

OCENA ZAGROŻENIA WÓD PODZIEMNYCH TERENÓW WODONOŚNYCH WROCŁAWIA JONAMI NIKLU I POTASU W ŚWIETLE BADAŃ MODELOWYCH

RISK ASSESSMENT OF WROCŁAW WATER-BEARING AREA GROUNDWATER BY NICKEL AND POTASSIUM IONS IN THE LIGHT OF MODEL STUDIES

MAGDALENA MODELSKA¹, MAREK WCISŁO¹

Abstrakt. Celem prezentowanych badań była ocena zagrożenia ze strony intensywnie zagospodarowanych przemysłowo i rolniczo obszarów Wrocławia dla wód podziemnych sąsiadujących z nimi terenów wodonośnych. Na skutek przeprowadzonych prac terenowych i laboratoryjnych zdiagnozowano potencjalne ryzyko związane z napływem wód o podwyższonych stężeniach jonów niklu i potasu. Dla metali tych wykonano model migracji masy w wodach podziemnych. Obejmował on okres 10 lat, zakładając charakter zanieczyszczenia incydentalny – niklem i ciągle – potasem, na obszarach poza terenami wodonośnymi. W wyniku prac modelowych wykazano, że w badanym okresie nie dojdzie do przemieszczenia się jonów niklu w kierunku terenów wodonośnych. Możliwa jest nawet redukcja stężenia tego metalu na skutek procesu sorpcji. W toku prac modelowych stwierdzono możliwość niewielkiego zwiększenia stężeń oraz migracji jonów potasu, szczególnie z sąsiadującego z terenami wodonośnymi cieku Zielona, nie stanowi ona jednak zagrożenia dla ujęć terenów wodonośnych Wrocławia.

Słowa kluczowe: modelowanie migracji zanieczyszczeń, wody podziemne, nikiel, potas, tereny wodonośne, Wrocław.

Abstract. The aim of this study was to risk assessment from the intensely developed industrial and agricultural areas of Wrocław for groundwater of neighboring water-bearing area. As a result of field and laboratory work, a potential risk connected with the inflow of waters with increased concentrations of nickel and potassium ions was diagnosed. For these metals mass transport model in groundwater was performed. It covered a period of 10 years assuming the incidental nature of nickel contamination and continuous potassium pollution. As a result of modeling works, it was shown that in the studied period there will be no transport of nickel ions in the aquifer towards water-bearing area. It is even possible to reduce the concentrations of this metal due to the sorption process. During the modeling was identified also possible increase of concentration and migration of potassium ions, especially from the Zielona stream, however, it is not a threat to the water intakes of Wrocław.

Key words: pollution transport modelling, groundwater, nickel, potassium, water-bearing area, Wrocław.

WSTĘP

Jednym z dwóch najważniejszych ujęć zaopatrujących w wodę aglomerację wrocławską jest ujęcie Na Grobli. Ujęcie to prowadzi eksploatację barierami studni oraz studnią promienistą a zasilanie zachodzi na obszarze tzw. terenów wodonośnych. Tereny te, zlokalizowane w obszarze miasta i tuż przy jego granicy, podlegają szczególnej ochronie

zwłaszcza w zakresie obecności zanieczyszczeń mogących zagrażać jakości wód ujęcia. Sąsiadują one jednak bezpośrednio z silnie zagospodarowanymi obszarami miasta, gdzie prowadzona jest działalność komunalna, przemysłowa i rolnicza (ogródki działkowe, tereny uprawne). Na podstawie dotychczasowych wyników badań modelowych i prac archiwalnych (Staško i in., 2016) zwrócono uwagę na możliwość dopływu na tereny wodonośne zanieczyszczeń z rejo-

¹ Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych, pl. M. Borna 9, 50-204 Wrocław; e-mail: magdalena.modelska@uwr.edu.pl, marek.wcislo@uwr.edu.pl.

nu osiedla Księżę Małe, Brochów oraz miejscowości Siechnice i Radwanice (z południa i zachodu) oraz zagrożenie ze strony cieku Zielona. W związku z tym w październiku 2018 r. przeprowadzono badania na obszarze potencjalnego zagrożenia, obejmujące ocenę składu chemicznego wód podziemnych w szerokim zakresie połączone z kartowaniem hydrogeologicznym (weryfikacja położenia zwierciadła wód podziemnych) oraz sozologicznym. Uzyskane wyniki pozwoliły stwierdzić, że wśród oznaczonych wskaźników chemicznych potencjalnie największymi wzrostami stężeń mogą się charakteryzować jony dwóch metali: niklu i potasu. Dla metali tych zdecydowano się wykonać modelowanie migracji w celu oceny realnego zagrożenia dla terenów wodonośnych Wrocławia.

OBSZAR BADAŃ

Obszar badań obejmuje tereny wodonośne ujęć infiltracyjnych miasta Wrocławia usytuowane w większości w obrębie gminy miejskiej oraz osiedla sąsiadujące z nimi od południa i południowego zachodu (fig. 1). Główną rzeką oddziaływającą na obszar badań jest Odra oraz płynąca przez jego centrum rzeka Oława wraz z ciekami Zielona, Katarzynką oraz Brochówką. W rejonie tym stwierdza się ponadto gęstą sieć kanałów, rowów oraz stawów infiltracyjnych stanowiących główne ogniwo w systemie zaopatrzenia aglomeracji Wrocławskiej w wodę pitną.

Warunki hydrogeologiczne obszaru badań są dobrze rozpoznane, zwłaszcza w obrębie terenów wodonośnych Wrocławia (Morasiewicz, 1970; Staško i in., 2015; Wojewoda i in., 2016; Staško i in., 2016). Ujęcia infiltracyjne bazują na pierwszym poziomie wodonośnym, wykształconym w postaci aluwialnych piasków średnio- i gruboziarnistych o miąższości od 6,4–8,2 m; lokalnie do 13,4 m (Wojewoda i in., 2016). Warstwa wodonośna ma dwudzielny charakter: w jej partiach spągowych dominują pospółki i żwiry a w wyższych (stropowych) – piaski od drobno- i średnioziarniste. Ponadto na znacznej powierzchni terenu występują niewielkie pokrywy namulów, osadów glin piaszczystych, ilów oraz nasypy antropogeniczne. Pierwszy (czwartorzędowy) poziom wodonośny izolowany jest od spągu kilku–kilkunastometrową sekwencją osadów gliniastych. Zwierciadło wód ma charakter swobodny, lokalnie napięty i stabilizuje się na głębokościach od 0,8–1,2 m w dolinach Oławy, do 2–3,5 m w rejonach podniesionych. Wyniki obserwacji terenowych i badań modelowych (Staško i in., 2015) wskazują na to, że generalny przepływ wód podziemnych następuje zgodnie z biegiem doliny rzeki Oława i ku Odrze.

W rejonie badań zidentyfikowano kilka obszarów poza terenami wodonośnymi, które stanowią potencjalne zagrożenie dla jakości wód podziemnych. Są to głównie powierzchniowe ogniska zanieczyszczeń m.in. była zajezdnia MPK przy ul. Opolskiej, tereny ogrodów działkowych, cmentarze, droga krajowa 94 oraz linia kolejowa 277 wraz ze stacją przeładunkową Wrocław-Brochów.

METODY BADAŃ

Podstawą oceny potencjalnego zagrożenia dla jakości wód podziemnych jonami potasu i niklu było 13 analiz chemicznych wód podziemnych (11 analiz) i powierzchniowych (2 analizy) w punktach zlokalizowanych w obszarze dopływu wód do terenów wodonośnych. Analizy wykonano w laboratorium MPWiK Wrocław metodą ICP OES (tab. 1).

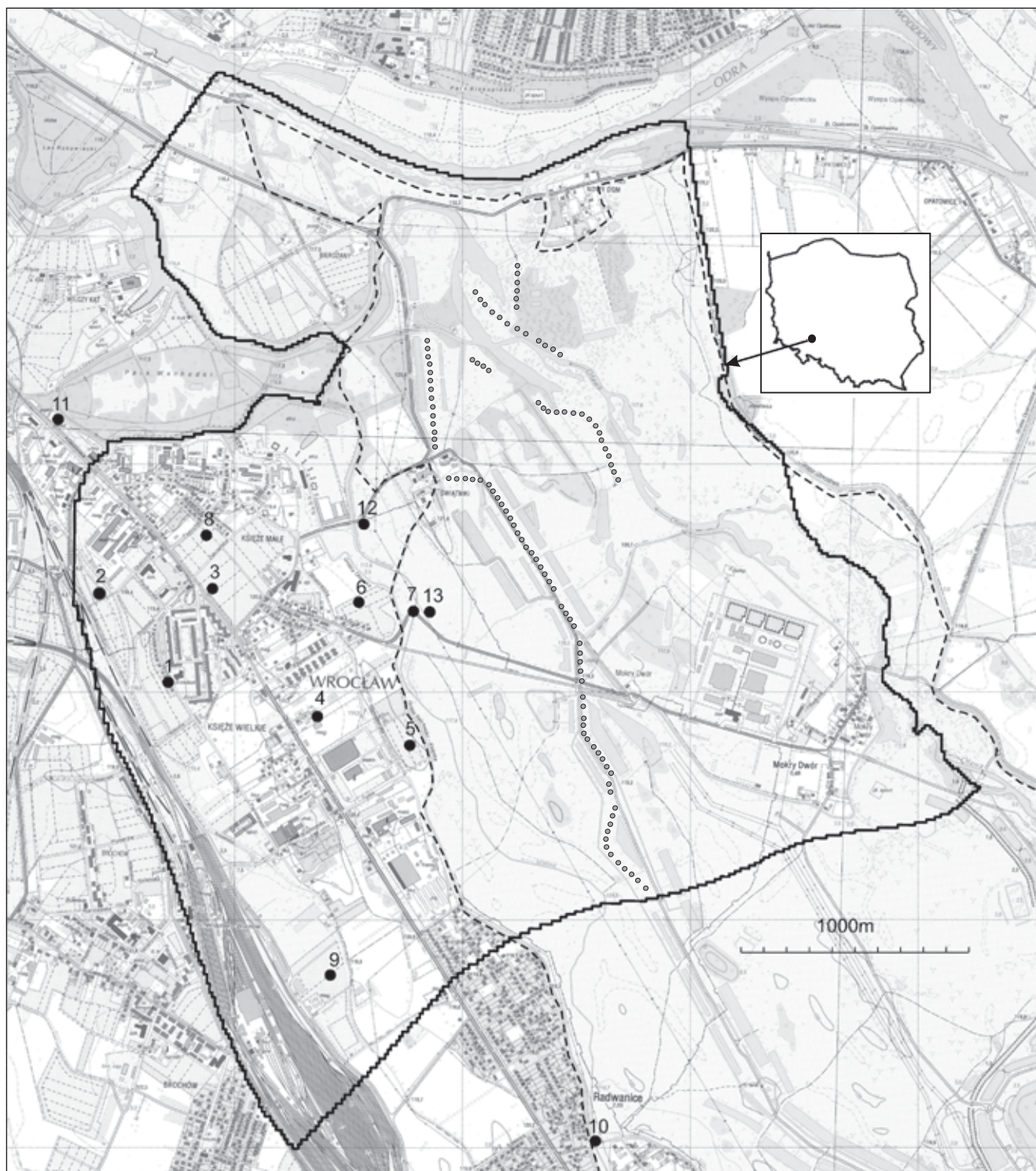
Interpretacja prędkości i kierunków przemieszczania stężeń badanych jonów bazowała na modelu dynamicznym oraz modelu transportu masy zrealizowanym w oprogramowaniu Visual Modflow 4.3. Warunki brzegowe zewnętrzne przy zachodniej granicy modelu wprowadzono na podstawie mapy zwierciadła pierwszego poziomu wodonośnego, weryfikując ją o relatywnie niskie stany wód potwierdzone podczas kartowania hydrogeologicznego (20.09–08.10.2018). Po stronie wschodniej i północnej granicę stanowią wody powierzchniowe, na południu – ma ona sztuczny charakter (fig. 1). Bardziej szczegółowy opis modelu hydrodynamicznego można znaleźć w publikacji Weisło i in., (2016). Ze względu na suchy okres pozostałe dane zmiennie-czasowe do modelu (wydajności studni, poziomy w piezometrach) przyjęto z okresu 1 lipiec–30 listopad 2018 r.

Przy modelowaniu migracji potasu i niklu posłużono się modelem filtracji nieustalanej umożliwiającym prognozowanie przemieszczania stężeń w czasie i przestrzeni. Potas i nikiel należą do jonów podlegających głównie procesom przenoszenia adwekcyjnego w strumieniu wód podziemnych, dyspersji hydrodynamicznej oraz opóźnieniu związanemu z procesem sorpcji. Kluczowym zjawiskiem jest więc podział stężeń substancji w sorbencie i płynie charakteryzowany przez izotermy sorpcji. Założono przebieg sorpcji zgodnie z modelem (izoterma) Freundlicha (Małecki i in., 2006). Stężenie początkowe wprowadzono zgodnie ze zbadanym rozkładem stężeń analizowanych metali (fig. 2). Współczynnik b izotermy Freundlicha zadano na poziomie 1, co jest równoważne z zastosowaniem izotermy liniowej. Przy relatywnie niskich stężeniach przebieg izotermy liniowej i Freundlicha mają zbliżony przebieg, a zastosowanie takiego rozwiązania umożliwi w przyszłości zmianę parametru b . Stałą dyspersji podłużnej wprowadzono na podstawie danych literaturowych $D_L = 100$ m oraz poprzecznej $D_p = D_L/10$ (Małecki i in., 2006).

WYNIKI I DYSKUSJA

Analizując skład chemiczny wód podziemnych i wód cieków w obszarze ich dopływu do terenów wodonośnych, wykazano podwyższone stężenia dwóch metali: potasu i niklu (tab. 1, fig. 2).

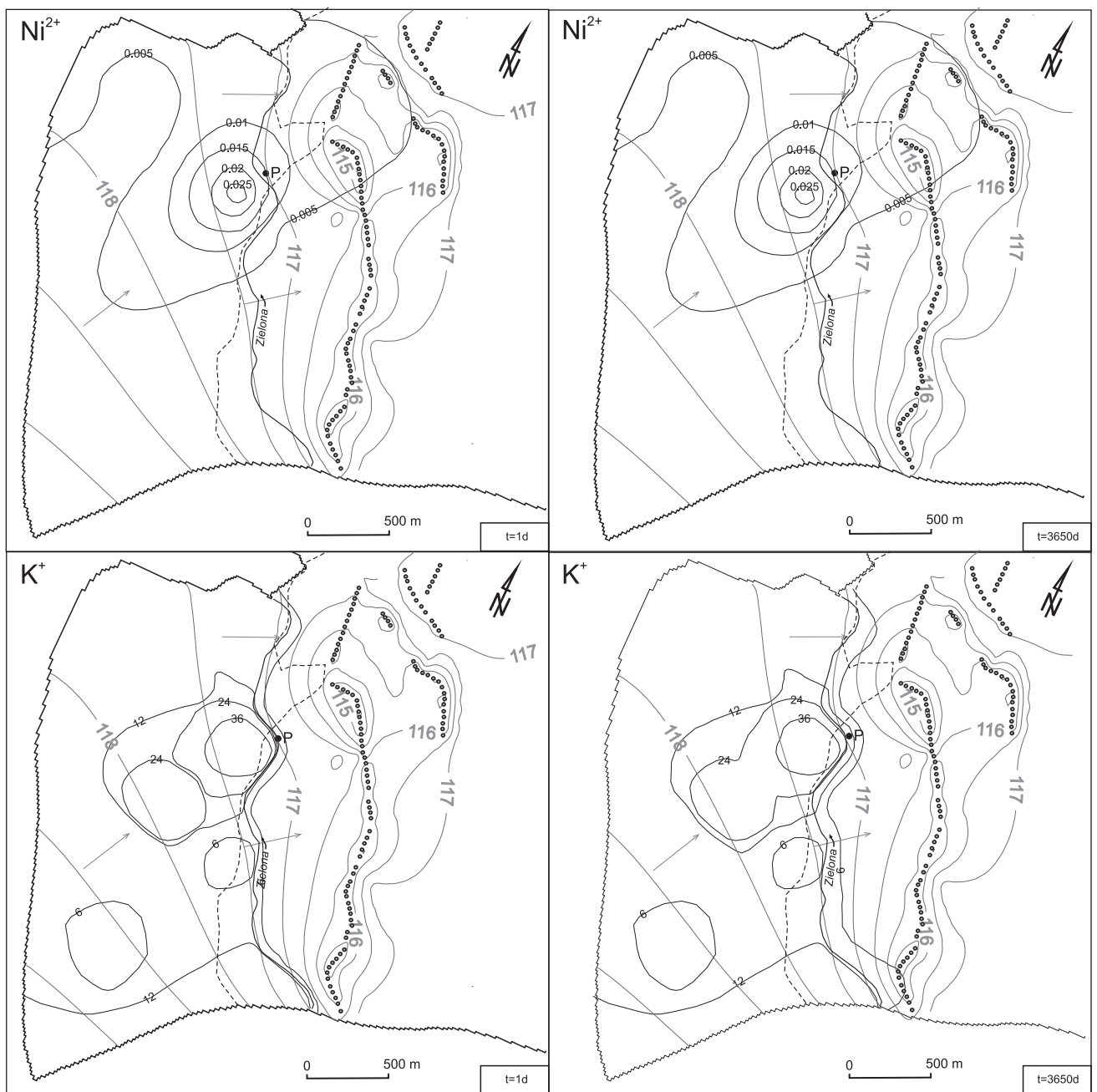
W przypadku niklu, mimo że podwyższone jego zawartości (klasa V jakości wód) wykazano jedynie w jednym punkcie badawczym to pozostałe badane wody wykazywały z reguły przekroczenie naturalnego tła hydrogeochemicznego kształtującego się na poziomie 1–5 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ (Witczak i in.,



- granica modelu
model boundary
- — — granica terenów wodonośnych
water-bearing area boundary
- 9 punkty poboru próbek
sample collection sites
- studnie ujęcia infiltracyjnego
infiltration wells

Fig. 1. Lokalizacja obszaru badań

Location of the study area



- | | | | | | |
|-------|------------------------------------------------------------------|-------|------------------------------------------------------------|------|-------------------------------------------------------|
| → | kierunek przepływu wód podziemnych
groundwater flow direction | o | studnie ujęcia infiltracyjnego
infiltration well points | —12— | izolinie stężenia (mg/l)
isoconcentration contours |
| — | granica modelu
model boundary | —117— | hydroizohipsy
groundwater table contours | ●P | fikcyjny piezometr
fictitious piezometer |
| - - - | granica terenów wodnośnych
boundary of water-bearing area | | | | |

Fig. 2. Rozkłady stężeń niklu i potasu w wodach podziemnych w 1 i 365 dobie symulacji

Distributions of nickel and potassium concentrations in groundwater on day 1 and day 365 of simulation

Tabela 1

Charakterystyka punktów badawczych wraz z wynikami analiz stężeń jonów potasu i niklu w wodach
 Characteristics of research points including the results of potassium and nickel concentration analysis in water

Numer punktu	Rodzaj punktu	Zwierciadło wód podziemnych [m p.p.t.]	Głębokość studni [m]	Ni ²⁺ [µg/dm ³]	K ⁺ [mg/dm ³]
1	studnia	–	–	2,6	13,20
2	studnia	2,51	18,31	6,5	5,96
3	studnia abisyńska	–	~9	<2	6,42
5	studnia abisyńska	–	~8	9,4	23,20
4	studnia	2,2	12,22	<2	1,15
6	studnia abisyńska	~3	~5	28	48,80
7	ciek	–	–	7,4	40,90
8	studnia	2,2	16,5	2,6	10,10
9	studnia abisyńska	–	~9	5,2	2,77
10	ciek	–	–	11	83,20
11	piezometr	4,75	2,12	7,0	15,40
12	piezometr	1,39	13,03	12	9,06
13	piezometr	1,12	12,31	4,2	11,50

2013) (tab. 1). W latach 1982–1984 Roszak (1991) w wodach podziemnych ujęcia infiltracyjnego stwierdzał stężenia niklu o wartości średniej 25,3 µg/dm³.

Przestrzenny rozkład współczesnych stężeń niklu w badanych wodach oraz analiza potencjalnych źródeł tego jonu może sugerować, że istniało w przeszłości na omawianym terenie ognisko (źródło) zanieczyszczeń tym metalem (fig. 2).

Biorąc pod uwagę, że zanieczyszczenie niklem ma prawdopodobnie obecnie charakter incydentalny, założono brak aktywnego źródła emisji tych jonów do środowiska wodnego i modelowaniu poddano przemieszczanie stwierdzonego rozkładu w trakcie opróbowania. Stałą podziału zadano zgodnie z danymi literaturowymi $K_f = 10000 \text{ l/kg} = 0,01 \text{ l/mg}$ (Allison, Allison, 2005; Sheppard i in., 2009). Warunek początkowy $c = \text{const}$ zadano w postaci mapy rozkładu w obrębie całego modelu; w miejscach nie opróbowanych przyjęto poziom tła hydrochemicznego. Warunek brzegowy II rodzaju ($Q_c = \text{const}$, stężenie w wodach infiltracyjnych) założono na poziomie tła hydrochemicznego, zakładając, że naturalne stężenie niklu formuje się po przejściu przez strefę aeracji; przyjęto $Q_c = 5 \text{ µg/dm}^3$. Maksymalne stężenia wyinterpolowane na obszarze terenów wodonośnych wynosiły ok. 0,015 mg/dm³ (15 µg/dm³), czyli poniżej norm dla wód pitnych (20 µg/dm³). Analizę procesu przemieszczania się masy wykonano dla okresu 10. letniego. Stężenie dodatkowo monitorowano fikcyjnym piezometrem zlokalizowanym w rejonie najbardziej narażonym – przy granicy terenów wodonośnych na drodze strumienia filtracji, gdzie zidentyfikowano wysokie stężenia.

Uzyskany model wskazuje, że różnice w rozkładach stężeń niklu między pierwszym a 10 rokiem symulacji są w zasadzie niezauważalne (fig. 2). Potwierdza to kontrola stężeń w fikcyjnym piezometrze, w którym ujawnia się ponadto minimalna redukcja stężeń (fig. 3).

W przypadku jonów potasowych zaobserwowano powszechność występowania podwyższonych stężeń tego wskaźnika w badanych wodach (w kilku punktach był powodem zakwalifikowania wód do V klasy jakości). Notowane stężenia (średnia 20,90 mg/dm³) przekraczają naturalne tło hydrogeochemiczne podawane przez Witczaka i innych (2013), przekraczają też notowane dla ujęć infiltracyjnych Wrocławia średnie stężenia (11,05 mg/dm³) z lat 80. ubiegłego wieku (Roszak 1991). Przestrzenny rozkład tego jonu wskazuje na istnienie emisji tego składnika do wód w środkowo-zachodniej części obszaru badań (fig. 2). Źródłem potasu w wodach podziemnych jest też ciek Zielona, który od południa wprowadza znaczny ładunek tych jonów (fig. 2, tab. 1). W cieku Zielona stwierdzono stężenia 40,9 oraz 83,2 mg/dm³ (poza granicami modelu). Obecność potasu w badanych wodach podziemnych objawiała się stężeniami w zakresie 1,15–48,8 mg/dm³ i wiąże się prawdopodobnie z emisją przestrzenną, inaczej niż w przypadku niklu. Podczas modelowania migracji tego jonu założono więc, że początkowe stężenia będą się utrzymywać w czasie w rejonach naważonych takich jak np. ogródki działkowe. Stała podziału jonów potasu rzadko bywa obiektem badań, jednak wskazuje się na analogiczne zachowanie tego jonu do strontu (Bencala

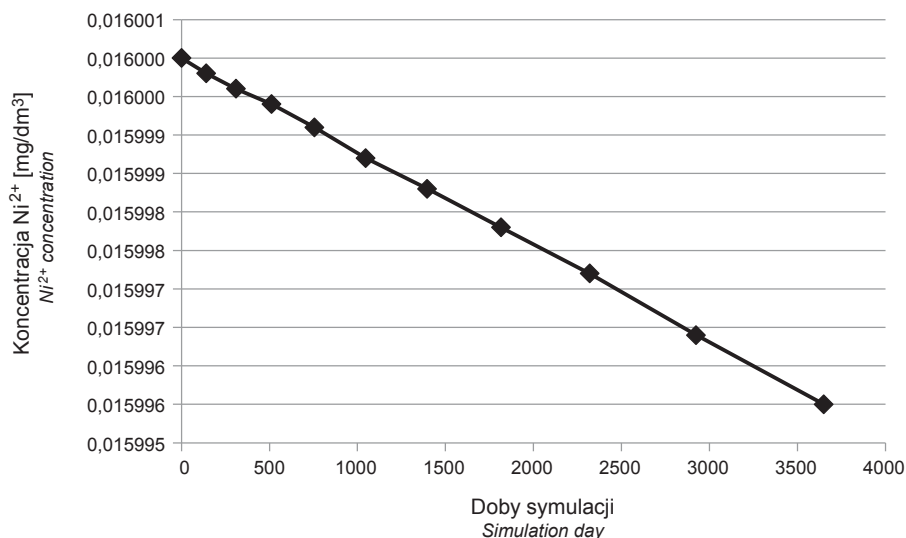


Fig. 3. Zmiany stężeń niklu w wodach fikcyjnego piezometru w czasie 10 lat symulacji migracji masy

Changes in nickel concentrations in the water of a fictitious piezometer during 10 years of mass migration simulation

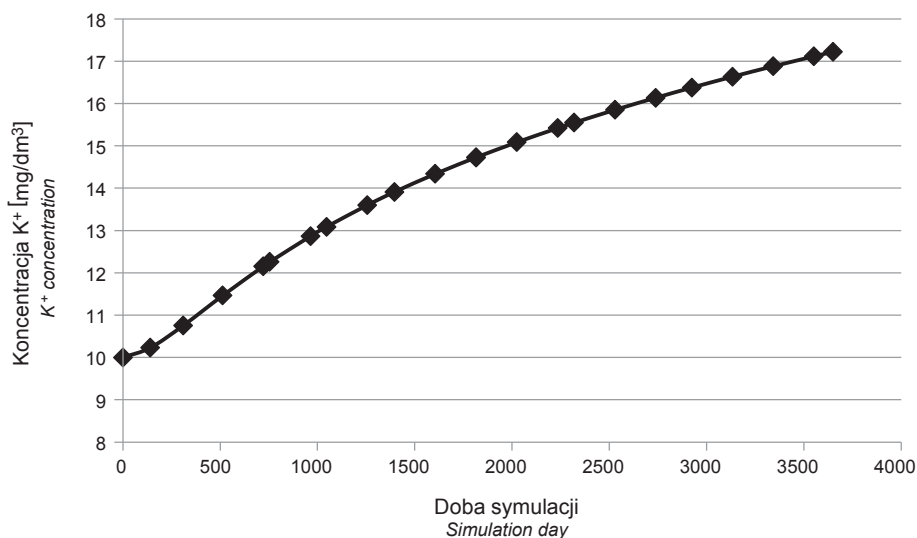


Fig. 4. Zmiany stężeń potasu w wodach fikcyjnego piezometru w czasie 10 lat symulacji migracji masy

Changes in potassium concentrations in the water of a fictitious piezometer during 10 years of mass migration simulation

i in., 1983). Wartość K_f przyjęto więc na poziomie $22 \text{ dm}^3/\text{kg}$ (Sheppard i in., 2009). Warunki brzegowe modelu transportu potasu zdefiniowano następująco: stężenie początkowe zadano w postaci mapy rozkładu w obrębie całego modelu (w miejscach nie opróbowanych przyjęto poziom tła hydrochemicznego); stężenie w wodach infiltracyjnych – warunek brzegowy II rodzaju ($Q_c = \text{const}$) przyjęto na poziomie tła hydrochemicznego zakładając, że naturalne stężenie potasu formuje się po przejściu przez strefę aeracji (przyjęto $Q_c = 5 \text{ mg/dm}^3$); stałe stężenie – zadano zgodnie z aktualnym rozkładem stężeń – w rejonach wykorzystywanych do upraw;

punktowe źródło zanieczyszczeń – rzeka Zielona, natężenie zgodne z natężeniem zasilania warstwy wodonośnej z rzeki (stężenie 40 mg/dm^3).

Analizę procesu przemieszczania się masy wykonano również dla okresu 10-letniego, a stężenie monitorowano fikcyjnym piezometrem zlokalizowanym w rejonie najbardziej narażonym – przy granicy terenów wodonośnych na drodze strumienia filtracji w obszarze wysokich stężeń (fig. 4). Zaobserwowane rozkłady stężeń jonów potasu uzyskane w wyniku modelowania wykazały nieznaczne ryzyko przemieszczania się chmury zanieczyszczeń potasem w kierunku

terenów wodonośnych, szczególnie w rejonie południowym z cieką Zieloną (fig. 2). Potwierdził to przebieg zmiany stężeń tego wskaźnika w wodzie kontrolnego fikcyjnego piezometru po 10 latach symulacji (fig. 4).

PODSUMOWANIE

Wykonane modelowanie numeryczne migracji jonów niklu w wodach podziemnych wykazało brak zagrożenia terenów wodonośnych Wrocławia ze strony badanego obszaru. Jednocześnie ze względu na wysoką podatność metali, szczególnie tych z grupy tzw. metali ciężkich, na zjawisko sorpcji prawdopodobnie epizodyczne zanieczyszczenia innymi metalami z tej grupy w przyszłości nie będą stanowiły istotnego zagrożenia dla terenów wodonośnych. Obserwowane podwyższone stężenia jonów potasowych oraz modelowanie migracji jonów potasu wskazało z kolei, że występuje ryzyko wzrostu stężeń tego wskaźnika na terenach wodonośnych, głównie z cieką Zieloną. Należy jednak podkreślić, że duża tendencja tego metalu do ulegania sorpcji powoduje, że wzrost jego stężenia na drodze migracji w wodach podziemnych będzie prawdopodobnie nieznaczny.

LITERATURA

- ALLISON J.D., ALLISON T.L., 2005 – Partition coefficients for metals in surface water, soil, and waste. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development Washington, DC.
- BENCALA K.E., JACKMAN A.P., KENNEDY V.C., AVANZINO R.J., ZELLWEGER G.W., 1983 – Kinetic analysis of strontium and potassium sorption onto sands and gravels in a natural channel. *Water Resour. Res.*, **19**, 3: 732–738.

- WITCZAK S., KANIA J., KMIECIK E., 2013 – Katalog wybranych fizycznych i chemicznych wskaźników zanieczyszczeń wód podziemnych i metod ich oznaczania. Inspekcja Ochrony Środowiska, seria Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa.
- MAŁECKI J.J. (red.), NAWALANY M., WITCZAK S., GRUSZCZYŃSKI T., 2006 – Wyznaczanie parametrów migracji zanieczyszczeń w ośrodku porowatym dla potrzeb badań hydrogeologicznych i ochrony środowiska. Poradnik metodyczny. UW, Wydział Geologii, Warszawa.
- MORASIEWICZ J., 1970 – Sprawozdanie z badań hydrogeologicznych na terenie projektowanych studni horyzontalnych w rejonie ujęcia wodociągów miejskich. Wrocławskie Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne we Wrocławiu [maszynopis].
- ROSAK W., 1991 – Kształtowanie się składu chemicznego płytkich wód podziemnych w pradolinie Odry w rejonie Wrocławia. *Pr. Geol.-Mineral.*, **20**.
- SHEPPARD S., LONG J., SANIPELLI B., SOHLENIUS G., 2009 – Solid/liquid partition coefficients (Kd) for selected soils and sediments at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. Rapport R-09-27. Svensk Kärnbränslehantering AB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm.
- STAŚKO S., TARKA R., WCISŁO M., BUCZYŃSKIS., OLICHWER T., 2015 – Intensyfikacja infiltracji na terenach wodonośnych oraz ZPW Na Grobli. Etap II. Model hydrogeologiczny obszaru ujęć infiltracyjnych MPWiK w granicach miasta Wrocław. Fundacja dla Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław.
- STAŚKO S., WCISŁO M., BUCZYŃSKI S., TARKA R., 2016 – Propozycja lokalizacji 4 nowych ujęć promienistych wraz z zamodelowaniem ich działania w obszarze terenów wodonośnych – część wrocławska i monitoringiem studni horyzontalnej. Fundacja dla Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław.
- WCISŁO M., BUCZYŃSKI S., STAŚKO S., OLICHWER T., TARKA R., 2016 – Hydrogeologiczne uwarunkowania intensyfikacji poboru wód na potrzeby miasta Wrocławia w rejonie Mokrego Dworu. *Biul. Państ. Inst. Geol.*, **466**: 301–312.
- WOJEWODAJ., KOWALSKIA., GOTOWAŁA R., SOBCZYK A., 2016 – Budowa geologiczna terenów wodonośnych ujęcia infiltracyjnego we Wrocławiu. *Biul. Państ. Inst. Geol.*, **466**: 323–341.

SUMMARY

One of the two most important water intakes for the Wrocław agglomeration is the Na Grobli intake, based the exploitation of well barriers located in the water-bearing area. The water-bearing area, stretching across in the city and near its borders, is subject to special protection especially in the presence of contaminants that may threaten the quality of the water intake. As a result of field and laboratory work, a potential risk due to the inflow of waters from neighbouring industrialized and active agricultural areas, containing increased concentrations of nickel and potassium ions, has been diagnosed. For these metals, a model of dynamic and mass migration in groundwater has been developed using the Visual Modflow 4.3 software. It covered a period of 10 years assuming the incidental nature of nickel contamination and continuous potassium pollution outside the water-bearing area. The concentrations of nickel and potassium were additionally monitored

by a fictitious piezometer located in the most vulnerable area – at the border of the water-bearing area by a stream of filtration in the area of high concentrations. The model calculation indicates that differences in the distribution of nickel concentrations between the first and the 10th year of simulation are unnoticeable. This is confirmed by the concentration control in the fictitious piezometer, which also reveals the minimum concentration reduction. The observed distributions of potassium ion concentrations show a slight risk of the potassium pollution cloud moving towards the water-bearing area, especially in the southern region from the Zielona stream. Thus, the numerical modelling of the migration of nickel and potassium ions in groundwater shows no threat to Wrocław's water intakes from the neighboring areas. In the future, due to the phenomenon of sorption, the probable threat from other metals will also be small.