

ZANIECZYSZCZENIA ORGANICZNE W WODACH GRUNTOWYCH NA TERENIE BYŁEJ BAZY LOTNICZEJ

CZESŁAWA ROSIK-DULEWSKA¹, TOMASZ CIESIELCZUK²,
MICHAŁ KRYSIŃSKI

¹Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska PAN Zabrze
ul. Skłodowskiej-Curie 43, 41-819 Zabrze, Polska

²Katedra Ochrony Powierzchni Ziemi, Uniwersytet Opolski
ul. Oleska 22, 45-052 Opole, Polska

Adres e-mail do korespondencji: dulewska@ipis.zabrze.pl

Słowa kluczowe: Wody podziemne, węglowodory, baza lotnicza.

Streszczenie: Produkty ropopochodne są szeroko rozpowszechnione i odgrywają kluczową rolę w gospodarce człowieka. Znajdują one zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Tak duże ilości produktów ropopochodnych generują znaczne ilości odpadów. Odpady te mogą przedostawać się do środowiska gruntowo-wodnego w sposób niekontrolowany podczas różnego rodzaju katastrof czy niewłaściwie prowadzonej gospodarki odpadami, w tym składowania. Celem badań było określenie stopnia zanieczyszczenia substancjami ropopochodnymi wód podziemnych na terenie byłego lotniska wojskowego, na którym w latach 1950–1990 stacjonowały Jednostki Armii Radzieckiej (JAR). Analizie poddano próbki wód podziemnych pochodzących z trzech piezometrów znajdujących się na terenie byłej bazy lotniczej. W pobranych próbkach określono takie parametry jak: temperatura, odczyn, przewodność elektrolityczna właściwa, głębokość zalegania wód gruntowych, zawartość węglowodorów alifatycznych, monoaromatycznych oraz wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych. Oznaczana ilość rozpuszczonych węglowodorów była wysoka, co wskazuje na niezadowalającą efektywność przeprowadzonych wcześniej procesów rekultywacyjnych.

WSTĘP

Jeszcze kilkaset lat temu niemal cała energia wykorzystywana przez człowieka pochodziła ze źródeł odnawialnych, głównie z biomasy. Coraz większe rozpowszechnienie wykorzystywania ropy naftowej i jej produktów jako paliw do silników spalinowych, spowodowało wzrastające zagrożenie zanieczyszczeniem środowiska naturalnego produktami ropopochodnymi. Zanieczyszczenia środowiska gruntowo-wodnego nie są tak spektakularne jak środowiska wód powierzchniowych i mają często wymiar lokalny [20]. Dochodzi do nich na stacjach benzynowych, bocznicach kolejowych i stacjach przeładunkowych paliw, a także w wyniku incydentalnych kolizji powodujących nie tylko

emisję LZO (głównie benzenu, toluenu, etylobenzenu, m+p-ksylenu i 1,2,3-trimetylobenzenu) do powietrza, ale także przenikanie produktów ropopochodnych do gleb [22]. Zanieczyszczenia te, będące wynikiem działalności gospodarczej człowieka, degradują środowisko, w tym wywierają ujemny wpływ na organizmy żywe, a więc i na człowieka. Szczególnie niebezpieczne są katastrofy w ruchu lądowym oraz morskim, powodujące duże zanieczyszczenie punktowe oraz obszarowe negatywnie oddziałujące nie tylko na ekosystemy, ale także na gospodarkę ponadlokalną [11]. Odrębny charakter posiadają zanieczyszczenia permanentne, gdzie nie prowadzi się akcji ratowniczych, a następnie prac rekultywacyjnych w celu przywrócenia pierwotnego stanu środowiska [20]. Przykładem takich długotrwałych procesów zanieczyszczenia są tereny, gdzie zanieczyszczenia ropopochodne dostają się do środowiska w sposób często zupełnie niekontrolowany. Tereny baz lotniczych, szczególnie tych użytkowanych na terenie Polski przez jednostki armii radzieckiej (JAR), stanowią przykład takich działań. Niezbędne czynności w celu przywrócenia środowisku pierwotnej jakości obejmują odpompowanie unoszącej się na zwierciadle wód fazy organicznej lekkich cieczy organicznych niemieszających się z wodą (z ang. Light Non-Aqueous Phase Liquid – LNAPL) za pomocą automatycznych skimerów. W celu eliminacji związków rozproszonych w fazie wodnej, szeroko rozpowszechnione są: metody mikrobiologiczne, zatłaczanie tlenu lub przepłukiwanie zanieczyszczonych gleb detergentami [3, 8, 9, 10, 16, 21].

MATERIAŁ I METODY

Charakterystyka obszaru badań

Lotnisko wojskowe, którego teren został objęty badaniami, jest obiektem przejętym przez wojska rosyjskie po zakończeniu II wojny światowej od niemieckich wojsk lotniczych. W latach powojennych obiekt został znacznie rozbudowany/zmodernizowany przez znajdujące się tam jednostki wojskowe JAR. W roku 1991 obiekt wraz ze znajdującą się na jego terenie zabudową techniczną został przejęty przez władze cywilne. W kierunku północno wschodnim, w odległości około kilometra od granic lotniska, znajduje się miejscowość Skarbimierz, natomiast wsie Małujowice oraz Pępice, znajdują się na południowym wschodzie od terenu lotniska. Najbliższe zabudowania znajdują się już w odległości 0,5 km od jego granic. Dodatkowo we wsiach Małujowice i Skarbimierz znajdują się ujęcia wody pitnej.

Pobieranie próbek

Pobieranie próbek wykonano dwukrotnie: jesienią (21.11.2009) oraz wiosną (22.04.2010). Badaniem objęto wody podziemne ujmowane z trzech piezometrów zlokalizowanych w południowej części obiektu (okolice wsi Pępice) w bezpośrednim sąsiedztwie miejsc/płyt tankowania samolotów. Wszystkie piezometry znajdowały się między bunkrami, w których stacjonowały samoloty JAR. Na miejscu poboru określano głębokość zalegania zwierciadła wód podziemnych za pomocą świstawki hydrogeologicznej, uwzględniając zalegającą na powierzchni wody warstwę LNAPL. Następnie oceniano miąższość fazy LNAPL za pomocą kalibrowanego szklanego próbnika rurowego. Przed poborem wody do oznaczeń parametrów fizykochemicznych, odpompowywano wodę z piezometru za pomocą pompy elektrycznej, aż do uzyskania stałych parametrów (pH i EC) pompowanej wody. W pobieranych próbach oznaczano podstawowe

parametry (temperatura, barwa, zapach, odczyn, przewodność elektrolityczna właściwa). Następnie wodę pobierano do szklanych butelek z ciemnego szkła o pojemności 1 dm³. Tak pobrane próby konserwowano na miejscu dichlorometanem (DCM) do oznaczeń węglowodorów. Równoległe drugą serię próbek konserwowano kwasem solnym 1:1 do oznaczeń ogólnej ilości substancji ropopochodnych.

Oznaczenia parametrów jakości wody

Pobrane i zakonserwowane DCM próbki, poddano ekstrakcji ciecz-ciecz za pomocą dichlorometanu, dokładnie wstrząsając przez około 15 minut. Po rozdzieleniu się warstw wodnej i organicznej, przenoszono eluat do kolb miarowych, a następnie poddawano suszeniu za pomocą bezwodnego siarczanu sodowego (Na₂SO₄ cz.d.a). Oznaczenia zawartości węglowodorów alifatycznych oraz monoaromatycznych prowadzono metodą chromatografii gazowej z detektorem promieniowo-jonizacyjnym FID, za pomocą chromatografu gazowego VARIAN CP – 3800. Do oznaczeń zastosowano kolumnę kapilarną VF5-ms o długości 30 m; ID 0,25 mm oraz if 0,25 µm. W otrzymanych ekstraktach oznaczono zawartość węglowodorów alifatycznych o długości łańcucha C₈-C₂₂, monoaromatycznych (benzenu, toluenu, o-ksylenu, m+p-ksylenu, etylobenzenu, styrenu, izopropylobenzenu, 1,2,3-trimetylobenzenu, tertbutylobenzenu i 1,2,4-trimetylobenzenu, secbutylobenzenu, 4-izopropylobenzenu, oraz n-butylobenzenu) i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (16 związków wg US EPA). Temperatury stref grzewczych chromatografu do oznaczania węglowodorów monoaromatycznych oraz alifatycznych wynosiły: dozownik – 250°C, detektor – 300°C. Program temperaturowy pieca, podczas oznaczania węglowodorów monoaromatycznych, rozpoczynał się przy temperaturze 30°C utrzymywanej przez 2 minuty, kolejno ogrzewano go do 50°C w tempie 4°C na minutę, a następnie do 150°C w tempie 5°C na minutę. Do oznaczeń węglowodorów alifatycznych początkowa temperatura pieca wynosząca 30°C była utrzymywana przez 2 minuty, kolejno piec ogrzewano do 50°C w tempie 4°C na minutę, a w następnie do 280°C w tempie 6°C na minutę. Do analiz WWA dozownik ogrzewano do 300°C, natomiast detektor FID do 310°C. Program temperaturowy chromatografu rozpoczynał się utrzymaniem temperatury pieca 100°C przez 2 minuty, a następnie ogrzewaniu do 300°C w tempie 4°C na minutę, i utrzymanie tej temperatury przy końcu programu przez 10 min. Podczas wszystkich analiz przepływ gazu nośnego (He) przez kolumnę wynosił 1cm³ na minutę. Oznaczenie całkowitej zawartości rozpuszczonych substancji organicznych oznaczono jako ekstrakt eterowy metodą wagową.

OMÓWIENIE I DYSKUSJA WYNIKÓW

Podstawowym źródłem zanieczyszczeń na terenie lotniska były magazyny paliw wraz z rurociągami, siecią drenażową wód podziemnych oraz składowiska odpadów. Na badanym terenie odpady składowane były w nieuszczelnionych zagłębieniach (ziemnych), które po wypełnieniu zasypywano warstwą gruntu. Duży problem stanowiły nieszczelne rurociągi materiałów pędnych oraz nieszczelności zbiorników do przechowywania paliw płynnych. Długi czas użytkowania tych instalacji doprowadził do degradacji gleb i wód podziemnych zwłaszcza w rejonie płytkiego tankowania samolotów i stacji paliw.

Badania prowadzone przez Wojskową Akademię Techniczną oraz Państwową Inspekcję Ochrony Środowiska i sporządzone w ich wyniku raporty, ukazują szczegółowy stan zanieczyszczeń lotniska materiałami ropopochodnymi. Zgodnie z nimi w wodach gruntowych znajdujących się na terenie lotniska występują m.in. podwyższone stężenia ołowiu, chromu, miedzi, cynku, kadmu, arsenu oraz związków ropopochodnych [21].

Podczas własnych badań terenowych stwierdzono, że wody gruntowe pozostają w stałym kontakcie z produktami ropopochodnymi, które unoszą się na powierzchni lustra wód w formie warstwy LNAPL o zróżnicowanej miąższości. Ważnym aspektem jest głębokość zalegania zwierciadła wód podziemnych. Wykonane badania wskazują, iż są to wody płytkie, a więc w znacznym stopniu narażone na bezpośrednie oddziaływanie zanieczyszczeń doprowadzanych na powierzchnię gruntu (Tab. 1). Najgłębiej zalegające wody gruntowe zanotowano w obrębie piezometru nr 3. Tam woda znajdowała się 194,5 cm ppt. Najpłycej zalegające wody gruntowe zanotowano w piezometrze nr 1 gdzie wartość ta wyniosła 149,2 cm ppt. Podczas badań prowadzonych wiosną zaobserwowano duże podniesienie się poziomu wód gruntowych. Prawdopodobnie było to spowodowane znaczną miąższością pokrywy śnieżnej oraz brakiem konserwacji istniejącego systemu rowów odwadniających badany teren. Wiosną najgłębiej zalegające wody gruntowe zanotowano w piezometrze nr 2, na głębokości 147 cm ppt, gdzie jednocześnie zanotowano najmniejszą zmienność tego parametru w obu badanych sezonach. Najpłycej występujące wody podziemne odnotowano w piezometrze nr 3, tj. 66 cm ppt. Takie wahania zwierciadła wód mogą powodować nasiloną rozpuszczalność zanieczyszczeń organicznych w wodach podziemnych [14]. Wszystkie pobrane próbki wody charakteryzują się intensywnym zielonkawym zabarwieniem, a zwłaszcza próbki pobrane z piezometrów nr 1 i 2. W piezometrze nr 3 zabarwienie to było mniej intensywne. Zabarwienie takie świadczy o zawartości szczątków organicznych głównie pochodzenia roślinnego. Piezometry, z których pochodziły próbki nie były wyposażone w pokrywy zabezpieczające przed zanieczyszczeniami dostającymi się do ich wnętrza. Piezometry nr 1 i 2 znajdowały się w okolicy, w której występowały liczne drzewa oraz krzewy, dlatego we wnętrzu otworów znajdowały się duże ilości starych liści, jedynie w okolicy piezometru nr 3 występowała wyłącznie roślinność jednoroczna, dlatego zanieczyszczenie powierzchni zwierciadła wody podziemnej było znikome.

Wszystkie badane wody charakteryzowały się odczynem lekko kwaśnym, pozwalającym zakwalifikować je do I klasy czystości (Tab. 1).

Tabela 1. Charakterystyka głównych parametrów badanych prób wód podziemnych

Nr otworu	Poziom zwierciadła wód gruntowych [cm ppt]		Miąższość fazy LNAPL [mm]		Temperatura [°C]		Odczyn (pH)		Przewodność elektrolityczna właściwa [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	
	J	W	J	W	J	W	J	W	J	W
1	149,2	77	< 2	2	13,5	9,2	5,97	6,15	689	785
2	173	147	< 2	3	13,5	8,9	5,99	6,15	556	396
3	194,5	66	13	15	13,0	10,0	5,86	6,03	470	406

Ppt – pod poziomem terenu, J – próby z poboru jesiennego; W – próby z poboru wiosennego

Równocześnie, na znaczną zależność badanych wód od czynników zewnętrznych wskazują także wahania temperatury zanotowane w obu sezonach (3,0–4,6°C). Zapach pobranych próbek określono

jako specyficzny (charakterystyczny dla produktów ropopochodnych) o natężeniu 4. Miąższość fazy LNAPL występującej w badanych piezometrach nie była wysoka i osiągała maksymalnie 13 mm. Zawartość węglowodorów monoaromatycznych w badanych wodach była wysoka (Tab. 2), w szczególności w przypadku benzenu i toluenu. Ich wysokie stężenia (przekraczające odpowiednio 15,7 i 0,39 mg/dm³) mogą być tłumaczone znaczną rozpuszczalnością tych związków w wodzie.

Tabela 2. Zawartość węglowodorów monoaromatycznych w badanych próbach [µg/dm³]

Nr otworu	1		2		3	
	J	W	J	W	J	W
Benzen	5790	1799	15757	1958	11164	5944
Toluen	27,25	131,25	56,58	397,33	50,73	286,03
Etylobenzen	50,59	66,38	25,09	51,10	19,75	97,14
m+p ksylen	51,34	67,42	50,99	41,77	9,41	3,76
o-ksylen	< 0,01	2,53	7,40	12,78	1,69	2,02
Styren	5,77	9,74	6,88	610,97	5,07	11,48
Izopropylobenzen	11,50	16,16	35,66	82,07	9,37	10,15
n-propylobenzen	24,21	15,53	37,89	82,06	19,62	40,23
1,3,5-trimetylobenzen	27,87	52,71	47,36	210,89	14,99	37,33
Tertbutylobenzen +1,2,4-trimertylobenzen	43,23	67,62	64,36	420,14	20,02	20,52
sec-butylobenzen	9,26	7,08	19,62	28,59	6,82	3,79
4-izopropylobenzen	86,87	151,26	210,11	10,97	8,12	23,23
n-butylobenzen	30,35	56,40	72,04	194,81	26,82	49,44
Suma	6158,2	2443,1	16391,0	4101,5	11356,4	6529,1

J – próby z poboru jesiennego; W – próby z poboru wiosennego

Porównywalne, a nawet wyższe przekroczenia dopuszczalnych stężeń tych związków notowane były w latach 90-tych ubiegłego wieku na terenach stacji paliw [1, 2]. Podwyższone ilości (przekraczające 100 µg/dm³) notowano także w przypadku styrenu, 1,3,5-trimetylobenzenu, 4-izopropylobenzenu, n-butylobenzenu i tertbutylobenzenu z 1,2,4-trimertylobenzenem. Znaczne ilości związków należących do benzotriazoli przenikających do gleb oraz wód gruntowych powodują niekorzystne zmiany w aktywności mikroorganizmów, a biodegradacja tych związków może przebiegać niezwykle powoli, jest jednak uzależniona od dodatków stosowanych do niektórych typów paliw [5, 6]. Mimo to wyspecjalizowane szczepy mikroorganizmów w warunkach laboratoryjnych skutecznie degradowują nawet wysokie stężenia BTEX przekraczające 1,1 g/dm³ [13]. Badania terenowe wskazują, iż najbardziej podatne na rozkład są etylobenzen, toluen i o-ksylen, jednak niskie temperatury i brak tlenu mogą znacznie spowalniać biodegradację nawet tych związków [18, 19]. Zanotowane w niniejszych badaniach stężenia BTEX, a zwłaszcza benzenu, klasyfikują badane wody jako pozaklasowe.

W przypadku rozszczelnienia zbiorników paliw, w wodach podziemnych notuje się występowanie n-alkanów. Najczęściej spotykane związki to szereg od C14 do C34 [4]. Z uwagi na znaczną hydrofobowość tych związków dochodzi do wytworzenia emulsji, a stężenia pojedynczych związków mogą przekraczać wówczas nawet 1000 µg/dm³, natomiast w przypadku gleb mających kontakt z produktami ropopochodnymi, zanotowano ponad 16 mg/kg pojedynczych alkanów przy całkowitej zawartości węglowodorów szeregu C6-C35 przekraczającej 120 g/kg s.m. [7, 17]. Tak

silne zanieczyszczenia wód gruntowych eliminują je z wykorzystania gospodarczego, a ponadto generują bezpośrednie zagrożenie dla zdrowia ludzi i zwierząt [15]. W badanych próbkach (Tab. 3) zanotowano wysokie stężenia (przekraczające w przypadku dodekanu $100 \mu\text{g}/\text{dm}^3$) węglowodorów alifatycznych o krótszych łańcuchach. Węglowodorów cięższych zanotowano znacznie mniej, a występowania eikozanu i dokozanu nie zanotowano.

Tabela 3. Zawartość węglowodorów alifatycznych w badanych próbkach [$\mu\text{g}/\text{dm}^3$]

Nr otworu	1		2		3	
	J	W	J	W	J	W
Oktan	14,02	21,23	22,17	35,84	10,47	29,47
Dekan	56,66	31,02	9,51	26,47	4,54	17,45
Dodekan	29,37	22,50	144,3	45,25	132,6	78,61
Tetradekan	18,59	15,12	80,99	15,71	17,06	17,95
Heksadekan	6,64	5,24	24,45	6,13	2,87	5,45
Oktadekan	3,25	2,15	4,35	1,18	2,01	2,62
Eikozan	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Dokozan	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

J – próby z poboru jesiennego; W – próby z poboru wiosennego

W badanych próbkach wód gruntowych zanotowano ponadto wysokie stężenia wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (Tab. 4). Zjawisko takie jest charakterystyczne dla wód zanieczyszczonych związkami organicznymi łatwo rozpuszczalnymi w wodzie (np. benzen), działającymi jako rozpuszczalniki.

Tabela 4. Zawartość 16 WWA w badanych próbkach [$\mu\text{g}/\text{dm}^3$]

Nr otworu	1		2		3	
	J	W	J	W	J	W
Naftalen	45,9	48,03	37,1	77,02	39,9	65,98
Acenaftylen	0,54	0,40	0,71	0,66	0,50	0,78
Acenaften	0,69	0,65	0,96	0,88	0,87	0,95
Fluoren	1,24	1,10	1,57	1,24	1,70	1,82
Fenantren	0,36	0,31	0,43	0,20	0,31	0,50
Antracen	0,13	0,09	0,15	0,13	0,12	0,16
Fluoranten	0,28	0,45	0,56	0,86	0,25	0,37
Piren	0,13	0,16	0,16	0,16	0,16	0,12
Benzo(a)antracen	0,08	0,12	0,12	0,14	0,04	0,06
Chryzen	0,27	0,40	0,28	0,32	0,34	0,43
Benzo(b)fluoranten	0,09	0,04	0,09	0,13	0,09	0,08
Benzo(k)fluoranten	1,63	3,13	1,23	4,38	1,03	1,26
Benzo(a)piren	0,39	0,20	0,24	0,38	0,29	0,21
Indeno(1,2,3-cd)piren	0,94	0,57	1,80	1,41	1,85	1,29
Dibenzo(a,h)antracen	0,74	0,22	0,95	0,68	0,58	0,64
Benzo(g,h,i)perylene	1,17	0,79	1,61	1,53	0,69	0,63
Suma	54,6	56,7	48,0	90,1	48,7	75,3

J – próby z poboru jesiennego; W – próby z poboru wiosennego

Biorąc pod uwagę zanotowane stężenia przekraczające dopuszczalne normy WWA zauważyć można, że badane wody zarówno z poboru jesiennego, jak i wiosennego należą do V klasy jakości wód podziemnych. Tak wysoka zawartość WWA mogła być spowodowana efektem pierwotnego składu paliwa lub wypłukaniem tych związków z gleby podczas przesiąkania paliwa lotniczego do wód gruntowych.

Badania innych autorów wskazują także, że obniżenie stężeń węglowodorów w glebach osiąga się także obsiewając zanieczyszczoną powierzchnię roślinnością, a następnie przeprowadzając zabiegi np. mikoryzowania, które stymulują rozwój flory rozkładającej węglowodory [12, 20]. Podobne działania przeprowadzone na badanym terenie mogłyby poprawić efektywność likwidacji warstwy LNAPL występującej na zwierciadle wód. Zanieczyszczona węglowodorami woda gruntowa systemem rowów odwadniających teren bazy lotniczej migruje dalej do wód powierzchniowych (potok Pępicki), co może powodować znaczne rozszerzenie strefy oddziaływania tych związków na środowisko, co podkreślają Batlle-Aguilar i wsp. [1].

PODSUMOWANIE

Przez ponad czterdzieści lat funkcjonowania lotniska w Skarbimierzu, kiedy gospodarowali tam żołnierze JAR., nastąpiła znaczna degradacja środowiska na tym terenie. Nieumiejętne obchodzenie się z materiałami ropopochodnymi, korozja, a tym samym nieszczelność instalacji oraz niedbalstwo ludzi doprowadziło do katastrofy ekologicznej na omawianym terenie, której skutki odczuwalne są do dziś. Prowadzona od roku 1995 rekultywacja terenu przyniosła wymierne skutki w postaci zmniejszenia się ilości zanieczyszczeń ropopochodnych – miąższości fazy LNAPL, ale brak kontynuacji tych działań spowodował spowolnienie procesu usuwania zanieczyszczeń, a tym samym rozprzestrzeniania się ich. Zanotowano, że produkty ropopochodne stale występują w wodach gruntowych w postaci rozpuszczonej lub fazy LNAPL, tworząc plamę o miąższości dochodzącej do 13 mm. Stanowi to nadal realne zagrożenie dla sąsiadujących z terenem lotniska pól uprawnych.

Przeprowadzone badania w większości oznaczeń wykazały podobny stopień zanieczyszczenia przez wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne oraz węglowodory monoaromatyczne, w każdym z badanych piezometrów na terenie lotniska. Porównanie wyników wykazało jedynie znikomą, niewielką zmienność parametrów między danymi z jesieni 2009 i wiosny 2010. Biorąc pod uwagę ilości wszystkich badanych zanieczyszczeń i porównując z wartościami granicznymi dla poszczególnych klas jakości wód podziemnych (określonych rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 23 lipca 2008 w sprawie kryteriów i sposobu oceny stanu wód podziemnych), wody na tym terenie można zakwalifikować do V klasy czystości. Potencjalnym zagrożeniem, jakie niesie za sobą zanieczyszczenie terenu lotniska, jest możliwość migracji produktów ropopochodnych wraz z kierunkiem przepływu wód gruntowych do miejsc, z których pobierana jest po dzień dzisiejszy woda do spożycia dla ludzi i zwierząt oraz do pobliskiego potoku Pempickiego, którego zlewnię stanowi także zanieczyszczony teren. Głównym kierunkiem działań na badanym terenie powinno być dążenie do możliwie najbardziej efektywnego usunięcia warstwy LNAPL z wód podziemnych, co może poprawić ich jakość, a tym samym jakość całego ekosystemu.

LITERATURA

- [1] Battle-Aguilar J., S. Brouycre, A. Dassargues, B. Morasch, D. Hunkeler, P. Höhener, L. Diels, K. Vanbroekhoven, P. Seuntjens, H. Halen: *Benzene dispersion and natural attenuation in an alluvial aquifer with strong interactions with surface water*, Journal of Hydrology, **369**, 305–317, (2009).
- [2] Biedrowski Z., M. Troć: *Zanieczyszczenie gruntów i wód gruntowych substancjami ropopochodnymi na wybranych stacjach paliw CPN w Wielkopolsce* [in:] Współczesne problemy hydrogeologii (red.) Górski, Liszkowska t. VIII, 261–264, (1997).
- [3] Ciesielczuk T., Cz. Rosik-Dulewska, T. Nabzdzyjak: *Występowanie węglowodorów alifatycznych oraz wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych w wodach podziemnych na terenie magazynu paliw bazy lotniczej*, Ecological Chemistry and Engineering, **13 S4**, 531–538, (2006).
- [4] Day M.J., R.F. Reinke, J.A.M. Thomson: *Fate and Transport of Fuel Components Below Slightly Leaking Underground Storage Tanks*, Environmental Forensics, **2**, 21–28, (2001).
- [5] Freitas J.G., M.T. Mocanu, J.L.G. Zoby, J.W. Molson, J.F. Barker: *Migration and fate of ethanol-enhanced gasoline in groundwater: A modelling analysis of a field experiment*, Journal of Contaminant Hydrology, **119**, 25–43, (2011).
- [6] Jia Y., L.R. Bakken, G.D. Breedveld, P. Aagaard, A. Frostegard: *Organic compounds that reach subsoil may threaten groundwater quality; effect of benzotriazole on degradation kinetics and microbial community composition*, Soil Biology & Biochemistry, **38**, 2543–2556, (2006).
- [7] Karczyńska A.K., J. Kiepuski: *Rekultywacja terenu wylewiska odpadów z odwiertów wydobywczych ropy naftowej*, Inżynieria Ekologiczna, **19**, 89–96, (2007).
- [8] Kaszycki P., A. Krawczyk, H. Kołoczek: *Stan i perspektywy biodegradacji ropopochodnych zanieczyszczeń w glebach południowej części Polski*, Inżynieria Ekologiczna, **7**, 15–22, (2002).
- [9] Kołwzan B.: *Wykorzystanie mikroorganizmów do oczyszczania gruntów skażonych produktami naftowymi*, Inżynieria Ekologiczna, **7**, 36–44, (2002).
- [10] Lee M., H. Kang, W. Do: *Application of nonionic surfactant-enhanced in situ flushing to a diesel contaminated site*, Water Research, **39**, 139–146, (2005).
- [11] Małachowska-Jutz A., K. Miksch: *Influence of used oil on some plant species*, Archives of Environmental Protection, **30(2)**, 95–106, (2004).
- [12] Małachowska-Jutz A., J. Rudek, W. Janosz: *The effect of Ribwort (Platango lanceolata) and its mycorrhizas on the growth of microflora in soil contaminated with used engine oil*, Archives of Environmental Protection, **37(1)**, 99–114, (2011).
- [13] Mazzeo D.E.C., C.E. Levy, D. de Franceschi de Angelis, M.A. Marin-Morales: *BTEX biodegradation by bacteria from effluents of petroleum refinery*, Science of the Total Environment, **408**, 4334–4340, (2010).
- [14] Miles B., R. Maji, E.A. Sudicky, G. Teutsch, A. Peter: *A pragmatic approach for estimation of source-zone emissions at LNAPL contaminated sites*, Journal of Contaminant Hydrology, **96**, 83–96, (2008).
- [15] Park I.S., J.W. Park: *Determination of a risk management primer at petroleum-contaminated sites: Developing new human health risk assessment strategy*, Journal of Hazardous Materials, **185**, 1374–1380 (2011).
- [16] Przybulewska K., A. Wiczorek: *Biodegradation of metyl izobutyl ketone (MIBK) by Fusarium solani*, Archives of Environmental Protection, **35(3)**, 3–10, (2009).
- [17] Riccardi C., P. Di Filippo, D. Pomata, F. Inconato, M. Di Basilio, M.P. Papini, S. Spicaglia: *Characterization and distribution of petroleum hydrocarbons and heavy metals in groundwater from three Italian tank farms*, Science of the total Environment, **393**, 50–63, (2008).
- [18] Saponaro S., M. Negri, E. Sezenna, L. Bonomo, C. Sorlini: *Groundwater remediation by an in situ biobarrier: A bench scale feasibility test for methyl tert-butyl ether and other gasoline compounds*, Journal of Hazardous Materials, **167**, 545–552, (2009).
- [19] Stempvoort van D., K. Biggar: *Potential for bioremediation of petroleum hydrocarbons in groundwater under cold climate conditions: A review*, Cold Regions Science and Technology, **53**, 16–41, (2008).
- [20] Zablocka-Godlewska E., W. Przystaś: *The effects of Papilionaceous plants and biopreparation on petroleum hydrocarbons degradation In aged-polluted soil*, Archives of Environmental Protection, **32(4)**, 53–66, (2006).
- [21] Zdenkowski J., A. Rybka: *Pilotażowa instalacja in situ oczyszczania środowiska gruntowo-wodnego na terenie bazy ZGPN-CPN w Kielcach-Białogonie metodą DDC System Hydrocarbons remediates in groundwater and soil by injecting oxygen to wells to promote natural aerobic activity*, [in:] Kompleksowa ocena oddziaływania lotniska wojskowego Poznań – Krzesiny na środowisko, Wrocław (1999).
- [22] Żak M., J. Konieczny: *Comparison of benzene and its alkylated derivatives profiles in car's fuels, engine exhaust gases and in air in the vicinity of communication arteries*, Archives of Environmental Protection, **34(2)**, 3–12, (2008).