 z inicjatywą RZGW we Wrocławiu

wyłonione zostało konsorcjum firm, które podjęło się realizacji studium wykonalności przedsięwzięcia wraz z oceną oddziaływania na środowisko. Na podstawie wykonanych wcześniej prac i zgromadzonych dodatkowych materiałów, zebrany w konsorcjum zespół specjalistów różnych branż opracował ostateczny, kompleksowy projekt zabiegów renaturalizacji zbiornika (Studium ..., 2009).

Jednym z elementów składowych studium była analiza uwarunkowań środowiskowych w zakresie wód podziemnych, która została oparta na prowadzonych przez kilka lat obserwacjach w zbudowanej sieci monitoringu środowiska wodnego w rejonie zbiornika (Gurwin i in., 2005b; Gurwin, 2006).

ZARYS WARUNKÓW ŚRODOWISKOWYCH OTOCZENIA ZBIORNIKA TURAWA

Zbiornik retencyjny Turawa jest obiektem I klasy technicznej, który powstał przez wybudowanie zapory ziemnej w dolinie rzeki Mała Panew na 18 km +900 m jej biegu. Zbiornik jest położony w województwie opolskim, na terenie gmin: Turawa i Ozimek (fig. 1). Zajmuje on powierzchnię 20,67 km². Jego długość wynosi 7,0 km, a szerokość 34 km. Maksymalna pojemność retencji wynosi 106 mln m³, ze średnią głębokością w granicach 4–5 m dla maksymalnego spiętrzenia. Zbiornik rozciąga się w kierunku wschód–zachód. Został oddany do użytku w 1938 r. Jest bardzo ważnym obiektem hydrotechnicznym ze względu na pełnione funkcje: (1) ochrony przeciwpowodziowej, (2) energetyczne – elektrownia wodna w zaporze, a także zasilanie w wodę Elektrowni Opole, (3) alimentację Odry dla potrzeb żeglugi i (4) rekreacyjne. Zgodnie z Dyrektywą Ptasią, cały zbiornik turawski został włączony do obszaru NATURA 2000 OSO Jezioro Turawskie PLB 160004.

Przypowierzchniowy poziom wodonośny w rejonie zbiornika turawskiego jest związany z występowaniem plejstoceńskich i holocenijskich osadów piaszczysto-żwirowych, leżących na płatach glin lodowcowych. Ze względu na niewielką miąższość tego poziomu wodonośnego (maksymalnie kilka metrów), zanieczyszczenie wód oraz niewielkie zasoby, nie jest on istotny jako zbiornik użytkowy. Zwierciadło wody jest zwykle swobodne, położone na głębokości 2–3 m p.p.t. Poziom przypowierzchniowy jest drenowany w dolinach rzek, a w obszarach alimentacyjnych zasila on głębsze poziomy wodonośne. Główny, użytkowy poziom wodonośny występuje w czwartorzędowych utworach piaszczysto-żwirowych pochodzenia rzeczno- i wodnolodowcowego, tworząc zasobne zbiorniki wód podziemnych, głównie w dolinach rzecznych. Poziom ten występuje na głębokości od kilku do 60 m. Miąższość warstwy wodonośnej waha się od 5 do 60 m, a wydajności studni od 2 do 120 m³/h.

Poziomy wodonośny w osadach rzecznych rozdziela seria osadów pylasto-piaszczystych, utworzonych w czasie interglacjalu eemskiego, a dobra więź hydrauliczna wynika z dość wysokiej przepuszczalności tych utworów. Serie wo-

donośnych osadów rozwinięte są najlepiej w dolinie kopalnej Małej Panwi, na południowy zachód od zbiornika. W rejonie dużego ujęcia wody Zawada, ujmowane warstwy mają miąższość 1520 m. Znaczna część osadów wodonośnych reprezentowana jest przez dobrze przepuszczalne żwiry i piaszki, o współczynnikach filtracji od 6 do ponad 100 m/d. Współczynniki wodoprzewodności wynoszą kilkadziesiąt m²/h, a wydajności studni często przekraczają 100 m³/h.

Wody podziemne wokół Jeziora Turawskiego charakteryzują się niską, jak na czwartorzędowe struktury, mineralizacją. Wynosi ona od 50 do 500 mg/dm³. Rozpoznanie chemizmu wód podziemnych wskazuje, że są to najczęściej wody typu HCO₃–SO₄–Ca(Mg), a stężenia poszczególnych elementów składu chemicznego mieszczą się w dość szerokich przedziałach (Gurwin i in., 2005a).

Oprócz poziomów wodonośnych w utworach czwartorzędowych, główne zbiorniki wód podziemnych występują w utworach triasu: pstrego piaskowca dolnego i środkowego, retu oraz wapienia muszlowego. Bardziej szczegółowy opis warunków środowiskowych i hydrogeologicznych w rejonie zbiornika przedstawiono we wcześniejszych publikacjach (Gurwin i in., 2005a, b; Kryza i in., 2005).

W obrębie zlewni Małej Panwi i w rejonie samego Zbiornika Turawa, do celów komunalnych i przemysłowych wykorzystywane są głównie wody z utworów czwartorzędowych i triasowych. Największym ujęciem w otoczeniu zbiornika jest ujęcie dla miasta Opola w Zawadzie, gdzie z poziomu czwartorzędowego eksploatowanych jest około 12 000 m³/d wody. Inne ujęcia wodociągowe znajdują się bliżej zbiornika w Ozimku, Turawie, Szczedrzyku, Biestrzynniku, Kadłubie Turawskim, Niwkach i Mnichusie. Własne ujęcia ma też część ośrodków wypoczynkowych.

Na podstawie symulacji modelowych (Gurwin i in., 2004a), wielkość ascenzyjnego przesączania z głębszego poziomu wodonośnego do płytszego w strefach drenażu oszacowano na 8078 m³/d, co jest, przede wszystkim, efektem zmiany gradientów hydraulicznych w dolinie Małej Panwi i w samym zbiorniku. Moduł zasilania systemu, związany

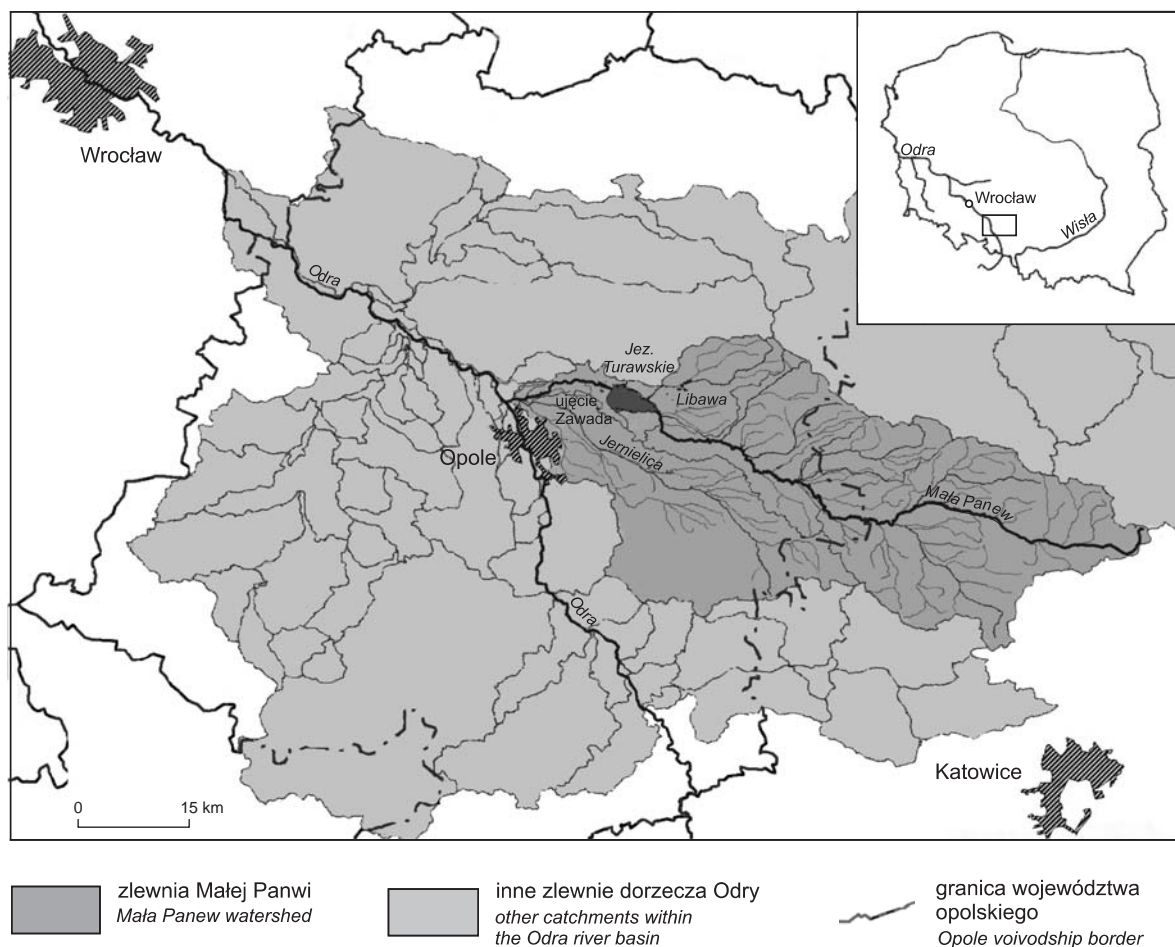


Fig. 1. Lokalizacja zlewni Małej Panwi i zbiornika retencyjnego Turawa

Location of the Mała Panew watershed and the Turawa reservoir

z infiltracją efektywną, określono w badaniach modelowych na $3,0 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2$. Stosunkowo niska wartość wynika z faktu, że większa część obszaru leży w regionalnej strefie drenażu o wysokiej ewapotranspiracji, związanej z doliną Małej Panwi, a także Odry. Odnawialność zasobów dolnego użytkowego poziomu wodonośnego zależy od przesączania z po-

ziomu przypowierzchniowego, dając wartość modułu równą $1,21 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2$.

Bilans wód podziemnych, jako wynik symulacji na modelu numerycznym wykazał, że sumaryczny bezpośredni dopływ do zbiornika turawskiego wynosi $2752 \text{ m}^3/\text{d}$, przy normalnym poziomie piętrzenia w zbiorniku (*op. cit.*).

OCENA DYNAMIKI WÓD PODZIEMNYCH W OTOCZENIU ZBIORNIKA NA PODSTAWIE BADAŃ MONITORINGOWYCH

W wyniku spiętrzenia wód powierzchniowych w zbiorniku nastąpiło znaczne przekształcenie pola hydrodynamicznego w jego otoczeniu. Zmieniły się naturalne kierunki filtracji wód podziemnych, a wahania spiętrzonych wód w zbiorniku warunkują rozkład gradientów hydraulicznych. Kontakt hy-

drauliczny z wodami powierzchniowymi stwarza konieczność stałej kontroli wód podziemnych, pod względem ilościowym i jakościowym. Cel taki osiągnięto, budując sieć monitoringu w ramach projektu badawczego w latach 2003–2004 (Gurwin i in., 2004a).

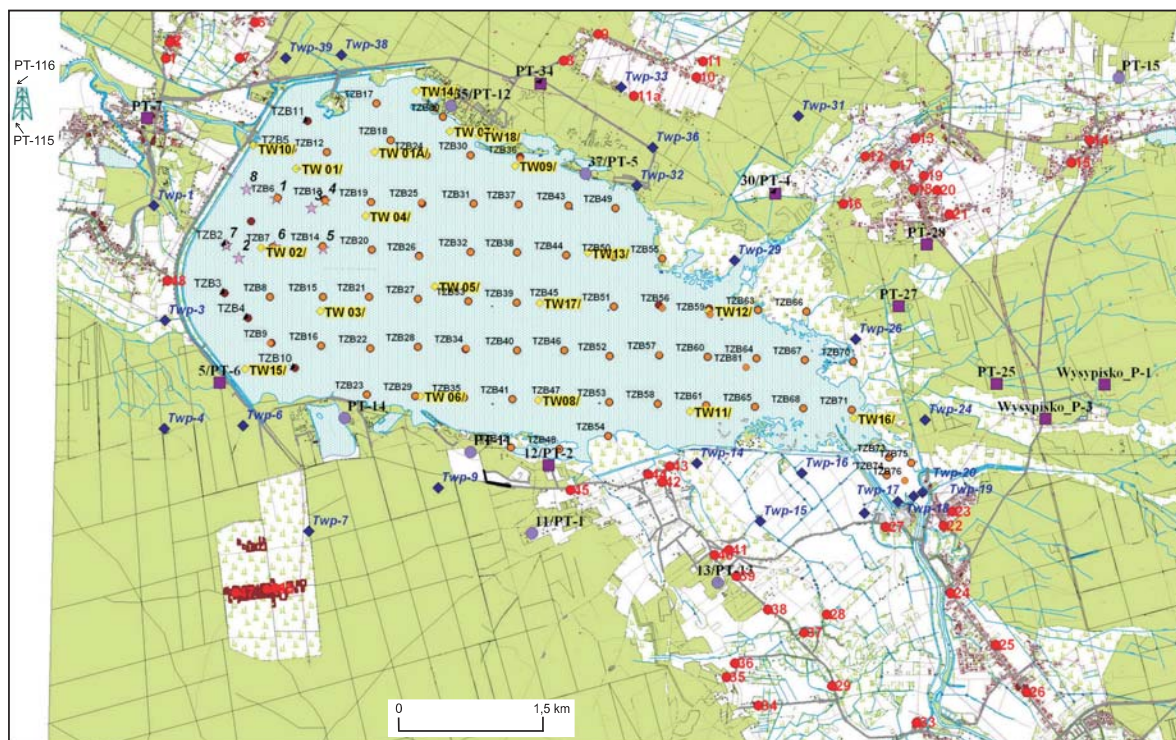
Obserwacjami monitoringu objęto czwartorzędowe poziomy wodonośne formujące dopływ wód podziemnych do zbiornika. Głębszy z nich jest eksploatowany ujęciami i narażony na obniżenie jakości bezpośrednim wpływem zanieczyszczonych wód powierzchniowych.

Badania wód podziemnych prowadzono w sieci punktów, w skład których weszły specjalnie wykonane otwory badawcze w obrębie czaszy zbiornika i na obszarze otaczającym, piezometry, istniejące otwory hydrogeologiczne (studnie ujęciowe i piezometry) oraz kopane studnie gospodarcze (fig. 2).

Podstawowymi punktami obserwacyjnymi sieci są piezometry, które wraz z pozostałymi zapewniły równomierne rozłożenie punktów badawczych wokół zbiornika. Po za-

kończeniu projektu, wybrane piezometry pozostawiono do kilkuletnich obserwacji dynamiki wód podziemnych.

W ramach prac badawczych z lat 2003–2004 przeprowadzono, z częstotliwością co dwa tygodnie, 40 serii pomiarów zwierciadła wód podziemnych – pierwszego od powierzchni terenu poziomu wodonośnego (Gurwin i in., 2004a, Grześkiewicz, 2005), pozostającego w więzi hydraulicznej z wodami powierzchniowymi zbiornika. Oprócz sieci piezometrów, pomiarami objęto ponad 50 studni gospodarczych oraz 2 piezometry lokalnej sieci monitoringu dla składowiska odpadów w Dylakach. Serie pomiarów, wykonane przy różnych stanach napełnienia zbiornika, były podstawą do zestawienia hydrogeologicznych map hydroizohips (fig. 3), prezentujących



♦ punkt oprobowania jakości wód zbiornika Turawa
sampling point of water quality of the Turawa reservoir

■ piezometr
piezometer

● punkt sieci monitoringu hydrogeologicznego
point of hydrogeological monitoring network

◆ badawczy otwór hydrogeologiczny, zlikwidowany
investigation borehole, closed

● studnia kopana, punkt obserwacji stacjonarnych
zwierciadła wód podziemnych
dug well (stationary observation of groundwater table)

■ odwiert/sonda w dnie zbiornika (punkt oprobowania
osadów dennych) projektowany/wykonany
borehole/drilled probe in the lake bottom projected/made

★ punkt oprobowania rdzeni na izotopy promieniotwórcze
core sampling point for radioactive isotopes detection

⚙️ stacja meteo-hydrogeologiczna ADAS w Kotorzu
ADAS meteo-hydrogeological station in Kotorz

Fig. 2. Sieć monitoringu wód podziemnych i inne punkty badawcze w rejonie zbiornika retencyjnego Turawa

Groundwater monitoring network and other points of investigation in the Turawa reservoir neighborhood

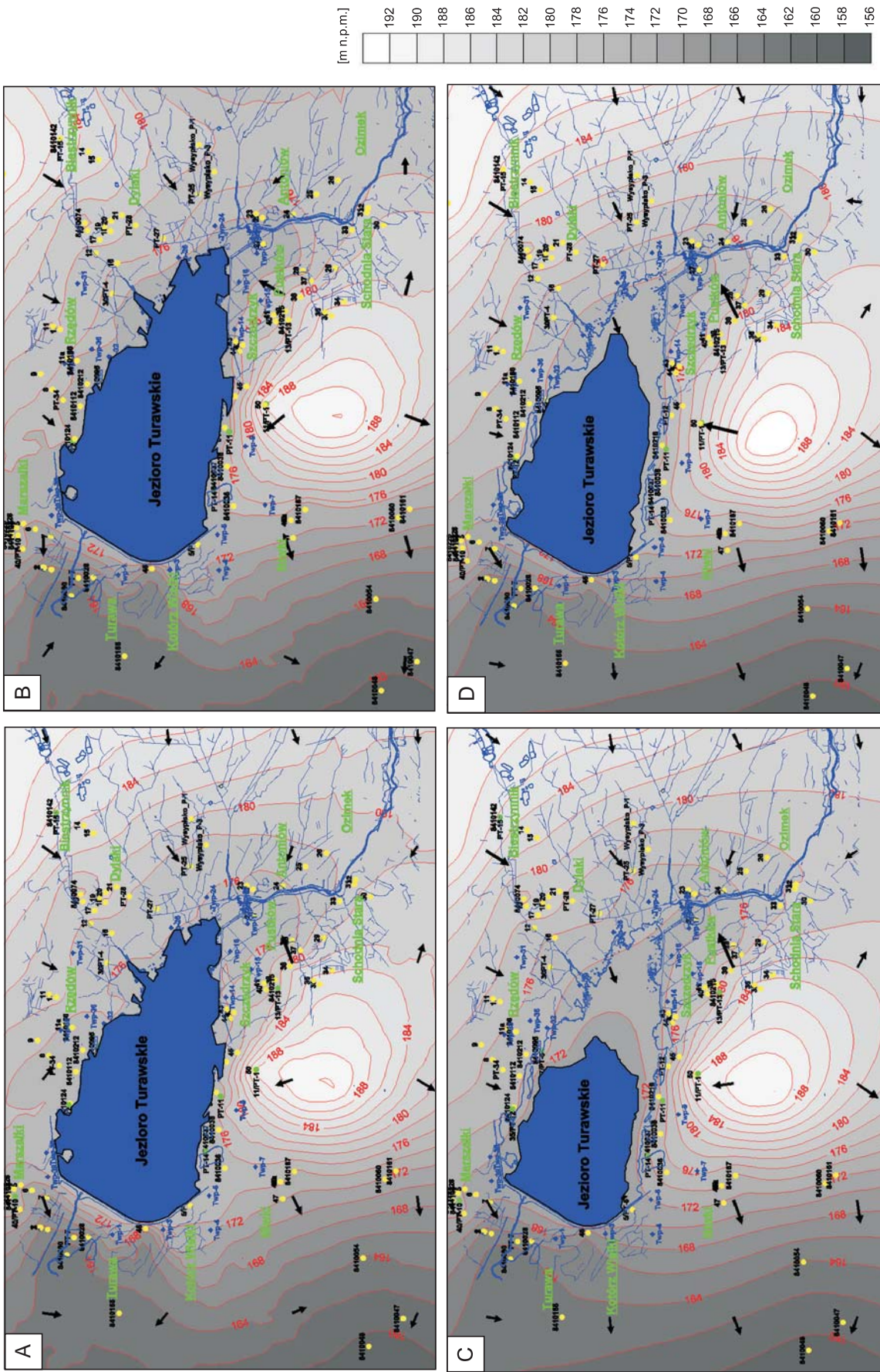


Fig. 3. Układ zwierciadła wód podziemnych przy różnych stanach napełnienia zbiornika

A – maj 2004 r.; B – lipiec 2004 r.; C – październik 2004 r.; D – listopad 2004 r.

Head contour map in different surface water level conditions

A – May 2004; B – July 2004; C – October 2004; D – November 2004

kontakt wód podziemnych z wodami powierzchniowymi zbiornika.

Zwierciadło wód podziemnych zmierzone przy wysokim stanie napełnienia zbiornika, na poziomie 174–175 m n.p.m. (fig. 3), wskazuje na drenujący charakter całej doliny rzecznej w górnej części zbiornika. Rozpoznanie warunków hydrodynamicznych dla różnych okresów czasu potwierdziło, że w każdym przypadku we wschodniej części zbiornika dochodzi do ascenzji wód podziemnych i drenażu, natomiast w zachodniej części zbiornika, w strefie zapory czołowej, re-

jestruje się proces odwrotny – wody ze zbiornika przesączają się przez osady denne, zasilając wody podziemne na przedpolu zapory. Strefa ta ma około 4 500 m długości i wywołuje wzrost poziomu wód o 1,5–2,0 m. Charakterystyczne są efekty ucieczki wód ze zbiornika na przyczółkach zapory głównej. Spadki hydrauliczne są dość równomierne, w zakresie od 0,001 do 0,008. Układ taki ma decydujące znaczenie w ocenie potencjalnego zagrożenia środowiska wód podziemnych w trakcie realizacji i po zakończeniu planowanego procesu rekultywacji zbiornika.

OBSERWACJE WAHAŃ ZWIERCIADŁA WÓD PODZIEMNYCH

Wyniki automatycznych pomiarów zwierciadła wód podziemnych w piezometrach wokół zbiornika przedstawiono na tle zarejestrowanych w stacji ADAS opadów oraz zestawiono je z wykresem stanów wody w zbiorniku (fig. 4). W przypadku płytkich piezometrów zlokalizowanych w przypowierzchniowym poziomie wodonośnym (PT-115 i PT-116 oraz 30/PT-4, PT/34 i 12/PT-2) widać wyraźną natychmiastową reakcję na zasilanie z opadów. Amplitudy wahań osiągają 20–40 cm. Znacznie mniej widoczny jest wpływ infiltracji opadów w piezometrach ujmujących głębszy poziom wodonośny (PT/34 i 5/PT-6). Linie wykresów są obłe, a amplitu-

dy wahań niewielkie, rzędu kilku-, kilkunastu centymetrów.

Interesujących wyników, dotyczących reakcji pola hydrodynamicznego na przesączanie z czaszy zbiornika poniżej zapory, dostarczyły badania w podwójnym piezometrze 5/PT-6. Ujmuje on jednocześnie płytszy i głębszy poziom wodonośny. Dotychczasowe obserwacje z lat 2003–2007 potwierdzają wpływ zbiornika na wody podziemne na przedpolu zapory. Zwraca uwagę fakt, że wyraźna korelacja jest widoczna pomiędzy wahaniami wód w zbiorniku a głębszym poziomem wodonośnym. Reakcja w poziomie przypowierzchniowym jest natomiast mocno uzależniona od infiltracji opadów,

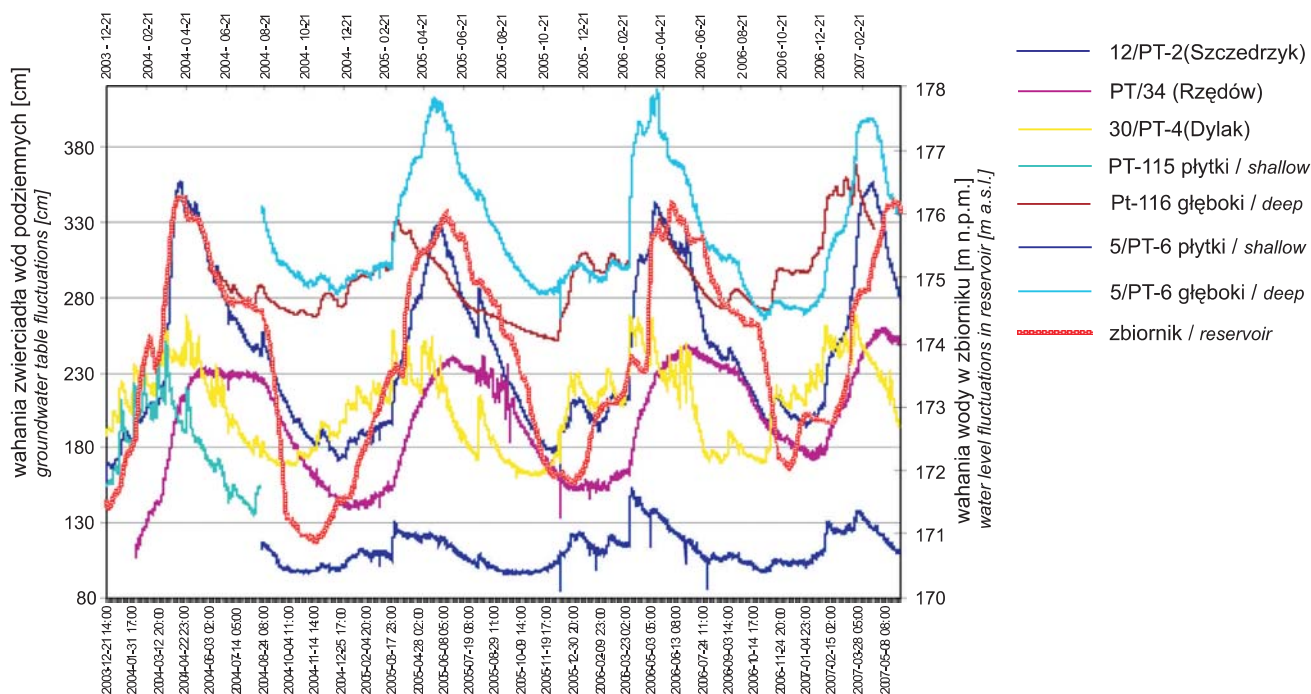


Fig. 4. Wahania zwierciadła wód podziemnych w piezometrach w otoczeniu zbiornika w zestawieniu ze stanami wód zbiornika w latach 2003–2007

Groundwater level fluctuations in piezometers surrounding the reservoir in comparison with surface water levels in 2003–2007

a przebieg wykresu jest zasadniczo niezależny od stanów w zbiorniku. Po gwałtownym wzroście, rzędu 20–30 cm, w okresie roztopów w marcu do listopada następuje opadanie zwierciadła wody, z lekkimi przyrostami w okresie intensywniejszych opadów.

Ważne jest również porównanie wahań zwierciadła wód podziemnych ze stanami wody w zbiorniku (fig. 4). Punkty pomiarowe na założonej stacji hydrogeologicznej ADAS w Kotorzu (PT-115 i PT-116) (fig. 2), zgodnie z oczekiwaniami, pozostają poza wpływem oddziaływania zbiornika. Rolą tych punktów pomiarowych było bowiem rejestrowanie stanów naturalnych. Przebieg krzywej dla punktu 12/PT-2, położonego najbliżej zbiornika na brzegu południowym, wskazuje bardzo wyraźne wznoszenie, w okresach od stycznia do kwietnia, zdecydowanie związane z podnoszeniem się wody w zbiorniku, przy czym różnice maksymalnej wysokości są w kolejnych latach rzędu 20 cm. Największy wzrost słupa wody, w granicach 1,5 m, zanotowano na wiosnę 2004 r. Od przełomu kwietnia

i maja następuje opadanie zwierciadła wód podziemnych aż do grudnia, korygowane lekkimi wzrostami na skutek infiltracji opadów. Dla lat 2004 i 2007 maksimum piętrzenia przypadło na połowę kwietnia, co należy wiązać z intensywniejszym dopływem wód roztopowych, natomiast w 2005 i 2006 r. dopiero w maju, ale wówczas były to niższe stany.

W odróżnieniu od punktu 12/PT-2, zupełnie inną reakcję na stany wody w zbiorniku wykazuje punkt obserwacyjny PT/34, zlokalizowany w pobliżu Rzędowa, na północnym brzegu zbiornika. Położony jest on jednak w znacznie większej odległości od zbiornika, ze zwierciadłem wód podziemnych na głębokości ponad 13 metrów. Dla analogicznych okresów czasu krzywa wzrostu jest zdecydowanie łagodniejsza, a po osiągnięciu maksymalnej wysokości słupa wody, rzędu 230–250 cm, podlega łagodnemu opadaniu z nieznacznym wpływem opadów. W cyklu wieloletnim (fig. 4) ogólne trendy sezonowych zmienności zwierciadła wód podziemnych powtarzają się.

MONITORING WÓD PODZIEMNYCH W ŚWIETLE KONCEPCJI RENATURALIZACJI I OCENY ODDZIAŁYWANIA NA ŚRODOWISKO

Wpływ realizowanej inwestycji (renaturalizacji zbiornika Turawa) na wody podziemne powinno się rozpatrywać pod względem ilościowym i jakościowym. Wpływ ilościowy należy rozumieć jako oddziaływanie na zasobność warstw wodonośnych, ponieważ na przykład w wyniku prowadzonych prac ziemnych (wykonanie wkopów i systemów czasowego odwodnienia) nastąpi obniżenie poziomu zwierciadła wód podziemnych, natomiast podczas piętrzenia wód powierzchniowych możliwe jest zwiększenie zasobności warstw wodonośnych.

Mogą także wystąpić zmiany wielkości zasilania wód podziemnych w obszarach prowadzonych prac ziemnych. Będzie to efektem zmiany struktury przypowierzchniowej warstwy skał, a zatem i wielkości infiltracji efektywnej. W większości będą to zmiany powodujące wzrost zasilania. Aspektem negatywnym może być jednak osłabienie izolującej roli warstwy przypowierzchniowej skał, a więc zwiększenie podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie.

Wpływ jakościowy realizowanej inwestycji na wody podziemne będzie obejmował wszystkie działania powodujące ingerencję w skład fizykochemiczny wód podziemnych. Na etapie realizacji inwestycji zanieczyszczenie wód podziemnych może wynikać z:

- infiltracji płynnych substancji do warstwy wodonośnej, szczególnie w miejscach charakteryzujących się wysoką przepuszczalnością utworów przypowierzchniowych oraz w obszarach prowadzonych prac ziemnych;

- infiltracji zanieczyszczeń z wodami opadowymi – powierzchniowo ograniczone do zasięgu prac, ale intensywność może być wysoka z uwagi na przepuszczalne podłoże i płaskie naturalne dno doliny rzecznej i zbiornika;

- infiltracji zanieczyszczonych wód powierzchniowych – może się odbywać na większym obszarze, i w tym przypadku dotyczy głównie dolnej części zbiornika i obszaru na jego przedpolu.

Jak wykazały szczegółowe badania osadów dennych (Gurwin i in., 2004a; Ciemniak i in., 2005; Gurwin, Skowronek, 2006; Simeonov i in., 2007), składniki powodujące kontaminację to: fosfor, kadm, arsen, ołów, cynk oraz WWA. W największym stopniu (kilkudziesięciokrotnie) są przekroczone dopuszczalne stężenia kadmu, a stężenia pozostałych metali i WWA przekraczały wartości graniczne od 1,3- (BaA) do 7,6-krotnie (Zn). Osady cechuje wysoka zawartość materii organicznej oraz niewielka gęstość. Zanieczyszczenia z osadów trafiają na utwory rzeczne o dobrej i bardzo dobrej przepuszczalności, a tym samym wysokiej podatności na skażenie płytko występującego przypowierzchniowego poziomu wodonośnego.

Wyniki dwóch serii opróbowania wód podziemnych, z bezpośrednimi pomiarami w terenie niektórych parametrów (temperatura, pH, PEW, Eh, tlen) w latach 2003–2004, pozwoliły na szczegółową charakterystykę składu fizykochemicznego wód czwartorzędowego poziomu wodonośnego (Gurwin i in., 2005b; Kryza i in., 2005). Analiza przestrzennej zawartości fosforu ogólnego w wodach pod dnem zbiornika wykazała anomalne wartości osiągające ponad 30 i 40 mg/dm³, gdy tymczasem na obrzeżach zbiornika stężenia fosforu są mniejsze od 10 mg/dm³, a na wysoczyznach mniejsze od 0,1 mg/dm³.

Wśród metali ciężkich, największe znaczenie ma rozkład kadmu. Zdecydowanie podwyższone stężenia, dochodzące nawet do 0,8 mg/dm³ występują w wodach podziemnych pod czaszą zbiornika. Wody podziemne znajdujące się pod dnem

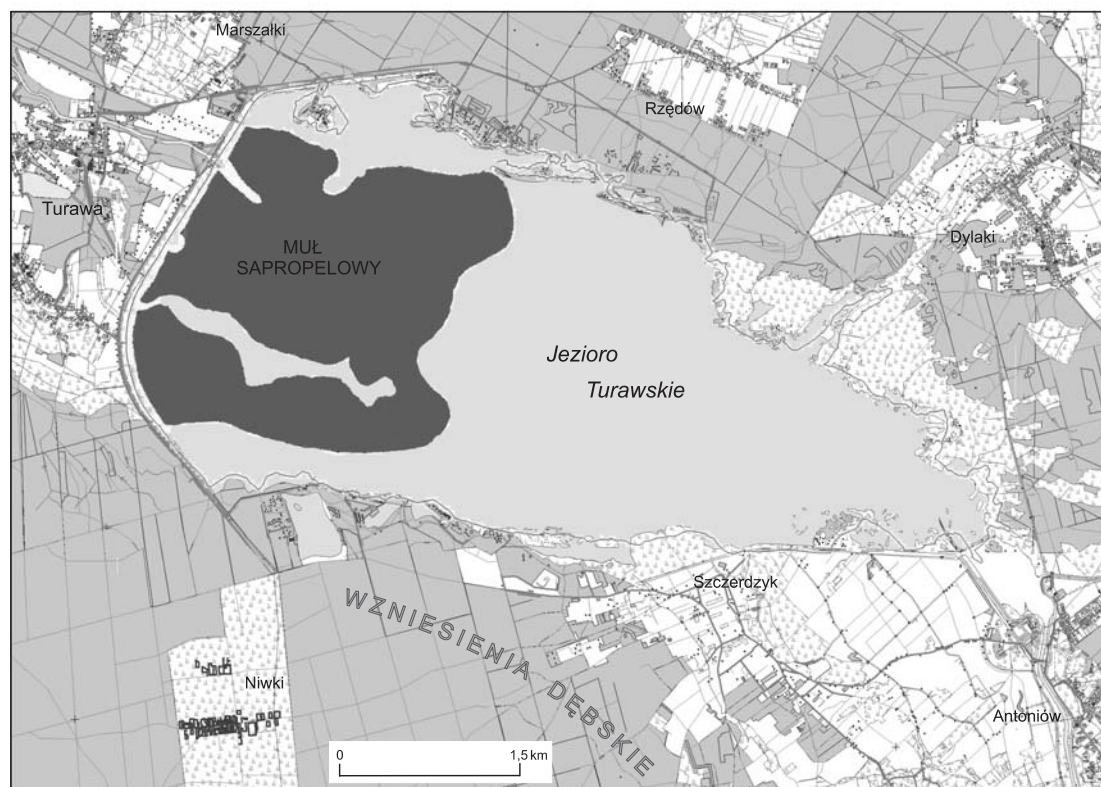


Fig. 5. Obszar występowania zanieczyszczonych osadów dennych (mułu sapropelowego) w zbiorniku retencyjnym Turawa na podstawie badań z 2004 r. (Gurwin i in., 2004a; Skowronek i in., 2004)

Area of contaminated bottom sediments in the Turawa reservoir according to investigations in 2004 (Gurwin *et al.*, 2004a; Skowronek *et al.*, 2004)

zbiornika są w zdecydowanej przewadze wodami należącymi do klasy niezadawalającej jakości, a wartości wskaźników potwierdzają oddziaływania antropogeniczne. W wodach podziemnych w otoczeniu zbiornika również przeważają wody niezadawalającej i złej jakości, ale jest też więcej wód należących do III klasy jakości. Elementami obniżającymi jakość wody były głównie: miedź, ołów, nikiel, rzadziej fenole i azotyny.

Zanieczyszczone osady dennie (muł sapropelowy) znajdują się w zachodniej części czaszy zbiornika (fig. 5), a zatem w strefie infiltracji wód powierzchniowych do warstw wodonośnych.

W najnowszej dokumentacji (Studium ..., 2009) i wcześniejszych publikacjach (Skowronek i in., 2005; Gurwin, Skowronek, 2006) zostały szczegółowo przedstawione proponowane warianty renaturalizacji zbiornika Turawa. W dalszej części artykułu autor przedstawia więc jedynie krótką charakterystykę, mającą na celu uzasadnienie konieczności dalszego prowadzenia monitoringu w trakcie realizacji ostatecznie wybranego wariantu inwestycji.

Pierwszy z rozpatrywanych wariantów przewiduje całkowite usunięcie zanieczyszczonych osadów dennych z czaszy zbiornika (fig. 5) i przemieszczenie transportem kołowym na

docelowe, zewnętrzne składowisko substancji niebezpiecznych. W tym przypadku zagrożenie dla wód podziemnych ustąpi wraz z zakończeniem inwestycji. Jednak w trakcie realizacji zagrożenie będzie bardzo wysokie, ponieważ w czasie wydobywania osadu naruszeniu lub zniszczeniu ulegnie zakolmatowana warstwa przydenna. Nieunikniona będzie wówczas ingerencja w mineralne podłoże do głębokości co najmniej 1 m, powodująca zaburzenie i wymieszanie osadów. Zmiana uwarstwionej struktury i zagęszczenia zwiększy pionową przepuszczalność tych utworów. Wskutek tego, infiltracja w osady dennie będzie ułatwiona, a uwolnione z osadu w trakcie prac substancje toksyczne będą łatwiej przedostawać się do wód pod dnem zbiornika i dalej na przedpolu zapory. Należy zwrócić uwagę, że także po zakończeniu prac, zanieczyszczenia nagromadzone w wodach podziemnych pod dnem będą jeszcze przez długi czas podlegać migracji w strumieniu filtracyjnym do odbiorników poniżej zbiornika.

Przy niskim stanie wody w zbiorniku, a taki byłby utrzymywany w trakcie realizacji prac wydobywczych, ze względu na zmianę gradientu hydraulicznego, w pewnych obszarach należy się z kolei spodziewać wzmożonej ascencji wód podziemnych spod dna, wskutek czego może dochodzić do przebiegów hydraulicznych, zjawisk sufozji i rozmyć w naruszo-

nym osadzie, a tym samym również do tworzenia się uprzywilejowanych dróg migracji zanieczyszczeń. Zmiany gradientu hydraulicznego i kierunku przepływu wód będą prowadzić do powstania mechanicznej sufozji wewnątrzwarstwowej lub międzywarstwowej w gruncie. Proces ten może powodować rozwarstwienia pierwotnie jednorodnej warstwy lub powstanie warstwowania wtórnego, zmieniając właściwości gruntu, jak porowatość i przepuszczalność.

Oprócz przewidywanego wzrostu ładunku fosforu, w trakcie wybierania osadów dennych, będzie dochodzić do uwalniania jonów metali ciężkich – przede wszystkim kadmu, który jest jonem łatwo migrującym w wodach podziemnych. Jego stężenie w tej sytuacji ulegnie znacznemu wzrostowi. Należy więc uznać, że wariant ten byłby niekorzystny ze względu na zagrożenie wód podziemnych na etapie realizacji prac, mimo że po ich zakończeniu warunki zabezpieczenia środowiska wodnego należy uznać za optymalne. Z uwagi także na wiele innych aspektów środowiskowych i ekonomicznych wariant ten nie jest przewidziany do realizacji.

Drugi, preferowany wariant rekultywacji, polega na odizolowaniu i zabezpieczeniu osadów bez ich wydobywania, co zostanie osiągnięte poprzez wprowadzenie do zbiornika odpowiedniego biopreparatu i sorbentów oraz przykrycie mułów sapropelowych, zgromadzonych w dolnej części zbiornika, piaskiem pobieranym z jego części górnej.

Zakłada się, że prawidłowe zastosowanie biopreparatu, po wcześniej przeprowadzonych testach terenowych (Heese, Skowronek, 2006) nie przyniesie negatywnych skutków dla wód podziemnych, a w dłuższej perspektywie trwała redukcja mobilnych składników przyczyni się do poprawy jakości tych wód.

Przemieszczanie mas osadów piaszczystych i jego depozycja w dolnej części zbiornika będzie prowadzić do czasowej remobilizacji osadu drobnoziarnistego typu mułu sapropelowego (bogatego w substancje organiczne i zanieczyszczenia chemiczne) do toni wodnej (fig. 5). Proces ten będzie stwarzał potencjalne zagrożenie także dla wód podziemnych pod dnem zbiornika, a następnie na jego przedpolu, zgodnie z wcześniej opisanymi warunkami hydrodynamicznymi w otoczeniu zbiornika. Wskutek dodatkowego zasilenia wody w biogeny i inne substancje rozpuszczone, będzie następowała infiltracja wód bardziej obciążonych zanieczyszczeniem.

W trakcie deponowania piasku w warstwie ochronnej, na osadach dennych będzie dochodzić do zmian warunków fizykochemicznych, w wyniku czego jony metali ciężkich, przede wszystkim kadmu, mogą być remobilizowane do środowiska wodnego z mało stabilnych wiązań chemicznych.

Ze względu na występowanie w podłożu niez izolowanego przypowierzchniowego poziomu wodonośnego, o wysokim stopniu podatności na degradację, rozpuszczone substancje będą migrować zgodnie z rozpoznany układem strumieni filtracyjnych.

Dolinne osady piaszczyste charakteryzują się dobrą przepuszczalnością i współczynnikiem filtracji k , najczęściej od

kilkum do 12 m/d. Pogłębianie górnej strefy wskutek urabiania materiału piaszczystego, doprowadzi do zmian w układzie hydrodynamicznym wód podziemnych, a ewentualne uruchomienie zbiornika wstępnego także wpłynie na lokalną korektę bazy дренаżu. W związku z tym, zwłaszcza przy niskich stanach wód w zbiorniku, w części wschodniej może dochodzić okresowo do znaczącego niż obecnie obniżania poziomu wód gruntowych w odległości kilkuset metrów od zbiornika, np. w rejonie miejscowości Szczedrzyk i Dylaki.

Duże zagrożenie stanowią substancje ropopochodne pochodzące z wykorzystywanych maszyn i urządzeń oraz tymczasowych składów paliw. Mogą się one dostawać do środowiska wodnego. Paliwa, oleje i smary trafiają na powierzchnię dobrze przepuszczalnych piaszczystych osadów dennych (dodatkowo naruszonych w trakcie prac) w górnej części zbiornika, i zgodnie z gradientem hydraulicznym, w zależności od frakcji, będą się przemieszczać na zwierciadle lub w strumieniu wód podziemnych. Biorąc pod uwagę dobrą przepuszczalność ośrodka i płytko występujący odkryty poziom wodonośny, roboty powinny być prowadzone pod szczególną kontrolą, ze względu na możliwość skażenia środowiska.

Z uwagi na stwierdzony badaniami hydrogeologicznymi układ pola hydrodynamicznego wokół zbiornika Turawa, nie ma bezpośredniego zagrożenia dla ujęć wód podziemnych w Ozimku, Szczedrzyku, Biestrzynniku, Kadłubie Turawskim, Mnichusie. Ujęcia te znajdują się bowiem powyżej górnej części zbiornika i jednocześnie w bezpiecznej odległości. Analiza wydajności eksploatacyjnych i zasięgów leja depresji wyklucza bezpośredni kontakt z wodami zbiornika. Jedynie ujęcie w Szczedrzyku znajduje się bliżej południowo-wschodniego brzegu, ale przy wydajnościach maksymalnych rzędu 50–70 m³/h i zasięgu leja depresji 200–300 m nie przewiduje się interakcji z wodami zbiornika. Ponadto, prace związane z renaturalizacją zbiornika, prowadzone we wschodniej części czaszy (głównie urabianie materiału piaszczystego z dna), nie spowodują zmian jakościowych pod warunkiem spełnienia zawartych w opracowanym studium (Studium..., 2009) nakazów i zaleceń odnośnie prowadzenia tych prac.

W przypadku ujęcia w Niwkach, zlokalizowanego około 1,5 km na południe od zbiornika, w rejonie zachodniej części, w której planowane są zabiegi rekultywacyjne również nie ma bezpośredniego zagrożenia zanieczyszczeniem. W całej tej części w trakcie i po zakończeniu prac musi być jednak prowadzona sieć monitoringu osłonowego. Podobna sytuacja dotyczy ujęcia dla Turawy. Wodociąg zbiorowy jest tu zaopatrywany z ujęcia Turawa–Marszałki, około 1 km od północno-zachodniego brzegu zbiornika retencyjnego. Przy wydajnościach rzędu 100 m³/h i depresji $s = 4\text{--}5$ m, zasięg strumienia wód infiltrujących ze zbiornika na przedpolu zapory czołowej nie powinien wejść, także w przyszłości, w interakcję z zasięgiem wpływu tego ujęcia (tzw. ZWU). Konieczny jest jednak monitoring osłonowy tego ujęcia.

DZIAŁANIA MAJĄCE NA CELU OGRANICZENIE NEGATYWNYCH ODDZIAŁYWAŃ NA ŚRODOWISKO WÓD PODZIEMNYCH W CZASIE PROWADZENIA INWESTYCJI

W celu zabezpieczenia środowiska gruntowo-wodnego przed negatywnym wpływem ilościowym i jakościowym oraz nie doprowadzenia do pogorszenia stosunków wodnych na tym terenie, oprócz prowadzonej sieci monitoringu, należy przestrzegać poniższych zaleceń.

Ograniczenie ilości substancji remobilizowanych do toni wodnej i wód podziemnych z drobnoziarnistego mułu sapropelowego (bogatego w substancje organiczne i zanieczyszczenia chemiczne) można uzyskać dostosowując prace refulacyjne do rozkładu i miąższości osadu. Muły sapropelowe zajmują powierzchnię około 5 km², a ich miąższość jest zmienna i waha się od około 10 cm do prawie 2 m w rejonie zapory czołowej. Jest to materiał płynny, łatwo ulegający przemieszczaniu i mieszaniu, dlatego planowany nakład utworów piaszczystych, o różnej miąższości – średnio 50 cm, powinien być tworzony w sposób równomierny na całej powierzchni. Przewiduje się, że warstwa ochronna będzie układana przy pomocy odpowiednich refulerów i podajników, pozwalających na równomierne rozprowadzenie poprzez rozścielenie materiału bezpośrednio nad dnem zbiornika. A w celu uzyskania szczelnej izolacji podłoża, wskazane jest warstwowe rozprowadzanie piasku na powierzchni mułu sapropelowego, co umożliwiłoby wolniejszą kompaktację, lepsze odwodnienie i ochronę przed diapirowymi przebieciami (ascenzją) skierowanymi ku górze.

Zabiegi te będą poprzedzone zastosowaniem odpowiednio dobranych preparatów bioaktywnych. Przeprowadzone dotychczas badania zbiornika Turawa (Latała, Wierzba, 2004; Latała i in., 2004), a także doświadczenia nabyte podczas prac badawczych wykonywanych w strefach innych zbiorników powierzchniowych (Borówka i in., 2008), wykazują, że istnieje możliwość takiego dobrania preparatu, aby spowodować wstępne zagęszczenie i kompaktację płynnego osadu, co zmniejszy jego objętość i ustabilizuje mechanicznie. Jest to bardzo ważny etap, ponieważ ograniczy uwalnianie substancji w kolejnych etapach prac, a jednocześnie zagęszczenie i stabilizacja osadu wskutek ich kompaktacji doprowadzi do powstania słabo przepuszczalnej warstwy przydennej, ograniczającej infiltrację zanieczyszczonych wód ze zbiornika w podłoże. Jednak w przypadku stwierdzenia badaniami monitoringowymi nadmiernego skażenia wód podziemnych w trakcie realizowanych prac, należy podjąć kroki zaradcze, np. w postaci budowy bariery hydraulicznej przejmującej zanieczyszczone wody do czasu zakończenia rekultywacji, stabilizacji procesów hydrogeochemicznych i ostatecznie spadku zawartości szkodliwych substancji. Dlatego niezbędne jest prowadzenie skutecznego monitoringu wód podziemnych w otoczeniu zbiornika.

PODSUMOWANIE

Obszar wokół zbiornika retencyjnego Turawa należy do zasobnych stref występowania wód podziemnych i stanowi jedyne źródło zaopatrzenia w wodę dla zbiorowych i licznych indywidualnych ujęć wody. Badania składu chemicznego wód podziemnych pod dnem zbiornika i w jego otoczeniu wskazują na duży wpływ antropopresji. Można mówić o bardzo znaczącym lokalnym zanieczyszczeniu wód, zwłaszcza w strefie brzegowej i pod dnem zbiornika.

Dotychczasowe badania monitoringowe wykazały, że w obrębie zbiornika istnieje wyraźny rozdział hydrodynamiczny w układzie krążenia wód podziemnych, w którym w części górnej dominuje drenaż wód podziemnych, natomiast w części dolnej występuje infiltracja w dno zbiornika i dalej odpływ do wód podziemnych na przedpolu zapory. W ten sposób wnoszony jest ładunek zanieczyszczeń z bardzo obciążonych osadów dennych i dlatego zachodnia strefa zbiornika powinna być w szczególności objęta monitoringiem w trakcie realizacji oraz po zakończeniu inwestycji. Ocenę tych zjawisk przybliżają rezultaty modelowania numerycznego (Gurwin i in., 2004b, 2005b).

W świetle przedstawionych koncepcji rekultywacji, zarówno na etapie realizacji, jak też po zakończeniu inwestycji,

nieodzowna jest kontynuacja monitoringu wód podziemnych na podstawie istniejącej sieci piezometrów i studni w zakresie dynamiki, a zaplanować należy optymalny monitoring jakości. W związku z tym przewiduje się okresowy pobór próbek wód z wytypowanych punktów. W trakcie realizacji inwestycji będą to serie opróbowania nie rzadziej niż raz na kwartał, a po zakończeniu – nie rzadziej niż raz w roku. Sieć punktów obserwacyjnych musi być utrzymana wokół całego zbiornika, ponieważ planowane prace, w tym pogłębienie wschodniej części czaszy i odbudowa zbiornika wstępnego, będą miały wpływ na warunki hydrodynamiczne i jakość wód podziemnych również w górnej części. Szczegółowy projekt monitoringu zostanie przygotowany na etapie decyzji o podjęciu zabiegów rekultywacji zbiornika.

Monitoring powinien być prowadzony, jak dotychczas – z wykorzystaniem automatycznych rejestratorów poziomu zwierciadła wody i temperatury. W pracach planuje się wykorzystanie zbudowanej stacji meteo-hydrogeologicznej w Kotorzu, która jest utrzymywana od kilku lat w ramach badań własnych Zakładu Hydrogeologii Stosowanej Uniwersytetu Wrocławskiego.

Zabiegi przewidziane w preferowanym wariantcie renaturalizacji zbiornika przyczynią się ostatecznie do powstania w jego zachodniej części słabo przepuszczalnej warstwy przydennej, zmniejszającej infiltrację wód ze zbiornika

w podłoże. W ten sposób ograniczona zostanie możliwość migracji rozpuszczonych składników do wód podziemnych.

Artykuł powstał przy wykorzystaniu środków finansowych projektu badawczego ING U.Wr. 2022/ING/W/09-08.

LITERATURA

- BORÓWKA R., MUSIELAK S., OSADCZUK A., OSADCZUK K., RADZIEJEWSKA T., SKOWRONEK A., WAWRZYŃIAK-WYDROWSKA B., WITKOWSKI A., 2008 — Badania litogenetyczne i geochemiczne osadów zalewu Szczecińskiego, jezior Dąbie i Jamno oraz zbiornika Turawa. *W: Zarządzanie zasobami wodnymi w dorzeczu Odry—2008: 323–332.* Wyd. RZGW, Wrocław.
- CIEMNIAK A., GURWIN J., PROTASOWICKI M., SKOWRONEK A., WIECZOREK P., WITCZAK A., 2005 — Badania zanieczyszczenia osadów dennych Jeziora Turawskiego. *W: Zasoby wodne triasu opolskiego i ekologia Jezior Turawskich: 239–249.* Wyd. NOT FSNT w Opolu, Opole–Strzelce Opolskie.
- GURWIN J., 2006 — Wyniki monitoringu wód powierzchniowych zlewni Jeziora Turawskiego dla potrzeb oceny ekologicznego stanu zbiornika. *W: Problemy ochrony zasobów wodnych w dorzeczu Odry—2006: 263–272.* Wyd. RZGW, Wrocław.
- GURWIN J., SKOWRONEK A., 2006 — Koncepcja rewitalizacji zbiornika retencyjnego Turawa – na podstawie „Oceny stanu ekologicznego Jeziora Turawskiego w celu opracowania działań na rzecz jego poprawy”. *W: Problemy ochrony zasobów wodnych w dorzeczu Odry – 2006: 509–518.* Wyd. RZGW, Wrocław.
- GURWIN J., KRYZA H., KRYZA J., KUROWSKI L., JĘDRYSEK M., RACZYŃSKI P., SOLECKI A., SZYNKIEWICZ A., 2004a — Raport projektu Ocena stanu ekologicznego Jeziora Turawskiego w celu opracowania działań na rzecz jego poprawy, ING UWroc. Dla: Pełnomocnik Rządu ds. „Programu dla Odry 2006”. Dolnośląski Urząd Wojewódzki we Wrocławiu, Wrocław.
- GURWIN J., KRYZA J., POPRAWSKI L., SKOWRONEK A., 2004b — Zintegrowana kampania badawcza dla określenia ekologicznego stanu zbiornika retencyjnego „Jezioro Turawskie” zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju. *W: Ochrona i rekultywacja terenów dorzecza Odry. Zesz. Nauk. UZiel., 131, Inż. Środ., 12: 133–140.*
- GURWIN J., KRYZA H., KRYZA J., 2005a — Model hydrogeologiczny Jeziora Turawskiego. *W: Zasoby wodne triasu opolskiego i ekologia Jezior Turawskich: 193–203.* Wyd. NOT FSNT w Opolu, Opole–Strzelce Opolskie.
- GURWIN J., KRYZA H., KRYZA J., POPRAWSKI L., 2005b — Rozpoznanie wód podziemnych w rejonie Jeziora Turawskiego dla potrzeb oceny stanu ekologicznego. *W: Współczesne problemy hydrogeologii, 12 (red. A. Sadurski, A. Krawiec): 241–253.* Wyd. UMK, Toruń.
- GURWIN J., KRYZA J., POPRAWSKI L., SKOWRONEK A., 2005c — Badania geoekologiczne Jeziora Turawskiego. *W: Zasoby wodne triasu opolskiego i ekologia Jezior Turawskich: 211–222.* Wyd. NOT FSNT w Opolu, Opole–Strzelce Opolskie.
- GRZEŚKOWICZ Ł., 2005 — Wpływ zbiornika retencyjnego Jezioro Turawskie na wody podziemne. *Arch. Zakł. Hydrogeol. Stosow. UWroc., Wrocław.*
- HEESE T., SKOWRONEK A., 2006 — Metoda rewitalizacji zbiorników wodnych biopreparatem bakteriologicznym – podsumowanie wyników testu technicznego i pierwsze doświadczenia zdobyte na naturalnym zbiorniku bezodpływowym. *W: Problemy ochrony zasobów wodnych w dorzeczu Odry – 2006: 519–528.* Wyd. RZGW, Wrocław.
- KRYZA H., KRYZA J., GURWIN J., 2005 — Migracja zanieczyszczeń w wodach podziemnych wokół Jeziora Turawskiego. *W: Zasoby wodne triasu opolskiego i ekologia Jezior Turawskich: 205–209.*, Wyd. NOT FSNT w Opolu, Opole–Strzelce Opolskie.
- LATAŁA A., WIERZBA S., 2004 — Ocena aktywności biodegradacyjnej wybranych szczepów bakterii lipolitycznych. *Biotechnol., 3, 66: 193–201.*
- LATAŁA A., WIERZBA S., FARBISZEWSKA T., POLACZEK B., BONIEWSKA E., 2004 — Biodegradacja odpadów gospodarczych przy użyciu szczepów bakterii lipolitycznych, proteolitycznych i celulolitycznych. *Biotechnol., 3, 66: 202–213.*
- STUDIUM wykonalności dla przedsięwzięcia rewitalizacja zbiornika retencyjnego Turawa na rzece Mała Panew, wraz z wnioskiem aplikacyjnym i raportem oddziaływania inwestycji na środowisko, 2009 — ScottWilson Sp. z o.o., Warszawa.
- SIMEONOV V., WOLSKA L., KUCZYŃSKA A., GURWIN J., TSAKOVSKI S., PROTASOWICKI M., NAMIEŚNIK J., 2007 — Sediment quality assessment by intelligent data analysis. *Trends in analytical chemistry, TRAC 13106, 26, 4: 323–331.*
- SKOWRONEK A., GURWIN J., KRYZA J., 2004 — Podsumowanie badań wraz z koncepcją remediacji Jeziora Turawskiego. *W: Ocena stanu ekologicznego Jeziora Turawskiego w celu opracowania działań na rzecz jego poprawy. Raport końcowy z prac badawczych.* ING UWroc., Wrocław.
- SKOWRONEK A., GURWIN J., KRYZA J., 2005 — Koncepcja rewitalizacji środowiska wodnego Jeziora Turawskiego. *W: Zasoby wodne triasu opolskiego i ekologia Jezior Turawskich: 251–264.* Wyd. NOT FSNT w Opolu, Opole–Strzelce Opolskie.
- TEISSEYRE A.K. i in., 1981 — Badania zamulenia oraz własności geologiczno-inżynierskich i hydrogeologicznych osadów zbiornika Turawa. *Arch. ING UWroc., Wrocław; RZGW, Wrocław.*
- TEISSEYRE A.K., 1984 — Osady dennie Jeziora Turawskiego w świetle badań geologicznych. *Geol. Sudet., 18, 1.*

SUMMARY

The Turawa Lake is an artificial reservoir of the 1st technical class located in southwestern Poland in the Mała Panew River valley. The total area of the lake is 20.67 km² and retention capacity approx. 106 mln m³. Long-term multidisciplinary investigations were conducted in the last years to determine the ecological conditions of this eutrophic lake in the first step and next to develop a complex feasibility study including an environmental impact assessment of the proposed renaturalization concepts. The most crucial problem is how to protect water environment against pollutants like phosphorus, heavy metals and other toxic elements accumulated in the bottom sediments of the reservoir. Especially

the content of cadmium is several tens higher than the secure level. The influence of water retention and potential pollutants migration on groundwater of the major Quaternary aquifer is to be controlled by a monitoring network around the lake during and after finishing the renaturalization operation. The most preferred variant is in situ remediation through capping when submerged contaminated sediments are covered by stable layers of sand together with some biodegradation treatments before. The results of long-term groundwater monitoring are presented to point out how significant is the continuation of these observations in regard to a possible recultivation campaign.