

ZASTOSOWANIE NUMERYCZNEGO MODELU FILTRACJI W OCENIE WPŁYWU ROBÓT INŻYNIERSKICH NA WODY PODZIEMNE NA PRZYKŁADZIE PLANOWANEGO TUNELU MIĘDZY WYSPAMI WOLIN I UZNAM

DESIGN OF NUMERICAL FLOW MODEL FOR EVALUATION OF GEOENGINEERING INVESTMENTS IMPACT ON GROUNDWATER ON THE EXAMPLE OF TUNNEL BETWEEN WOLIN AND UZNAM ISLANDS

JACEK GURWIN¹, PAWEŁ RUSZKIEWICZ²

Abstrakt. Badania modelowe przeprowadzono w celu określenia lokalnego systemu krążenia wód podziemnych, składników bilansu wodnego oraz oddziaływania na wody podziemne inwestycji polegającej na budowie tunelu pod rzeką Świną. Inwestycja ma za zadanie połączenie wysp Uznam i Wolin. Wykorzystano program MODFLOW w konfiguracji Groundwater Vistas 5.0. Po przeprowadzeniu kalibracji modelu dla warunków naturalnych według stanu z 2008 r. wykonano symulacje prognostyczne dla 3 wariantów lokalizacji inwestycji. Najbardziej prawdopodobna opcja K3W1, wysunięta najbardziej na południe, została przeanalizowana bardziej szczegółowo ze względu na możliwość oddziaływania na pobliskie ujęcie wód podziemnych Wydrzany dla Świnoujścia. Po wykonaniu obliczeń wykazano, że budowa ramp zjazdowych i związane z tym prace odwodnieniowe nie spowodują negatywnych skutków w funkcjonowaniu ujęcia.

Słowa kluczowe: budowa tunelu, numeryczny model filtracji, MODFLOW/MODPATH, wyspy Uznam i Wolin.

Abstract. The investigations were conducted to establish a flow system, groundwater balance within the area surrounding the tunnel between Uznam and Wolin islands using MODFLOW package in configuration of the GROUNDWATER VISTAS 5.0 environment. After model calibration for natural conditions the simulations were done for the three projected options of tunnel location. The most probable variant called K3W1 was analyzed more detailed showing that such a concept could generate some influence on the Wydrzany water intake. But after simulation in pumping conditions on the average level for the last years it is evidenced that groundwater surface decrease due to the ramp construction doesn't disrupt normal exploitation of the intake.

Key words: tunnel construction, numerical groundwater modeling, MODFLOW/MODPATH, Uznam and Wolin islands.

WSTĘP

Numeryczny model warunków hydrogeologicznych w rejonie planowanej przeprawy pod rzeką Świną został wykonany na zamówienie Biura Inżynierskiego DAMART s.c., a jego celem było określenie wpływu realizacji robót i usytuowania tunelu na warunki hydrodynamiczne wód podziemnych w aspekcie ochrony zasobów wody pitnej dla Świnoujścia.

Numeryczne modelowanie filtracji znajduje zastosowanie praktycznie we wszystkich problemach hydrogeologicznych, w tym również zagadnieniach hydrotechnicznych,

zwłaszcza jeśli chodzi o wpływ i ocenę planowanych inwestycji na środowisko wód podziemnych. Wykorzystując dostępne oprogramowanie w setkach różnych konfiguracji i rozwiązań, wykonuje się zarówno modele regionalne całych systemów wodonośnych, jak też modele lokalne dotyczące obiektów zagrażających środowisku. Niezależnie jednak od skali, najczęściej konieczne jest operowanie ogromną liczbą zgromadzonych danych i tym samym dobór optymalnych narzędzi. Dlatego również w tym zadaniu zdecydowano się

¹ Uniwersytet Wrocławski, Wydział Nauk o Ziemi i Kształtowania Środowiska, Pl. Maxa Born'a 9, 50-205 Wrocław, jacek.gurwin@ing.uni.wroc.pl

² Przedsiębiorstwo Geologiczne PROXIMA S.A., ul. Wierzbowa 15, 50-056 Wrocław, pawel.ruszkiewicz@proxima.pl.pl

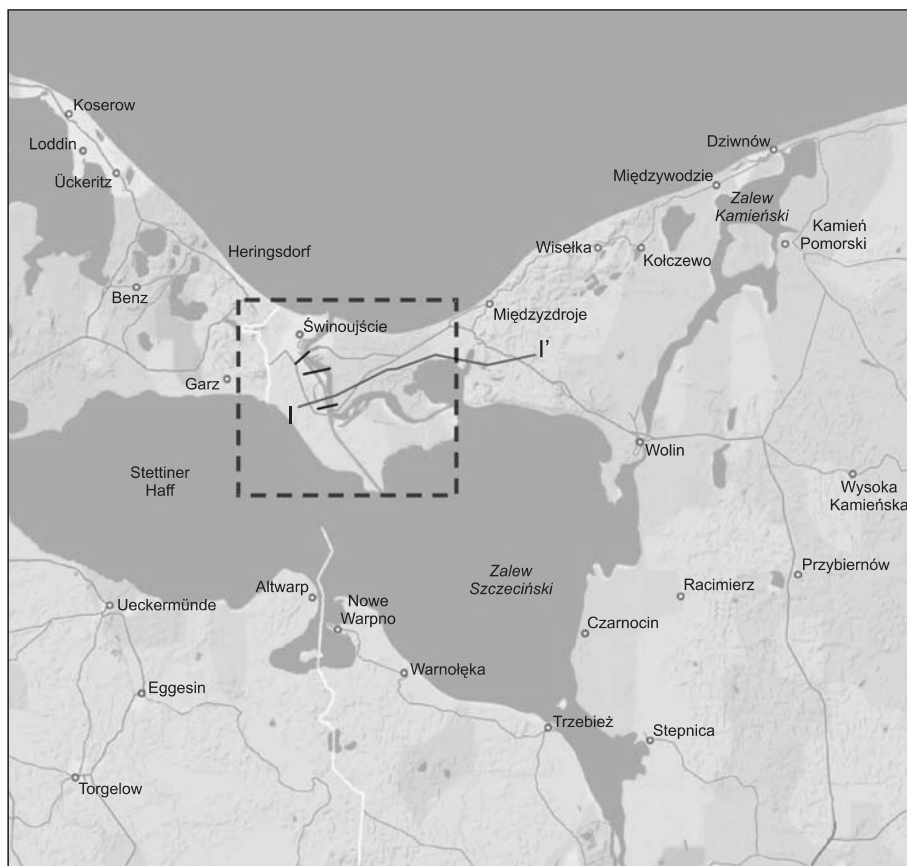


Fig. 1. Lokalizacja obszaru badań z wariantami przebiegu tunelu

Study area map with variants of tunnel location

wykorzystać program oparty na modułach MODFLOW (McDonald, Harbaugh, 1988), zintegrowany z systemem GIS – GROUNDWATER VISTAS firmy ESI Inc. Wykonane zadanie potwierdziło, że program ten można zarekomendować nie tylko jako jeden z najlepszych do opracowania regionalnych modeli (Gurwin, Serafin, 2008), ale również z powodzeniem może być wykorzystywany w modelowaniu oddziaływania obiektów inżynierskich.

W pracy przedstawiono sposób odwzorowania układu hydrostrukturalnego, dyskretyzacji i warunków brzegowych, budowę modelu konceptualnego i numerycznego, na którym wykonano wariantowe symulacje. Prognozy dotyczyły wpływu prac odwodnieniowych w trakcie budowy na wody podziemne przy różnych wariantach lokalizacji inwestycji, zwłaszcza w zasięgu ich potencjalnego oddziaływania na ujęcia w Świnoujściu (fig. 1).

OPIS WARUNKÓW NATURALNYCH

Obszar badań obejmuje wschodnią część wyspy Uznam oraz najbardziej na zachód wysunięty fragment wyspy Wolin, które są rozdzielone przez rzekę Świnę, nad którą leży Świnoujście (fig. 1). Ze względu na morfologię decydujące znaczenie ma nizina Świny, a wysokości terenu zawierają się pomiędzy 0 m n.p.m. wzdłuż rzeki do 3–5 m n.p.m. na wschodzie obszaru. Na północy granicę stanowi Morze Bałtyckie, a na południu Zalew Szczeciński.

Budowa geologiczna badanego obszaru nie jest skomplikowana. Podłoże zbudowane jest ze skał wapiennych kredy górnej, na których zalegają gliny zwałowe oraz piaski plejstoceny i holoceny, rozdzielone cienką warstwą osadów limnicznych. Utwory kredowe zbudowane są z margli oraz podrzędnie piasków i ilów. Strop serii osadów kredowych występuje średnio na głębokości ok. 35 m, przy czym głębokość ta znacznie się zwiększa w kierunku południowym i przy granicy modelu ocenia się ją na ok. 60 m.

Miąszość osadów kredy waha się od kilkunastu do ponad stu metrów.

Bezpośrednio na podłożu mezozoicznym leżą gliny zwałowe z domieszką żwiru i kamieni o zmiennej miąższości. Strop tych osadów znajduje się na głębokości ok. 30 m i lokalnie, w centralnej części modelu, jest przebit przez leżące poniżej osady kredowe.

Na glinach osadziły się plejstoceny osady żwirowo-piaszczyste o łącznej miąższości dochodzącej do 20 m. Seria ta wykazuje pewną heterogeniczność, która w głębszych warstwach objawia się większym udziałem grubszych frakcji – piasków gruboziarnistych i żwirów wodnolodowcowych, natomiast w części stropowej przechodzą one w piaski drobnoziarniste i pylaste z występującymi miejscami domieszkami humusu i muszli.

Poziom piasków plejstoceny i holoceny jest rozdzielony występującą na głębokości 10–12 m warstwą

mułków jeziornych. Miąższość tych osadów jest niewielka i waha się w przedziale od kilkudziesięciu centymetrów do nieco ponad 1 m.

Leżące przy powierzchni utwory holocenijskie zbudowane są z piasków morskich oraz utworów deltowych Świny,

z których w wyniku późniejszej akumulacji eolicznej uformowały się wydmy. Miąższość osadów przypowierzchniowej serii piasków dochodzi do 12 m.

WARUNKI HYDROGEOLOGICZNE I EKSPLOATACJA WÓD PODZIEMNYCH

Stan zwierciadła wody w czwartorzędowym piętrze wodonośnym jest bezpośrednio powiązany ze stanem wód w otaczających go zbiornikach wód powierzchniowych. Po stronie północnej jest to Morze Bałtyckie, natomiast na południu Zalew Szczeciński. Centralna część badanego obszaru rozcięta jest przez ujściowy odcinek Świny wraz z Kanałem Mielińskim. W obrębie czwartorzędowego piętra wodonośnego, zagrożonego wpływem inwestycji, wyróżnia się dwa

poziomy. Pierwszy z nich jest zbudowany z holocenijskich piasków deltowych, drugi – z plejstoceńskich piasków i żwirów wodnolodowcowych. Poziomy te są połączone poprzez liczne okna hydrogeologiczne w rozdzielającej je cienkiej warstwie osadów pochodzenia limnicznego. Budowę geologiczną i warunki hydrogeologiczne w tym rejonie dobrze ilustruje przekrój hydrogeologiczny (fig. 2).

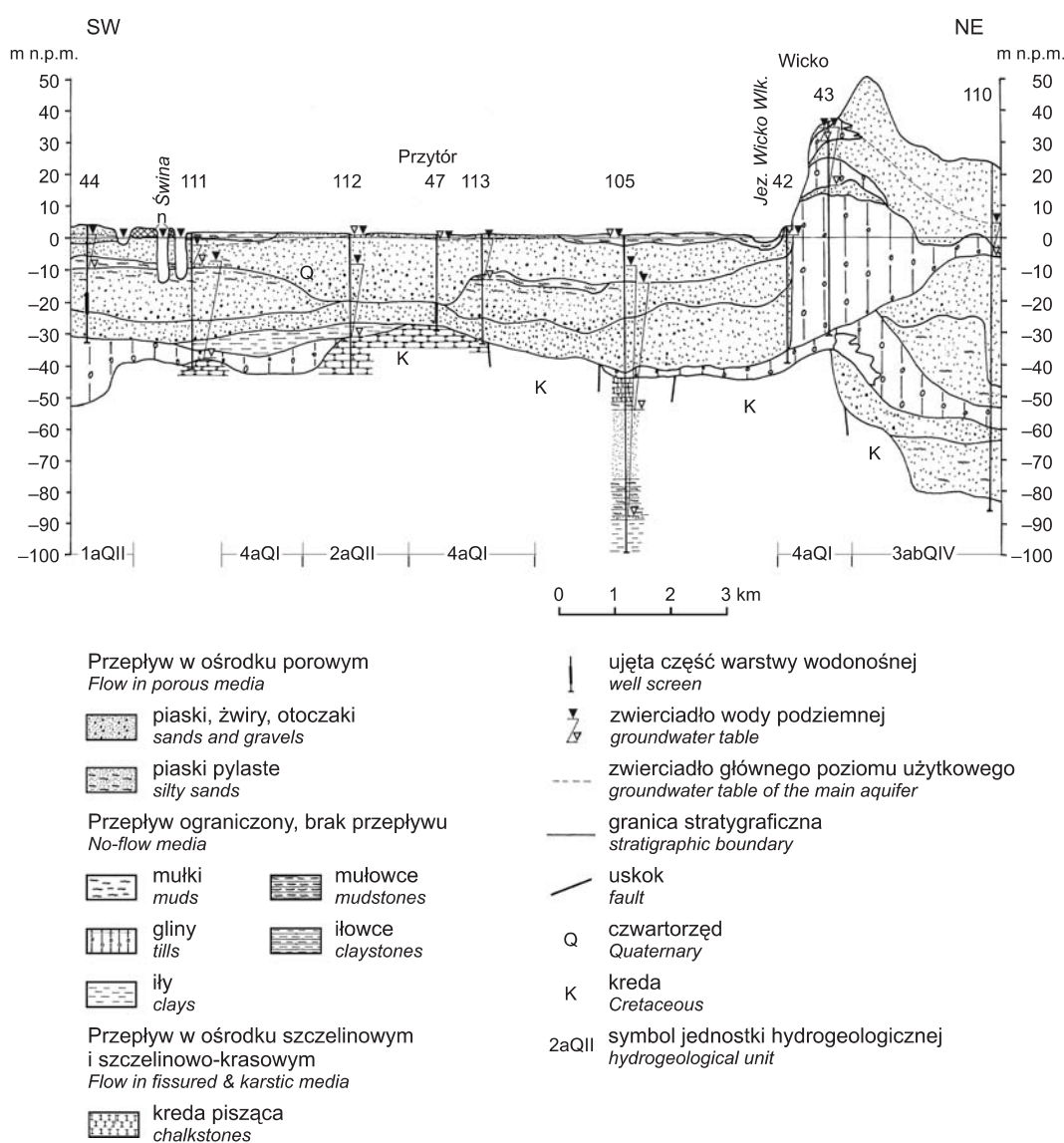


Fig. 2. Przekrój hydrogeologiczny I-I' (Matkowska, 1998b); lokalizacja na fig. 1

Hydrogeological cross-section I-I' (after Matkowska, 1998b); for location see Fig. 1

Zwierciadło wód jest swobodne, lokalnie, w miejscu występowania na powierzchni torfów, lekko napięte. Rzędna poziomu piezometrycznego zmienia się od około 1,5 m n.p.m. w strefach zasilania do -2 m n.p.m. w okolicy czynnych ujęć.

Jako podstawowe źródło zaopatrzenia w wodę wykorzystuje się głębiej leżący poziom plejstoceniowy. Należy pamiętać, że jest on słabo izolowany od wyżej leżącego poziomu holoceniowego, a przez to narażony na migrację zanieczyszczeń zarówno z wód powierzchniowych, jak i w wyniku antropopresji.

W celu zaopatrzenia w wodę mieszkańców Świnoujścia eksploatuje się 4 ujęcia wód podziemnych: Granica, Wydrzany, Odra i Na Wydmach. Na modelu uwzględniono tylko dwa ujęcia: Wydrzany i Odra. Odległość pozostałych dwóch ujęć od projektowanego tunelu oraz zasięg ich od-

działywania wyklucza wpływ prowadzonych prac odwodnieniowych na ich zasoby.

Średni miesięczny pobór na ujęciu Wydrzany kształtował się w latach 2006–2008 na poziomie ok. 140 tys. m³, ze znaczącym wzrostem w okresie letnim do 150–160 tys. m³ oraz spadkami do 115–120 tys. m³ w miesiącach zimowych. W przypadku ujęcia Odra średnie wydajności wyniosły 5,8–6,0 tys. m³ na miesiąc, wahając się od 2–3 tys. m³ w półroczu zimowym do maksymalnie nawet 12–18 tys. m³ w okresie od czerwca do września.

Oprócz ujęć wodociągowych uwzględniono także pobory z dwóch dużych ujęć przemysłowych – Stoczni Remontowej i Portu Handlowego. Średni miesięczny pobór z tych dwóch ujęć kształtuje się na poziomie, odpowiednio, 4838 i 6500 m³.

NUMERYCZNY MODEL FILTRACJI

Wykorzystanie najnowszych narzędzi geoinformatycznych (Gurwin, Serafin, 2008) zapewniło stopień złożoności modelu pozwalający odwzorować warunki hydrogeologiczne na tyle szczegółowo, by uzyskać możliwość symulacji przestrzennego oddziaływania planowanych obiektów inżynierskich. Wykonane w ten sposób modele 3D zapewniają wiarygodne wyniki obliczeń i są optymalnym narzędziem prognozowania i ochrony wód podziemnych w zasięgu wpływu inwestycji. Numeryczną symulację dynamiki wód podziemnych przeprowadzono za pomocą oprogramowania Groundwater Vistas, w którym modułem obliczeniowym jest, pracujący w metodzie różnic skończonych, MODFLOW (McDonald, Harbaugh, 1988). Do obliczeń prędkości, czasów przepływu i w konsekwencji do wyznaczenia przebiegu linii prądu zastosowano program MODPATH (Pollock, 1988, 1994), bazujący na teorii modelu przepływu tłokowego.

DYSKRETYZACJA I WARUNKI BRZEGOWE MODELU

Aktywna powierzchnia modelu wynosiła około 58 km². Siatka dyskretyzacyjna składała się z 2 675 904 bloków obliczeniowych, z tego aktywnych było 2 104 861, rozłożonych w 11 warstwach numerycznych po 543 wiersze i 448 kolumn każda. Podstawowy krok siatki obliczeniowej wynosił 25×25 m, przy czym w strefach planowanych prac została ona zagęszczona dwukrotnie (krok 12,5×12,5 m) w celu właściwego odwzorowania obiektów inżynierskich.

Model zbudowano z 11 warstw obliczeniowych, które odwzorowywały przestrzennie 5 warstw litologiczno-stratigraficznych stwierdzonych w tym obszarze. Podział taki zastosowano, by umożliwić przedstawienie w trzech wymiarach kształt planowanych obiektów. Warstwy 1–3 odpowiadały pierwszemu poziomowi wodonośnemu złożonemu z piasków, warstwa nr 4 odzwierciedlała pyły i muły izolujące piaski holoceniowe od plejstoceniowych. Warstwy 5–8 odpowia-

dały położeniu drugiego poziomu utworów piaszczystych. Kolejne dwie warstwy miały symulować poziom podścielających glin. Położenie stropu warstwy nr 11 odzwierciedlało strop warstw kredowych, natomiast jego miąższość ograniczono na rzędnej -50 m n.p.m.

Granice modelu, a tym samym zewnętrzne warunki brzegowe, przyjęto następująco:

- na N zgodnie z linią brzegową Morza Bałtyckiego,
- na S zgodnie z wybrzeżem Zalewu Szczecińskiego,
- na W wzdłuż kanału torfowego oraz na linii prądu wyznaczonej poprzecznie do układu hydroizohips,
- na E wzdłuż linii prądu wyznaczonej poprzecznie do układu hydroizohips.

Rzeki odwzorowano za pomocą warunku brzegowego typu RIVER (III rodzaju), który pozwala w każdym bloku obliczeniowym odwzorować kontakt hydrauliczny wód podziemnych z powierzchniowymi i obliczyć przepływ wody Q_{rz} pomiędzy ciekami a sąsiadującą z nim warstwą wodonośną, co było szczególnie ważne w realizowanym zadaniu.

Świna obejmuje swym zasięgiem znaczną część modelowanego terenu i ze względu na bezpośredni kontakt z wodami podziemnymi ma decydujący wpływ na układ warunków hydrodynamicznych w rejonie badań. Została podzielona ze względu na różnice głębokości na cztery fragmenty: (1) tor wodny – głębokość toru wodnego wynosi ok. 10 m; (2) Stara Świna – głębokość uśredniono do 6 m; (3) ujście Świny – głębokość ok. 11–12 m; (4) Mulnik – głębokość ok. 6 m. Współczynnik filtracji osadów korytowych oszacowany został na około 0,1 m/d.

Świnę odwzorowano w warstwach 1 i 5, które odpowiadają stropowym partiom piasków holoceniowych i plejstoceniowych. Założenie takie dobrze przekłada się na warunki naturalne, co potwierdziły wyniki kalibracji. Duża powierzchnia rzeki spowodowała konieczność zróżnicowania parametrów nie tylko na jej długości, ale także względem szerokości, odwzorowanej kilkunastoma blokami w każdym wierszu modelu.

Ponadto odwzorowano Kanał Torfowy – niewielki ciek biegnący wzdłuż granicy polsko-niemieckiej, który stanowił jednocześnie zachodnią granicę modelu, a także Ognicę i Młyński Rów. Sieć mniejszych cieków i rowów, drenujących zwłaszcza tereny dolinne, symulowano oddzielnie używając pakietu obliczeniowego typu DRAIN (warunek brzegowy III rodzaju).

Infiltrację efektywną opadów atmosferycznych wprowadzono jako warunek brzegowy $Q = \text{const}$ w postaci stałego zasilania powierzchniowego. Z uwagi na położenie terenu w strefie drenażu doliny Świny, płynącej centralnie z południa na północ i łączącej Zalew Szczeciński z Bałtykiem, obszary zasilania występują na wysoczyznach wzdłuż zachodniej i wschodniej granicy modelu. Średnie zasilanie w obszarze zawiera się w przedziale od ok. $3,28 \times 10^{-4}$ do $4,66 \times 10^{-4}$ m/d, tzn. od 120 do ok. 170 mm/rok. Dla większości obszaru charakterystyczne są wartości z zakresu $3,78 \times 10^{-4}$ m/d, a lokalnie w dolinie Świny na obszarach podmokłości nawet $9,89 \times 10^{-5}$ m/d (36 mm/rok), natomiast w obszarach zewnętrznych, wysoczyznowych, są to najczęściej znacznie wyższe wartości w granicach od $6,2 \times 10^{-4}$ do $6,9 \times 10^{-4}$ m/d (do 250 mm/rok).

W modelu uwzględniono wszystkie czynne ujęcia wód podziemnych występujące na obszarze badań, które symulowano, zadając w nich wewnętrzne warunki brzegowe II rodzaju $Q = \text{const}$, jako przeliczoną średnią wydajność eksploatacyjną wód podziemnych w m^3/d .

PARAMETRY WEJŚCIOWE I KALIBRACJA MODELU

Numeryczny model filtracji wykonano jako quasi-przestrzenny, w którym kolejne warstwy litologiczne odwzorowano wprowadzając rzędne stropu i spągu w każdym bloku modelu. W tym celu wykonano numeryczne mapy izolinii powierzchni granicznych, które po przetworzeniu w systemie GIS zostały automatycznie zaimportowane do siatki dyskretyzacyjnej modelu. W kolejnym etapie otrzymane w ten sposób warstwy modelu zostały podzielone na kilka dodatkowych warstw numerycznych w celu lepszego odwzorowania przestrzennej struktury i możliwości symulacji planowanych obiektów technicznych. W kolejnych warstwach modelu wprowadzono wartości współczynnika filtracji według następującego schematu:

- dla utworów piaszczystych (wodonośne warstwy 1–3 i 5–8) – $k_1 = 17,28$ m/d;
- pyły i muły (nieciągła warstwa rozdzielająca nr 4) – $k_2 = 0,006912$ m/d;
- gliny (słabo przepuszczalne warstwy nr 9–10) – $k_3 = 0,000864$ m/d;
- margle (słabo przepuszczalna warstwa nr 11) – $k_4 = 0,0432$ m/d.

Do interpretacji prędkości przepływu wód podziemnych niezbędne były również wartości współczynnika porowatości: 0,15 – piaski, 0,05 – pyły, muły i gliny, 0,07 – margle.

W celu kalibracji modelu zastosowano tzw. metodę prób i błędów kalibracji (Wang, Anderson, 1982; Anderson, Wo-

essner, 1992; Gurwin, 2003, 2004). Warunki początkowe zadano na podstawie rozkładu hydroizohips z arkuszy Świnoujście i Międzyzdroje MhP (Matkowska, 1998a, b). Kalibrację przeprowadzono na podstawie danych o położeniu zwierciadła wód podziemnych z 38 studni wierconych i otworów badawczych i porównano je z wynikami obliczeń modelowych. Porównanie danych wykazało, że zdecydowana większość wyników zawiera się w granicach 0,01–0,5 m, a jedynie w 4–5 punktach różnica wynosiła ok. 1 m. Tym samym należy uznać, że osiągnięto optymalny wynik obliczeń, potwierdzający słuszność przyjętej koncepcji modelu i schematyzacji warunków hydrogeologicznych.

WYNIKI OBLICZEŃ MODELU WEDŁUG AKTUALNEGO STANU EKSPLOATACJI

Układ krążenia wód podziemnych odwzorowany na numerycznym modelu filtracji wykazał, że przepływ następuje od stref zasilania, znajdujących się na E i NW, w kierunku głównej bazy drenażu, którą stanowi Świna, płynąca przez centrum obszaru. Wysokości hydrauliczne zmieniają się od wartości 1,5–2,0 do 0–0,25 m n.p.m. w obszarze dolinnym. Zbliżone spadki hydrauliczne występują w NW części, gdzie układ hydroizohips w rejonie Świnoujścia wskazuje wartości w granicach 1,0–1,5 m n.p.m., a odpływ następuje na N w kierunku Bałtyku i na E w kierunku doliny Świny. Intensywny drenaż wód podziemnych zachodzi również w wyniku pracy dużego ujęcia Wydrzany. Naturalny układ hydrodynamiczny uległ znacznemu przekształceniu w radialny koncentryczny dopływ w kierunku studni ujęcia (fig. 3). Model wykazał, że przy aktualnym stanie eksploatacji zasięg leja depresji ma wpływ na zmianę układu strumieni przepływu w całej SW części obszaru, od Świny na E po granice Zalewu na SW. Wywołane depresje wynoszą od ok. 0,5 m w zewnętrznej strefie leja do 1,5–2,0 m w jego centrum. Z uwagi na przebieg eksploatacji i znaczenie ujęcia Wydrzany szczególną ostrożność należy zachować przy lokalizacji inwestycji w wariancie K3W1, gdyż zachodnia strona tunelu znajdzie się w obszarze oddziaływania tego ujęcia.

Wyniki obliczeń wykazały, że dopływ do obszaru jest formowany głównie od strony SW, gdzie skutek rozwoju leja depresji ujęcia Wydrzany następuje wzmożona infiltracja wód powierzchniowych ($1143 \text{ m}^3/\text{d}$). Odpływ następuje natomiast głównie na północ w kierunku Bałtyku i został oszacowany na $2895 \text{ m}^3/\text{d}$. Sumaryczne dopływy od zachodu i częściowo od NE z obszaru stref zasilania wynoszą $1776 \text{ m}^3/\text{d}$, a odpływ $2265 \text{ m}^3/\text{d}$. Największy udział w składowych odpływach ma drenaż przez rzeki ($10251 \text{ m}^3/\text{d}$), z czego zdecydowana większość przypada na Świnę. Infiltracja z cieków powierzchniowych wynosi przy tym $855 \text{ m}^3/\text{d}$. Niewysoka jest również wartość dopływów do małych cieków i rowów ($140 \text{ m}^3/\text{d}$). Pozostała ilość wód podziemnych po stronie ujemnych składników bilansu przypada na ujęcia i wynosi $5715 \text{ m}^3/\text{d}$. Zasilanie powierzchniowe, jako główny składnik przychodów w bilansie, według wytarowanych wartości wynosi ostatecznie $17\,331 \text{ m}^3/\text{d}$ (fig. 4).



- | | |
|--|--|
| hydroizohipsy
<i>hydroizohypses</i> | komórki obliczeniowe warunku brzegowego CONSTANT HEAD
<i>cells with CONSTANT HEAD boundary conditions</i> |
| studnie ujęciowe
<i>wells</i> | komórki obliczeniowe warunku brzegowego RIVER
<i>cells with RIVER boundary conditions</i> |
| wektory prędkości przepływu
<i>velocity vectors</i> | komórki obliczeniowe warunku brzegowego DRAIN
<i>cells with DRAIN boundary conditions</i> |
| komórki siatki obliczeniowej
<i>cells of grid</i> | komórki obliczeniowe warunku brzegowego GHB
<i>cells with GHB boundary conditions</i> |
| strefy ochronne ujęć
<i>water intake protection zones</i> | komórki obliczeniowe warunku brzegowego NO FLOW
<i>cells with NO FLOW boundary conditions</i> |
| granica arkuszy mapy 1:50 000
<i>boundaries of map sheets</i> | |
| planowany przebieg tunelu
<i>location of planned tunnel</i> | |

Fig. 3. Układ hydrodynamiczny w badanym obszarze według symulacji MODFLOW w warunkach bez wpływu planowanej inwestycji

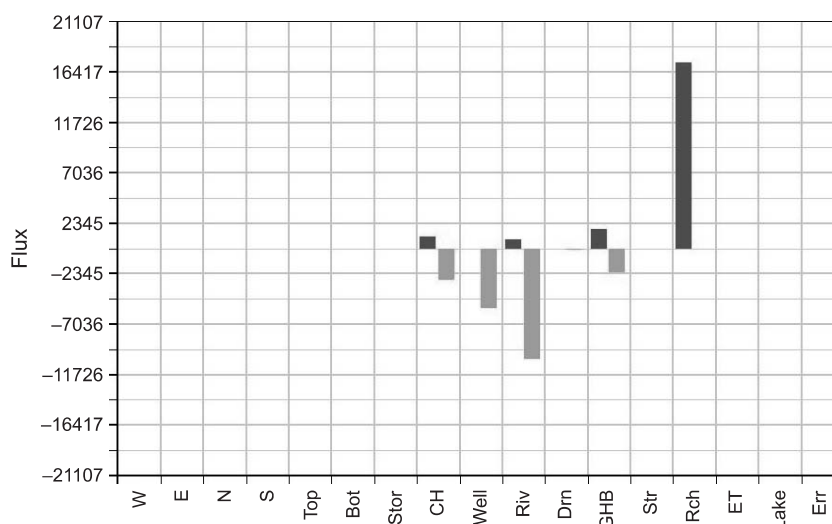
Groundwater flow system according to the MODFLOW simulation without influence of the investment

Fig. 4. Bilans przepływów dla całego obszaru modelu

CH – granica $H = \text{const}$, Well – pobór studni, Riv – zasilanie/drenaż z rzek, Drn – zasilanie/drenaż z małych cieków, GHB – granica $Q = f(H)$, Rch – zasilanie powierzchniowe

Water balance of the model domain

CH – $H = \text{const}$ boundary conditions, Well – well exploitation, Riv – infiltration/drainage of river, Drn – infiltration/drainage of small tributaries, GHB – $Q = f(H)$ boundary conditions, Rch – surface recharge



Obliczony na podstawie symulacji dla warunków ustalonych całkowity moduł odnawialności dla obszaru bilansowego (jako suma zewnętrznych dopływów: infiltracji i dopływów bocznych) wynosi $4,25 \text{ l/s km}^2$ ($15,3 \text{ m}^3/\text{h km}^2$). Zasoby odnawialne jako suma dopływów wynoszą $21\,332 \text{ m}^3/\text{d}$.

Wielkość tych zasobów zależy przede wszystkim od infiltracji efektywnej, która stanowi 85% całkowitej odnawialności wód podziemnych. W związku z powyższym moduł zasilania z infiltracji ustalono na $3,46 \text{ l/s km}^2$.

WPLYW BUDOWY TUNELU NA DYNAMIKĘ WÓD PODZIEMNYCH

Po zapoznaniu się z projektami poszczególnych wariantów przeprawy i przeanalizowaniu technologii używanej do drążenia tunelu przyjęto, że etapem prac, podczas którego zasoby wodne będą najbardziej narażone na negatywne oddziaływanie, jest etap wstępnego obniżenia zwierciadła wody, umożliwiającą wykonanie ścianek szczelnych minimalizujących dopływ boczny do wyrobiska. Drugim etapem prac będzie wybranie gruntu pomiędzy ścian metodą podwodną i zabetonowanie dna powstałej w ten sposób rampy. Dopiero po wykonaniu tych czynności odpompuje się zgromadzoną wodę. Metoda ta zmniejsza znacząco konieczność odwadniania, a przez to wpływ na dynamikę wód podziemnych. Etap prac drążeniowych również nie będzie miał wpływu na naturalny (czy wymuszony przez ujęcia) przepływ wód, ponieważ dopływ wody do wyrobiska będzie minimalizowany poprzez wykonywanie na bieżąco uszczelniania ścianek bentonitem i usuwanie go dopiero po wstępnym zabetonowaniu ścian tunelu. Również od strony przodka nie przewiduje się dopływów, ponieważ tarcza używana do budowy tunelu wytwarza przeciwcisnienie, które utrzymuje wody podziemne poza obszarem drążenia. Trudno jest oszacować dopływ do wyrobiska w trakcie drążenia tunelu, gdyż w dużej mierze zależy on od fachowości prowadzonych prac, jednakże metoda przyjęta do ich wykonania znacznie ograniczy dopływ do przekopu, co spowoduje, że w skali modelu będą one minimalne, a przez to nie zostały uwzględnione w niniejszym opracowaniu. Wykonano także symulację przepływu strumienia wód podziemnych wokół ramp zjazdowych, które ze względu na swoje rozmiary i głęboką zabu-

dowę ze ścianek szczelnych mogą tamować swobodny przepływ wód. Opracowany model można będzie w przyszłości przebudować w taki sposób, by mieć możliwość symulacji lokalnie zachodzących zmian hydrodynamicznych, których na tym etapie nie sposób przewidzieć.

W wyniku odwzorowania na modelu planowanych obiektów technicznych, w zależności od przyjętego wariantu przebiegu tunelu, nastąpią istotne zmiany w układzie hydrodynamicznym w obszarze bezpośrednio przylegającym do tych obiektów.

Symulacja dla planu budowy wyrobisk zgodnego z wariantem K2W2 wykazała powstanie obniżenia zwierciadła wód podziemnych wokół wyrobiska wskutek zakładanych dopływów przez jego dno (w układzie pionowym założono zabudowę ściankami szczelnymi). W rejonie wyrobiska spadki hydrauliczne zmieniają się zgodnie z rozkładem hydroizohips od wartości $0,25$ do $-1,0 \text{ m n.p.m.}$ Koncentryczny radialny układ strumieni wskazuje na dopływy od strony wschodniej, jednak wywołany gradient hydrauliczny uruchomi również dopływy spod koryta Świny.

W najbardziej newralgicznym, z punktu widzenia ochrony ujęć dla Świnoujścia, wariantcie K3W1 (fig. 5) nastąpiło wyraźne obniżenie swobodnego zwierciadła wód podziemnych zarówno po zachodniej, jak też po wschodniej stronie Świny (fig. 6). Powstały dwa równoleżnikowo wyciągnięte elipsoidalne leje depresji, wywołane obniżeniem zwierciadła wody w obszarze wokół budowanych prostokątnych wyrobisk. Wykazana została wyraźna zmiana lokalnych kierunków strumieni wód podziemnych, wskazująca na intensywniejszy dopływ

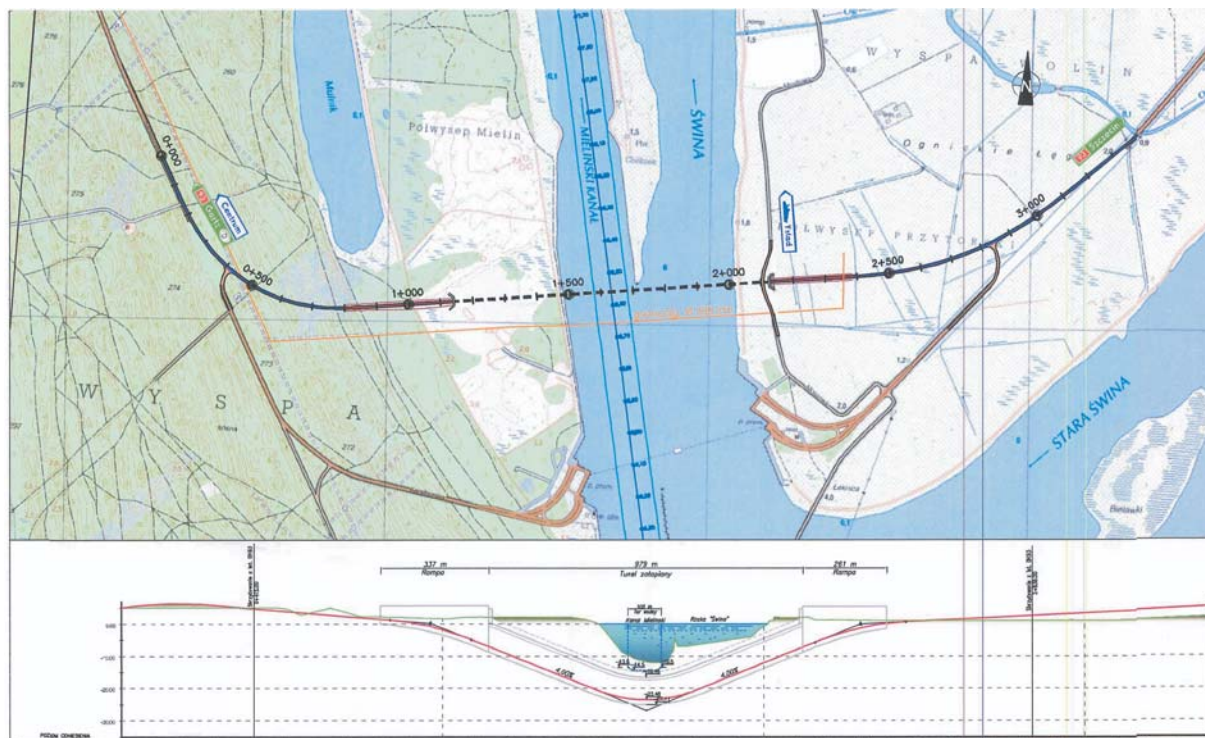


Fig. 5. Planowany przebieg tunelu zgodnie z wariantem K3W1 (DAMART s.c., 2008)

Location of the tunnel according to option K3W1 (after DAMART s.c., 2008)

wód z koryta Świny. W tych warunkach hydrodynamicznych wykształcona została granica hydrauliczna pomiędzy strefami wpływu lejów depresji ujęcia Wydrzany i zachodniego wkopu na poziomie ok. $-0,5$ m n.p.m. Analiza przestrzennego rozkładu linii prądu potwierdziła, że jeśli eksploatacja ujęcia pozostanie na tym samym poziomie, to nie ma możliwości bezpośredniego przedostania się potencjalnie zanieczyszczonych wód z rejonu wyrobiska do studni ujęcia. Należy jednak w trakcie prowadzenia robót kontrolować wydajności, z jakimi pracuje ujęcie, aby nie dopuścić do zmian hydrodynamicznych i do wzrostu dopływów z obszaru budowy. Po wschodniej stronie sytuacja jest zbliżona do wariantu K2W2, kształt leja depresji jest od strony Świny zmieniony wskutek oddziaływania granicy zasilającej, przez co spadki hydrauliczne i prędkości filtracji są wyższe niż po wschodniej stronie zbieżnego radialnego układu hydrodynamicznego.

Na podstawie symulacji prognostycznych obliczono bilans przepływów w przypadku oddziaływania różnych wariantów planowanej inwestycji. Największe potencjalne zagrożenie stanowi wariant K3W1, toteż szczegółowa analiza zmian elementów bilansu jest w tym przypadku najważniejsza.

WPLYW WARIANTÓW LOKALIZACJI NA UKŁAD KRAŻENIA I ZASOBY WÓD PODZIEMNYCH

W przypadku wariantu K1W1 wyniki modelowania nie wykazały zmian położenia zwierciadła wody, a to ze względu na dużą różnicę rzędnych pomiędzy powierzchnią terenu a zwierciadłem wód podziemnych. Przy założeniu koniecz-

ności osuszenia terenu do głębokości $1,5$ – 2 m nie przewiduje się konieczności odwadniania planowanych wkopów. Należy jednak mieć na uwadze stan wody w rzece i możliwość wystąpienia intensywnych opadów, co spowoduje podniesienie zwierciadła wód podziemnych i może być przyczyną niewielkich dopływów, zwłaszcza po wschodniej stronie rzeki, gdzie rzędne terenu oscylują od 2 do $2,5$ m n.p.m. Wielkość ewentualnych dopływów z tej strony nie powinna przekroczyć 5 m³/h. Zmiany w układzie hydrodynamicznym, ze względu na minimalny zasięg i dużą odległość od ujęć wody pitnej, nie będą miały znaczącego wpływu na zasoby wód podziemnych.

Planowane usytuowanie ramp zjazdowych nie będzie stanowiło istotnego czynnika modyfikującego kierunki przepływu wód w tym obszarze. W przypadku rampy po zachodniej stronie rzeki obserwuje się nieznaczne odchylenie kierunku spływu wód w stronę SE. Nie spowoduje to jednak wpływu na ilościowe ani jakościowe kryterium formowania się zasobów ujęcia Wydrzany. Rampa po wschodniej stronie rzeki ze względu na orientację zgodną z kierunkami spływu nie będzie miała wpływu na przepływ wód podziemnych.

W przypadku wariantu K2W2 po wschodniej stronie rzeki zamodelowano obniżenie zwierciadła do rzędnej ok. $-0,5$ m. Natomiast po stronie zachodniej, ze względu na wyższy poziom terenu, zamodelowano obniżenie zwierciadła do rzędnej 2 m.

W miejscu planowanej lokalizacji zachodniej rampy zjazdowej znajdują się wydmy o wysokościach bezwzględnych 3 – 5 m, natomiast zwierciadło kształtuje się na poziomie nieco poniżej 0 m n.p.m. Przy tym założeniu i wymaganym osu-

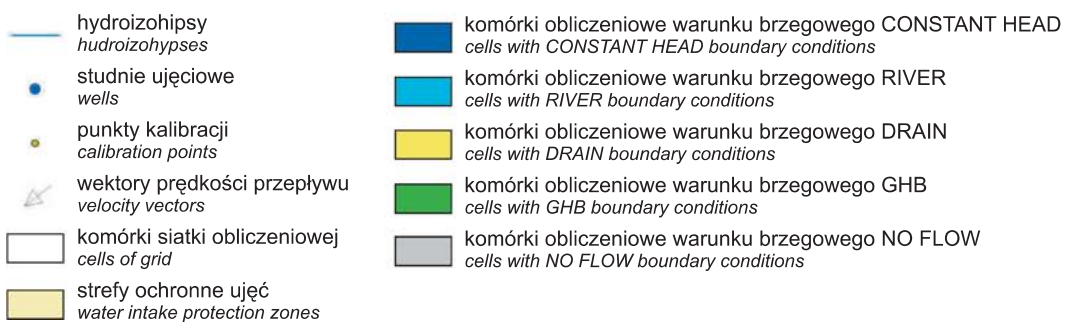


Fig. 6. Mapa hydroizohips i wektory prędkości z symulacji MODFLOW/MODPATH dla odwodnienia w wariantcie K3W1

Map of head contour lines and velocity vectors according to the MODFLOW/MODPATH simulation for K3W1 option

szeniu terenu do głębokości ok. 1,5–2 m nie przewiduje się konieczności prowadzenia prac odwodnieniowych.

Wpływ tunelu na kierunki przepływu wód podziemnych najwyraźniej da się zauważyć po zachodniej stronie rzeki, gdzie rampa zjazdowa jest umiejscowiona poprzecznie do kierunków przepływu wód. Stanowi ona w tym miejscu szczelną barierę, która wymusza odchylenie strumienia wód podziemnych w kierunkach zachodnim i południowym. Wyniki modelowania wykazują jednak, że zasięg tego oddziaływania będzie niewielki i obserwowany do odległości maks. 250 m od rampy.

Całkowite dopływy lateralne, ze względu na dodatkowe wymuszenia związane z pracami przy wyrobiskach, uległy pewnym zmianom. Przyrost dopływu od strony SW wynosi przy tym wariancie 1170 m³/d (wzrost 3,5%). Odpływ ku północy, w kierunku Bałtyku, uległ natomiast obniżeniu w granicach 3,5% i jest równy 2916 m³/d. Również sumaryczne dopływy od zachodu i częściowo od NE z obszaru stref zasilania uległy niewielkim korektom i wynoszą 2102 m³/d, a odpływ 2308 m³/d.

Drenaż przez rzeki ma największy wpływ na bilans wodny i uległ on zmniejszeniu do 9620 m³/d, czyli nieco ponad 5% w stosunku do stanu wyjściowego. Jednocześnie nastąpił przyrost infiltracji z cieków powierzchniowych do poziomu 930 m³/d. Wartość dopływów do małych cieków i rowów nie uległa zasadniczym zmianom. W ogólnym bilansie nastąpił wzrost tego składnika do poziomu 901 m³/d, co jest wynikiem odwzorowania również wyrobisk warunkiem brzegowym III rodzaju. Pozostała ilość wód podziemnych po stronie ujemnych składników bilansu przypada na eksploatację ujęć. Uzyskane dopływy do warunku brzegowego typu DRAIN, którym symulowano wkopy, wynoszą ok. 761 m³/d i na tej podstawie można spodziewać się dopływu wód po wschodniej stronie rzeki w granicach 35 m³/h. W zależności od przyjętej ostatecznie koncepcji pogłębiania wyrobiska wartość ta może ulec zmianie.

WPLYW WARIANTU K3W1 NA ZASOBY WÓD PODZIEMNYCH

Jak już wspomniano, największe potencjalne zagrożenie stanowi budowa wariantu K3W1 (fig. 4). Zakłada on kon-

cepcję tunelu zatapianego, a to wiąże się z usunięciem osadów koryta Świny na przebiegu tunelu. Prace te zasymulowano zmianą współczynnika filtracji osadów korytowych rejonu planowanych prac na równy współczynnikowi filtracji warstw otaczających. Wyniki przeprowadzonych obliczeń wykazały, że w takim przypadku należy się liczyć z dopływami z rzeki zwiększonymi o ok. 85 m³/h. Należy także zwrócić szczególną uwagę na warunki hydrodynamiczne kształtujące się po zachodniej stronie rzeki ze względu na bliskość ujęcia Wydrzany.

W zakresie całkowitych dopływów bocznych do obszaru nastąpiły niewielkie zmiany. Zanotowano nieznaczny przyrost dopływu od strony SW do obszaru oddziaływania ujęcia Wydrzany, gdzie infiltracja wód powierzchniowych wynosi przy tym wariancie 1203 m³/d (wzrost 5%). Odpływ ku północy, w kierunku Bałtyku, pozostał, zgodnie z oczekiwaniami, niemal identyczny i jest równy 2864 m³/d. Również sumaryczne dopływy od zachodu i częściowo od NE z obszaru stref zasilania uległy niewielkim korektom i wynoszą 1918 m³/d, a odpływ 2189 m³/d.

Największy udział w składowych odpływach przypada niezmiennie na drenaż przez rzeki, ale uległ on redukcji do 9340 m³/d, a zatem o 10% w stosunku do stanu wyjściowego, a zmiana ta dotyczy Świny. Jednocześnie nastąpił oczekiwany przyrost infiltracji z cieków powierzchniowych do poziomu 2233 m³/d, a zatem ok. 3-krotnie w stosunku do stanu wyjściowego. Tak duża zmiana będzie skutkować mieszaniem się wód ze Świny z wodami eksploatowanej warstwy wodonośnej, a przez to może doprowadzić do pogorszenia jakości wód na ujęciu. Wartość dopływów do małych cieków i rowów nie uległa zmianom, nastąpił niewielki wzrost do 2592 m³/d. Pozostała ilość wód podziemnych po stronie ujemnych składników bilansu przypada na eksploatację ujęć (5726 m³/d). Uzyskane dopływy do warunku brzegowego, którym symulowano wkopy udostępniające, wynoszą 2592 m³/d i na wyrobisko po stronie zachodniej przypada dopływ w granicach 30 m³/h, natomiast po stronie wschodniej ok. 65 m³/h. W zależności od przyjętej ostatecznie koncepcji pogłębiania wyrobiska wartość ta może ulec zmianie, jednak w przyjętych wstępnie założeniach, uwzględniając dopływ przez dno, należy się liczyć z koniecznością odprowadzenia właśnie takiej ilości dopływów w trakcie prowadzenia robót.

PODSUMOWANIE

Model krążenia wód podziemnych w rejonie Świny, pod którą planowana jest przeprawa tunelem, został opracowany na podstawie baz danych, w tym banku HYDRO, map geologicznych i hydrogeologicznych (SMGP, MhP, PPW), opracowań geoinżynierskich i innych materiałów archiwalnych. Warstwy geoinformacyjne przygotowane w systemie GIS po połączeniu z numerycznym modelem terenu dały podstawę dla przestrzennego odwzorowania struktury, warunków brzegowych i rozkładu parametrów modelu.

Największe znaczenie w świetle ilościowego i jakościowego wpływu na wody podziemne ma lokalizacja wariantu budowy K3W1. W odtworzonych na numerycznym modelu warunkach hydrodynamicznych stwierdzono rozdział strumieni filtracji zgodnie z przebiegiem granicy hydraulicznej pomiędzy strefami wpływu ujęcia Wydrzany i zachodniego wkopu tunelu. Analiza przestrzennego rozkładu linii prądu potwierdziła, że jeśli eksploatacja ujęcia pozostanie na poziomie ostatnich lat, to nie ma możliwości przedostania się

potencjalnie zanieczyszczonych wód z rejonu wyrobiska do studni ujęcia. Należy jednak w trakcie prowadzenia robót bezwzględnie kontrolować (zwłaszcza w okresie letnim przy wzmożonym zapotrzebowaniu na wodę) wydajności uzyskiwanych w ujęciu Wydrzany i w przypadku znaczącego wzrostu zaleca się konsultację i wykonanie prognozy w zmienionych warunkach na modelu. Biorąc pod uwagę, że roboty w zachodnim wyrobisku będą prowadzone w strefie oddziaływania ujęcia, w przypadku wyboru tego wariantu należy w szczególności sposób zabezpieczyć obszar robót przed przedostaniem się do środowiska zanieczyszczeń, np. substancji ropopochodnych służących do napędu i smarowania sprzętu. Wszelkie awarie powinny być natychmiast zgłaszać dyrekcji ZWiK w Świnoujściu.

Należy podkreślić, że zagrożenie istnieje zwłaszcza na etapie realizacji budowy. Po zakończeniu, na etapie użytko-

wania, zakłada się, że wybetonowane dno rampy dojazdowej będzie szczelne, z odpowiednio zaprojektowanym systemem drenażu i odpływu dla odprowadzania ścieków i nawet ewentualne awarie nie będą mieć bezpośredniego wpływu na środowisko wód podziemnych.

Wyniki przeprowadzonego modelowania wykazały przy tym, że usytuowanie samego wyrobiska tunelu w każdym z trzech wariantów nie wpłynie znacząco na kierunki przepływu wód i nie spowoduje ograniczenia dopływu do ujęć.

Najbardziej korzystnym rozwiązaniem w świetle kryterium ilościowego i jakościowego zasobów jest wybór wariantu K1W1. Lokalizacja ta jest o tyle sprzyjająca, że różnica między rzędnymi terenu a poziomem wód podziemnych zminimalizuje konieczność odwodnienia, a przez to stan zasobów pozostanie nienaruszony.

LITERATURA

- ANDERSON M., WOESSNER W., 1992 – Applied groundwater modeling. Academic Press, Inc., London.
- DAMART s.c., 2008 – Studium techniczno-ekonomiczno-środowiskowe dotyczące stałego połączenia wysp Wolin i Uznam.
- GURWIN J., 2003 – Dane wejściowe a kalibracja numerycznego modelu filtracji. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*, t. 11, cz. 1: 301–308. Gdańsk.
- GURWIN J., 2004 – Problem kalibracji i analizy niepewności numerycznego modelu filtracji. *W: Hydrogeologia. Modelowanie przepływu wód podziemnych* (red. J. Gurwin, S. Staško). *Acta Univ. Wratisl.*, 2729: 47–57.
- GURWIN J., SERAFIN R., 2008 – Budowa przestrzennych modeli koncepcyjnych GZWP w systemach GIS zintegrowanych z MODFLOW. *Biul. Państw. Inst. Geol., Hydrogeologia*, 431: 49–59.
- MATKOWSKA Z., 1998a – Mapa hydrogeologiczna Polski (MhP) 1:50 000, ark. Świnoujście. CAG Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- MATKOWSKA Z., 1998b – Mapa hydrogeologiczna Polski (MhP) 1:50 000, ark. Międzyzdroje. CAG Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- McDONALD M.G., HARBAUGH A.W., 1988 – A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey Open-File Report, Washington.
- POLLOCK D.W., 1988 – Semianalytical computation of path lines for finite difference models. *Ground Water*, 26, 6: 743–750.
- POLLOCK D.W., 1994 – User's guide for MODPATH, version 3: a particle tracking post-processing package for MODFLOW the U.S. Geological Survey finite-difference groundwater flow model. Reston, VA. U.S. Geological Survey.
- WANG H.F., ANDERSON M.P., 1982 – Introduction to groundwater modeling. W.H. Freeman and Co., San Francisco.

SUMMARY

The area of research is located in the north-western part of Poland between the Szczecin Lagoon to the south and Baltic Sea to the north. The problem was to find the best option of tunnel crossing through the Świna River between Uznam and Wolin islands considering the influence of such an engineering construction on groundwater environment. The investigations were conducted to establish a flow system, groundwater balance within the area surrounding the tunnel, using MODFLOW package in configuration of the Groundwater Vistas 5.0. The three possible variants of tunnel location were checked whether the tunnel could generate any influence on the Wydrzany water intake which is located approx. 1 km to the west. First a model calibration was conducted for natural conditions and later on the prediction simulations were

started. According to the most probable variant called K3W1 it was established that groundwater surface decrease due to digging of opening pits could generate a new local groundwater divide at -0.5 m a.s.l. between overlaid cones of depression being involved by the western pit and the intake. Analyzing the water balance results it was noted that increase of infiltration rate from the Świna River was 3 times higher than in natural conditions and equals to 2233 m³/d. Simulated total groundwater inflow to the pits amounts to 2592 m³/d and for the western pit achieves 30 m³/h and to the eastern pit approx. 65 m³/h. What is the most crucial solution that dewatering of the construction has no influence on normal exploitation of the Wydrzany water intake.