

Ireneusz KRUKOWSKI¹, Marcin WIDOMSKI¹, Małgorzata IWANEK¹
i Grzegorz ŁAGÓD¹

PROCES EKSFILTRACJI Z PRZEWODÓW KANALIZACYJNYCH A ROZPRZESTRZENIANIE SIĘ WYBRANYCH ZANIECZYSZCZEŃ - BADANIA MODELOWE

EXFILTRATION FROM SANITATION PIPES AND TRANSPORT OF CHOSEN POLLUTANTS - A MODEL STUDY

Abstrakt: Eksploatacja sieci kanalizacji sanitarnej związana jest z możliwością wystąpienia eksfiltracji ścieków z przewodu kanalizacyjnego do otaczającego środowiska gruntowego. Eksfiltrujące ścieki zawierające często duże stężenia zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych mogą stanowić zagrożenie zarówno dla jakości wód gruntowych, jak i środowiska naturalnego gleby. Monitoring jakościowo-ilościowy wód wydostających się z uszkodzonego przewodu kanalizacyjnego jest bardzo trudny, a często w warunkach terenowych niemożliwy. W związku z tym coraz większą popularność zdobywa numeryczne modelowanie rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w środowisku gruntowo-wodnym. Niniejsza praca przedstawia wyniki obliczeń numerycznych rozprzestrzeniania się wybranych zanieczyszczeń (kadm, chrom) wydostających się z uszkodzonego przewodu kanalizacji sanitarnej grawitacyjnej, zlokalizowanego w profilu ul. Nadstawnej w Lublinie. Obliczenia numeryczne zostały wykonane za pomocą oprogramowania FEFLOW 5.2, WASY, Niemcy. Parametry transportowe gruntów, warunki początkowe oraz warunki brzegowe zostały wyznaczone na podstawie wyników badań literaturowych, laboratoryjnych i terenowych. Dane z obliczeń umożliwiają analizę wpływu awarii przewodów kanalizacyjnych na środowisko glebowe i wody gruntowe. Obliczenia symulacyjne należy poddać weryfikacji empirycznej w celu potwierdzenia prawidłowości przyjętych warunków początkowych i brzegowych.

Słowa kluczowe: eksfiltracja, rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń, modelowanie numeryczne

Działalność antropogenna, w szczególności przemysł metalurgiczny, włókienniczy, garbarski i chemiczny obciążają sieć kanalizacyjną zwiększonym stężeniem chromu i kadmu w transportowanych ściekach [1].

Chrom powszechnie występuje na dwóch stopniach utlenienia jako Cr(III) i Cr(VI). Sześciowartościowy chrom Cr(VI) to pierwiastek stosunkowo dobrze rozpuszczalny, dzięki czemu może być łatwo transportowany w ośrodku gruntowo-wodnym. Aż 90% przypadków skażenia chromem powoduje Cr(VI) [2]. Z powodu swoich silnych właściwości muta- i kancerogennych jest on bardzo ważnym zagrożeniem dla środowiska naturalnego.

Kadm obecny w ściekach jest równie niebezpieczny jak chrom. Ma on działanie kancero- i teratogenne, a w organizmie ludzkim kumuluje się głównie w nerkach. Obecność kadmu w ściekach związana jest bezpośrednio z intensywną działalnością antropogenną, głównie przemysłem: metalurgicznym i chemicznym. Transport, koncentracja i toksyczność Cr(VI) i Cd w środowisku zależą od wielu procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych zachodzących w środowisku gruntowo-wodnym oraz od jego właściwości [3, 4].

¹ Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, tel. 81 538 44 31, email: I.Krukowski@wis.pol.lublin.pl

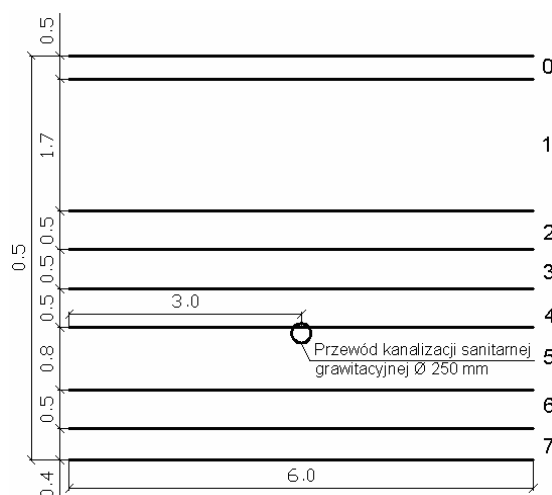
Celem niniejszej pracy było przedstawienie rozprzestrzeniania się wybranych zanieczyszczeń (kadm, chrom) wydostających się z uszkodzonego przewodu kanalizacji sanitarnej grawitacyjnej zlokalizowanego w profilu ul. Nadstawnej w Lublinie.

Metoda badawcza

Do obliczeń wykorzystano następujące materiały udostępnione przez MPWiK Sp. z o.o. Lublin:

1. Mapę z punktami pobierania próbek gruntu i numeryczną sieć wod.-kan.
2. Wyniki inspekcji kanałowych przeprowadzonych na ul. Nastawnej w Lublinie (Raport z inspekcji nr /607/T/06 z dn. 15.11.2006).
3. Materiały z rozpoznania konstrukcji nawierzchni drogowej i podłoża gruntowego, rozpoznanie przeprowadzone w dniach 03.09.2004 i 06.04.2005.
4. Skład ścieków surowych w oczyszczalni Hajdów za rok 2007.

Do badań modelowych wybrano przewód kanalizacji sanitarnej grawitacyjnej zlokalizowany w ul. Nadstawnej w Lublinie. Materiały udostępnione przez MPWiK pozwoliły na przyjęcie do badań profilu podłoża gruntowego, którego schemat przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat przyjętego do badań modelowych profilu

Fig. 1. Scheme of the modeled profile

Dla poszczególnych warstw założono siatkę trójkątnych elementów skończonych uzależnioną od zróżnicowania składu granulometrycznego warstwy. Właściwości fizyko-wodne poszczególnych warstw profilu przyjęto na podstawie opracowań literaturowych [8-10] i zestawiono w tabeli 1. Jako podstawowe zanieczyszczenia wydostające się z uszkodzonego przewodu kanalizacji sanitarnej wybrano chrom i kadm, których stężenia przyjęto na podstawie badań przeprowadzonych w 2007 roku przez Centralne Laboratorium MPWiK Lublin. Dla chromu przyjęto stężenie $0,1 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, a dla kadmu $0,337 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$.

Tabela 1
Parametry fizyko-wodne gruntu w poszczególnych warstwach profilu

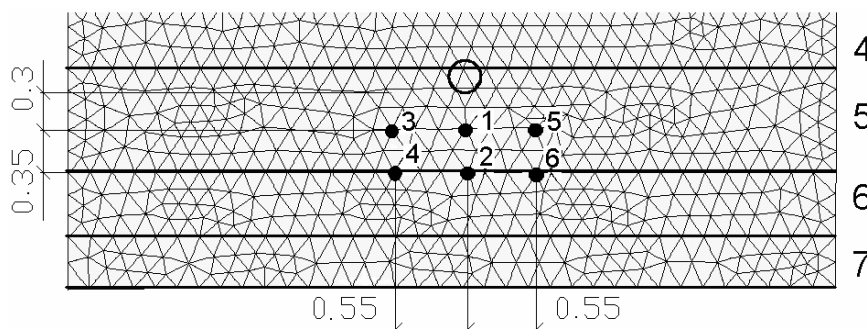
Physical parameters of soils in individual layers of the studied profile

| Numer warstwy | Parametry kształtu krzywej retencji wodnej | | Przepuszczalność gruntu w stanie nasycenia [m·s ⁻¹] | Porowatość [-] | Maksymalne nasycenie [-] | Resztowe nasycenie [-] |
|---------------|--------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------|
| | [cm ⁻¹] | [-] | | | | |
| 0 | 4,100 | 1,100 | 1,00·10 ⁻⁹ | 0,100 | 1,0 | 0,000 |
| 1 | 0,075 | 1,890 | 1,23·10 ⁻⁵ | 0,410 | 1,0 | 0,159 |
| 2 | 0,036 | 1,560 | 2,89·10 ⁻⁶ | 0,430 | 1,0 | 0,181 |
| 3 | 0,0065 | 1,325 | 1,78·10 ⁻⁷ | 0,430 | 1,0 | 0,000 |
| 4-6 | 0,019 | 1,310 | 7,17·10 ⁻⁷ | 0,410 | 1,0 | 0,232 |

Tabela 2
Parametry adsorpcji i dyspersji dla poszczególnych warstw profilu

Parameters of adsorption and dispersion for the individual layers of the profile

| Numer warstwy | Współczynnik | | | | | |
|---------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------|
| | sorpcji wg Henry'ego [-] | dyfuzji molekularnej [m ² ·s ⁻¹] | dyspersji podłużnej [m] | dyspersji poprzecznej [m] | rozpadu w reakcji pierwszego rzędu [s ⁻¹] | |
| KADM | 1 | 79,57 | 1,0·10 ⁻⁹ | 4,00 | 0,5 | 1,727·10 ⁻⁸ |
| | 2 | 29,70 | 1,0·10 ⁻⁹ | 36,00 | 0,5 | 1,727·10 ⁻⁸ |
| | 3 | 27,94 | 1,0·10 ⁻⁹ | 2,50 | 0,5 | 1,727·10 ⁻⁸ |
| | 4-6 | 28,16 | 1,0·10 ⁻⁹ | 1,50 | 0,5 | 1,727·10 ⁻⁸ |
| CHROM | 1 | 2,43 | 1,0·10 ⁻⁹ | 4,00 | 0,5 | 2,886·10 ⁻⁷ |
| | 2 | 0,20 | 1,0·10 ⁻⁹ | 36,00 | 0,5 | 2,886·10 ⁻⁷ |
| | 3 | 0,191 | 1,0·10 ⁻⁹ | 2,50 | 0,5 | 2,886·10 ⁻⁷ |
| | 4-6 | 0,192 | 1,0·10 ⁻⁹ | 1,50 | 0,5 | 2,886·10 ⁻⁷ |



Rys. 2. Schemat profilu z założonymi punktami referencyjnymi

Fig. 2. Scheme of the profile with reference points

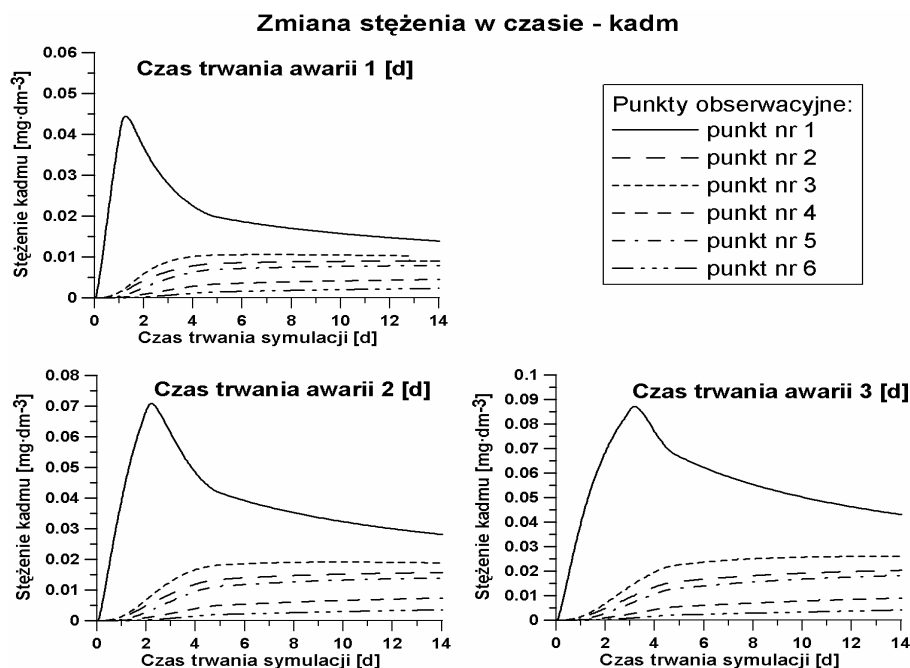
Na podstawie opracowań literaturowych przyjęto również parametry adsorpcji i dyspersji, które zaprezentowano w tabeli 2 [11-15]. Parametry fizyko-wodne gruntu oraz parametry adsorpcji i dyspersji przyporządkowano wyróżnionym warstwom. Do obliczeń symulacyjnych przyjęto również warunek początkowy nasycenia profilu gruntowego 70%

i początkowe stężenie zanieczyszczeń w gruncie o wartości $0,0 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Na powierzchni ulicy w górnej części profilu założono warunki brzegowe, zapewniające szczelność nawierzchni ulicy. W dolnej części profilu przyjęto warunek brzegowy gradientowy, pozwalający na swobodny odpływ w głąb profilu.

W celu odczytania stężenia przyjętych do badań zanieczyszczeń założono sześć punktów referencyjnych, a schemat z założonymi punktami przedstawiono na rysunku 2.

Analiza wyników

Obliczenia prowadzono dla trzech różnych wariantów: I - czas trwania awarii 1 doba, II - czas trwania awarii 2 doby i III - awaria przez 3 doby. Niezależnie od wariantu obliczeniowego symulację prowadzono dla czasu 14 d. Dla każdego z wariantów zakładano warunki brzegowe dla przepływu wody $0,2 \text{ m}$ i dla przepływu zanieczyszczenia kadmu - $0,337 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, chrom - $0,1 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ w zależności od czasu trwania awarii.



Rys. 3. Zmiany stężenia kadmu w zależności od czasu

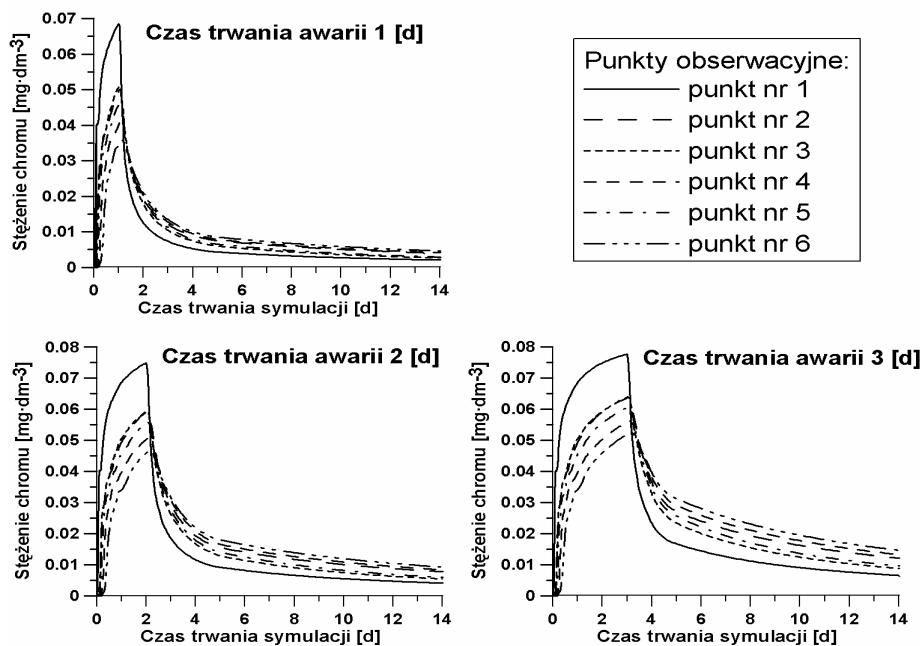
Fig. 3. Changes of the concentrations of cadmium in time

Zmiany stężenia kadmu w czasie dla przyjętych punktów referencyjnych przedstawiono na rysunku 3. Dla każdego z wariantów obliczeniowych w punkcie nr 1 stężenie kadmu gwałtownie rośnie, a po przekroczeniu czasu trwania awarii z opóźnieniem spada, czego nie odnotowano w kolejnych punktach. W pozostałych punktach stężenie kadmu po osiągnięciu pewnej wartości nie ulega większym zmianom.

Zmiany stężenia chromu w zależności od czasu trwania awarii dla założonych punktów obserwacyjnych przedstawiono na rysunku 4. Zaobserwowano, że stężenie

chromu po rozpoczęciu symulacji gwałtownie rośnie, a po przekroczeniu czasu trwania awarii z opóźnieniem gwałtownie spada. Im gwałtowniejszy przyrost, tym równie gwałtowny spadek stężenia chromu.

Zmiana stężeń w czasie - chrom



Rys. 4. Zmiany stężenia chromu w zależności od czasu

Fig. 4. Changes of the concentrations of the chrome in time

Wnioski

Uzyskane wyniki z przeprowadzonych obliczeń numerycznych pozwalają na postawienie następujących wniosków:

1. Obliczenia symulacyjne pokazały, że wraz ze wzrostem czasu trwania awarii stężenia zanieczyszczeń w założonych punktach obserwacyjnych rosną. Dla każdego z zanieczyszczeń największą wartość stężenia uzyskano przy awarii trwającej 3 doby, w przypadku kadmu wynosiła ona $0,087 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, a chromu $0,078 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$.
2. Uzyskane wyniki obliczeń numerycznych pokazały, że stężenia chromu są większe w porównaniu ze stężeniami kadmu, pomimo iż stężenie wydostającego się chromu z uszkodzonego przewodu było ponad 3-krotnie mniejsze niż kadmu.
3. Zanieczyszczeniu chromem towarzyszy gwałtowny przyrost i spadek stężenia. Oznacza to, że zanieczyszczenie chromem łatwo przemieszcza się w ośrodku gruntowym i w niewielkim stopniu podlega procesowi sorpcji.
4. Zanieczyszczenie kadmem podlega zwiększonej kumulacji w ośrodku gruntowym w porównaniu z zanieczyszczeniami chromem.
5. Przeprowadzone badania numeryczne wymagają weryfikacji empirycznej.

Literatura

- [1] Fonseca B., Teixeira A., Figueiredo H. i Tavares T.: *Modelling of the Cr(VI) transport in typical soils of the North of Portugal*. J. Hazard. Mater., 2009, **167**, 756-762.
- [2] Hossain A.: *Modeling nonlinearly transient zero-order bioreduction and transport of Cr(VI) in groundwater*. Environ. Model. Assess., 2005, **10**, 315-321.
- [3] Lichner L., Dlapa P., Sir M., Cipakova A., Houskova B., Fasko P. i Nagy V.: *The fate of cadmium in field soils of the Danubian lowland*. Soil & Tillage Res., 2006, **85**, 154-165.
- [4] Yolcubal I. i Akyol N.H.: *Retention and transport of hexavalent chromium in calcareous karst soils*. Turkish J. Earth Sci., 2007, **16**, 363-379.
- [5] Diersch H.J.G.: FEFLOW 5.3 Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System. Reference Manual. WASY GmbH, Berlin 2005.
- [6] Diersch H.J.G.: FEFLOW 5.3 Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System, User's Manual. WASY GmbH, Berlin 2006.
- [7] Trefry, M.G. i Muffels Ch.: *FEFLOW: a finite-element ground water flow and transport modeling tool*. Ground Water, 2007, **45**(5), 525-528.
- [8] Basile A., Mele G. i Terribile F.: *Soil hydraulic behaviour of a selected benchmark soil involved in the landslide of Sarno 1998*. Geoderma, 2003, **117**, 331-346.
- [9] Van Dam J., Huygen J., Wesseling J., Feddes R., Kabat P., Van Walsum P., Groenendijk P. i Van Diepen C.: *Theory of SWAP version 2.0. Simulation of Water Flow, Solute Transport and Plant Growth in the Soil-Water Atmosphere-Plant Environment*. Wageningen Agricultural University and DLO Winand Staring Centre, Wageningen 1997.
- [10] Wessolek G., Plagge R., Leij F. i Van Genuchten M.: *Analysing problems in describing field and laboratory measured soil hydraulic properties*. Geoderma, 1994, **64**, 93-110.
- [11] Baker, F.G. i Pavlik H.F.: *Characterization and modelling of groundwater flow in a heterogeneous aquifer system to evaluate contaminant migration*. Fifth Canadian/American Conference on Hydrogeology, S. Bachu (Ed.), National Water Well Association, 1990, 453.
- [12] Dunnivant F.M., Jardine P.M., Taylor D.L. i McCarthy J.F.: *Cotransport of cadmium and hexachlorobiphenyl by dissolved organic carbon through columns containing aquifer material*. Environ. Sci. Technol., 1992, **26**(2), 360-368.
- [13] Huyakorn P.S., Anderson P.F., Motz F.J., Guver O. i Melville J.G.: *Simulations of two-well tracer tests in stratified aquifers at the Chalk River and the mobile sites*. Water Res., 1986, **22**(7), 1016-1030.
- [14] Lau L.K., Kaufman W.J. i Todd D.K.: *Studies of dispersion in a radial flow system, Canal Seepage Research: Dispersion Phenomena in Flow Through Porous Media*. Progress Rep. 3, I.E.R. Ser. 93, issue 3. Sanit. Eng. Res. Lab., Dep. of Eng. and School of Public Health, Univ. of Calif., Berkeley, USA 1957.
- [15] Vukovic M. i Biscan J.A.: *A contribution to environmental risk assessment for transport of cadmium through groundwater layers. Case study of the Sava River Region*. Water Res., 1998, **32**(12), 3765-3771.
- [16] Zaradny H.: *Matematyczne metody opisu i rozwiązań przepływu wody w nienasyconych i nasyconych gruntach i glebach*. Praca IBW PAN 23, 1990.
- [17] Mualem Y.: *A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media*. Water Res., 1976, **12**(3), 513-522.

EXFILTRATION FROM SANITATION PIPES AND TRANSPORT OF CHOSEN POLLUTANTS - A MODEL STUDY

Faculty of Environmental Engineering, Lublin University of Technology

Abstract: Sanitation systems exploitation may result in the possibility of sewage exfiltration. The exfiltrating sewage, very often containing the high concentration of organic and inorganic pollutants may cause the clear danger for the groundwater and soil environment. The qualitative and quantitative monitoring of wastewater leaving the damaged sewage pipe is quite difficult and often, in practice - impossible. Recently, the numerical modelling of pollutants transport in groundwater and soil has gained the increased popularity. This paper presents the results of numerical calculations of chosen pollutants (cadmium and chromium) exfiltrating from the damaged gravitational sewer system pipe located in the profile of Nadstawna St., Lublin, Poland. The numerical calculations were conducted by FEFLOW 5.2, WASY, Germany model. Soils transport parameters as well as

initial and boundary conditions were obtained as results of literature, laboratory and field studies. The results of our researches enable the analysis of sanitation pipe failure effect on soil environment and groundwater. However, the empirical verification of the modelling results in order to verify the validity of initial and boundary conditions is required.

Keywords: exfiltration, pollutants transport, numerical modelling