

Migracja zanieczyszczeń ropopochodnych w gruntach piaszczystych na granicy stref aeracji i saturacji

Gwoździewicz Michał¹, Kuna Patrycja¹, Lubowicz Ariel¹



M.Gwoździewicz P. Kuna

A. Lubowicz

Migration of total petroleum hydrocarbon (TPH) contaminations at boundary of aeration and saturation zones in sandy soils. *Prz. Geol.*, 59: 69–73.

A b s t r a c t. The paper presents studies results of total petroleum hydrocarbon (TPH) contaminations migration in sandy formations on the post-industrial area in Katowice in aspect their horizontal migration between aeration and saturation zones. In all investigated soil samples were determined mineral oils ($>C_{12}$), gasoline (C_6-C_{12}) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) content and were also defined coefficient of filtration. Both mineral oils and gasoline belongs to organic liquids group lighter than water. Researches were supplemented with simulation of ground and underground

water contamination state, round investigated area and also migration of petroleum hydrocarbon (TPH) contaminations model in examined grounds. The correlation between seasonal position of underground water level and total petroleum hydrocarbon (TPH) contaminations content in ground vertical profile was also showed. Besides variations of filtration rate in relation to petroleum hydrocarbon (TPH), light non-aqueous phase liquids (LNAPL) contaminations content was presented, as well.

Keywords: total petroleum hydrocarbon, light non-aqueous phase liquids, mineral oils, gasoline, soil, contamination, migration

Migracja zanieczyszczeń ropopochodnych (LNAPL – light non-aqueous phase liquids – ciecz organiczna lżejsza od wody) (Malina, 1998), jako odrębnej fazy w gruntach, jest procesem bardziej złożonym niż transport wody lub zanieczyszczeń w roztworach wodnych. Zmiany własności fizyko-chemicznych zachodzące w trakcie transportu, biodegradacja, duża lepkość i gęstość, sorpcja na szkielet ziarnowy, a zarazem lotność części związków ropopochodnych, powodują duże utrudnienia w opisie przemieszczania się omawianych substancji w gruntach strefy aeracji i saturacji. Prędkość migracji tych związków maleje ze spadkiem stężenia oraz wraz ze zmianami fizycznymi, takimi jak zwiększenie lepkości i gęstości, a także z czasem przebywania w gruncie. W strefie aeracji transport zanieczyszczeń ropopochodnych trwa o wiele dłużej niż przepływ wody. Po pewnym czasie przechodzą one w etap stabilizacji i prędkość migracji spada praktycznie do zera. W piaskach strefy aeracji związki ropopochodne przemieszczają się głównie w kierunku pionowym (siły grawitacji, dyfuzja wywołana przez różnicę ciśnień i gradient hydrauliczny) oraz w niewielkim stopniu poziomo (siły kapilarne). Transport pionowy zanika, gdy infiltrujący front zanieczyszczenia osiąga powierzchnię zwierciadła wód podziemnych. Po osiągnięciu tego poziomu substancje ropopochodne migrują na powierzchni wody zgodnie z kierunkiem przepływu wód podziemnych, aż do osiągnięcia tzw. nasycenia rezydualnego lub lepkości i gęstości tak dużej, że dalsze przemieszczanie się LNAPL jako odrębnej fazy jest niemożliwe (Malina, 1996). Wraz z sezonowymi zmianami położenia zwierciadła wody powstają poziome strefy wzbogacone w LNAPL na różnych głębokościach profilu pionowego. W górnej części profilu gruntowego, gdzie zawartość wilgoci jest niska, a stężenia zanieczyszczeń ropopochodnych są bardzo wysokie, następuje przesylenie gruntu LNAPL w stopniu tak dużym, że staje się on praktycznie nieprze-

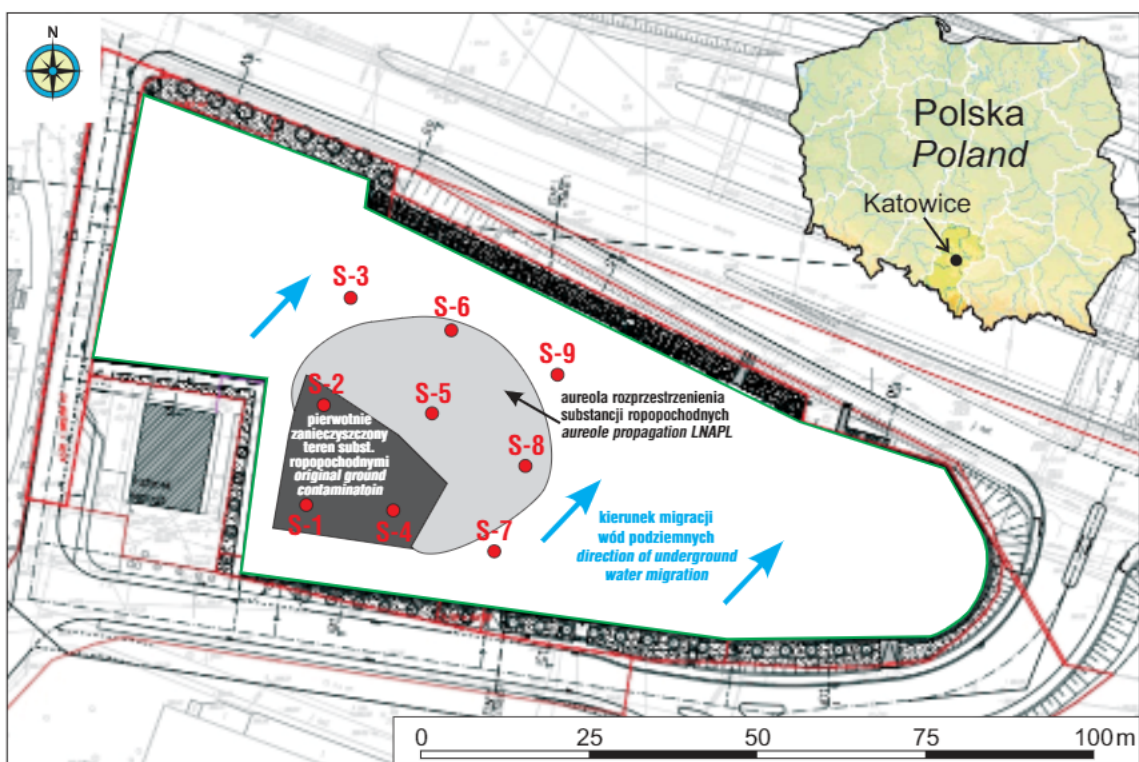
puszczalny dla wody. Sytuacja taka ma miejsce gdy cała przestrzeń porowa wypełniona jest substancją ropopochodną, a większość ziarn mineralnych pokrytych jest warstwą LNAPL.

Zakres i metodyka badań

Teren badań zlokalizowany jest na obszarze poprzemysłowym (wydzielona i sprzedana część terenu po byłej hucie *Baildon*) w bezpośrednim sąsiedztwie Trasy Średnicowej (ul. Chorzowska) w Katowicach. Obecnie omawiany teren podlega rekultywacji i częściowej wymianie gruntów z przeznaczeniem pod zabudowę biurową. Pierwotna strefa skażenia powstała w latach 70. i 80. ubiegłego wieku, w wyniku zdeponowania na obszarze ok. 300 m² różnego typu olejów, smarów, paliw płynnych, smółek, substancji smolistych i odpadów organicznych pochodzących z procesów hutniczych. Osadzały się one w tzw. „zbiorniku”, czyli wykopanych w tym celu dołach chłonnych. Ogólny plan badanego terenu, wraz z lokalizacją otworów badawczych i miejsc pierwotnego zrzutu zanieczyszczeń organicznych na powierzchnię oraz z kierunkiem przepływu wód podziemnych, prezentuje ryc. 1.

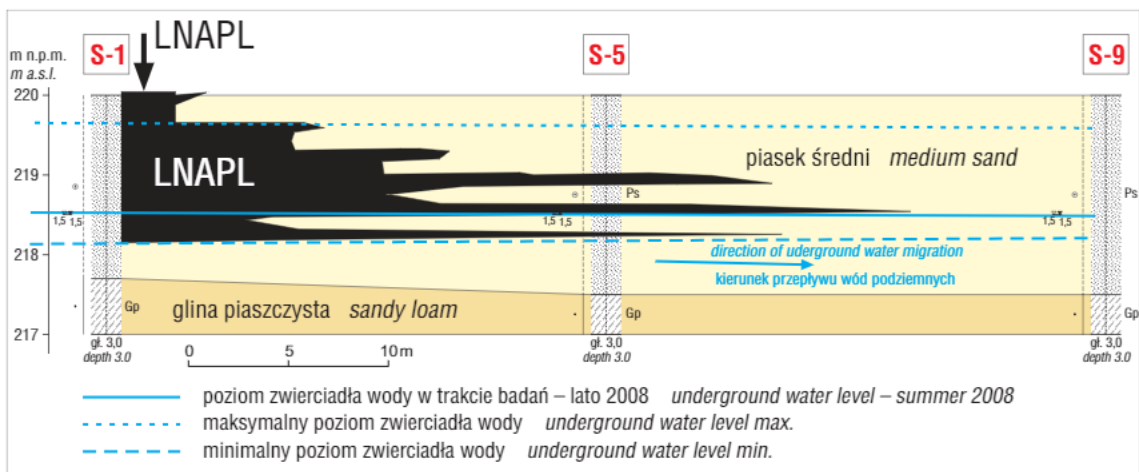
Prace terenowe, sondowania oraz pobór próbek gruntów, wykonali pracownicy Zakładu Monitoringu Środowiska Głównego Instytutu Górniczego (GIG) w Katowicach. Do sondowań użyto sondy udarowej HM 1800 firmy *Makita* oraz próbników rurowych o średnicy 100 mm. Próbkę gruntów pobrano z dziewięciu otworów (S1–S9). Przykładowy przekrój geologiczny badanego terenu, wykonany dla trzech otworów usytuowanych w zależności od sposobu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń ropopochodnych w piaskach strefy aeracji i saturacji, przedstawiono na ryc. 2. Rdzenie uzyskane z każdego sondowania dzielono na dwie próbki, przy czym pierwszą próbkę stanowił materiał

¹Główny Instytut Górniczo-Hutniczy, Zakład Monitoringu Środowiska, Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice; m.gwozdziejewicz@gig.eu, p.kuna@gig.eu, a.lubowicz@gig.eu.



Ryc. 1. Lokalizacja punktów sondowań badawczych wraz ze strefą skażoną substancjami ropopochodnymi oraz strefą rozprzestrzenienia się zanieczyszczeń

Fig. 1. Localization of sounding with contaminated area by petroleum hydrocarbon (THP) contaminations and zone of migrating contaminations



Ryc. 2. Przekrój geologiczny badanego terenu ilustrujący sposób rozprzestrzenienia się zanieczyszczeń ropopochodnych na granicy stref aeracji i saturacji

Fig. 2. Geological section of investigated area presetting the type of TPH contaminations migration between aeration and saturation zones

pochodzący z głębokości do 1,0 m p.p.t. (Sn/1, n – numer otworu), a drugą materiał pobrany z przedziału 1,0–2,0 m p.p.t. (Sn/2).

Próbki o naturalnej wilgotności (NW) i nienaruszonej strukturze (NNS) pobrano zgodnie z wymaganiami zawartymi w pracy J. Namieśnika i współautorów (1995) oraz Maliny i Szczepańskiego (1994). Badania wykonano w Laboratorium Analiz Związków Organicznych oraz w Pracowni Analiz Ekologicznych GIG w Katowicach.

We wszystkich próbkach określona została zawartość substancji ropopochodnych i wybranych wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) oraz współczynniki filtracji.

Oznaczenie WWA. Próbkę o masie 10g, w stanie powietrzno-suchym (suszenie do 24h), poddano przyspieszonej ekstrakcji za pomocą rozpuszczalnika w ekstraktorze ASE 200 firmy Dionex. Ekstrakcja przebiegała w warunkach podwyższonego ciśnienia i temperatury. Parametry pracy ekstraktora: temp. 100°C, ciśnienie 100 atm, czas trwania cyklu: 20 min (5 min grzanie wstępne, 15 min grzanie statyczne), rozpuszczalnik: mieszanina dichlormetan – aceton (1:1). Ekstrakt zatężono w wyparce próżniowej, po czym odparowano do sucha w strumieniu azotu. Odparowaną próbkę rozpuszczono następnie w 1 ml acetonitrylu i poddano analizie stosując technikę wysokosprawnej chromatografii cieczowej (HPLC – High Performance

Liquid Chromatography). Do badań użyto chromatografu cieczowego HPLC 1200 Series firmy *Agilent Technologies* wyposażonego w detektor FLD, z kolumną *LiChrospher PAH 250-4* i fazą ruchomą: acetonitryl – woda w układzie gradientowym (przepływ 1,0 ml/min) (Kuna, 2008).

Oznaczanie substancji ropopochodnych (olei mineralnych). Oznaczanie niepolarnych węglowodorów alifatycznych wykonano metodą spektrofotometrii w podczerwieni. Substancje ropopochodne z badanych próbek ekstrahowano tetrachlorkiem węgla (CCl_4). Z uzyskanych ekstraktów wydzielono związki polarne przez ich adsorpcję na aktywowanym tritlenku diglinu (Al_2O_3). Zawartość pozostałych w ekstrakcie niepolarnych węglowodorów alifatycznych określona została za pomocą spektrofotometrycznego pomiaru w podczerwieni, w zakresie liczb falowych $3200\text{--}2700\text{ cm}^{-1}$. Miarą zawartości oznaczanych związków jest wartość absorbancji przy liczbie falowej 2926 cm^{-1} . Oznaczenia wykonano na spektrofotometrze *FT-IR 1615* firmy *PerkinElmer*.

Oznaczanie współczynników filtracji. Współczynnik filtracji oznaczono dwoma sposobami: metodą połową (na terenie skażonym oraz „czystym”) z użyciem terenowego infiltrometru *Guelpha* oraz, w celu potwierdzenia wyników badań terenowych, metodą laboratoryjną w dwóch

seriach na próbkach NNS, za pomocą przepuszczalnościomierza laboratoryjnego firmy *Eijkelkamp*. Pomiar laboratoryjny odbywał się przy stałym poziomie wody. Metoda stałego poziomu jest używana w przypadku gruntów dobrze przepuszczalnych, takich jak piaski i piaski pylaste. Badania wodoprzepuszczalności przypowierzchniowej warstwy terenu wykonywano latem 2008 r. Wilgotność gruntów w terenie mierzono wilgotnościomierzem *ThetaProbe*. Badania współczynnika filtracji wykonywano od powierzchni terenu do głębokości ok. 1,5 m p.p.t. w dziewięciu miejscach położonych w bezpośredniej bliskości otworów, z których pobierano próbki do badań laboratoryjnych. Wyniki oznaczeń współczynnika filtracji badanych próbek (NNS) oraz próbek oczyszczonych z substancji organicznych zaprezentowano w tabeli 1.

Wyniki badań i ocena badanych gruntów

Ocenę stopnia zanieczyszczenia gruntów pobranych na omawianym terenie wykonano zgodnie z *Rozporządzeniem Ministra Środowiska* z dnia 9 września 2002 r. Dopuszczalne zawartości badanych zanieczyszczeń organicznych przedstawione są w tabeli 2. Badany teren należy do grupy „C” – teren poprzemysłowy. Bardzo duże dopuszczalne dla tej grupy zawartości zanieczyszczeń organicznych zezwalają na pozostawienie przez szereg lat wielu

Tab. 1. Wartość współczynników filtracji badanych próbek przed usunięciem i po usunięciu z nich substancji organicznych
Table 1. Filtration coefficients value of tested samples before and after organic matter elimination

Sondowanie/próbka <i>Sounding/sample</i>	Rodzaj próby <i>Sample type</i>	Współczynnik filtracji (m/s) z LNAPL <i>Filtration coefficient (m/s) with LNAPL</i>	Współczynnik filtracji (m/s) bez LNAPL <i>Filtration coefficient (m/s) without LNAPL</i>
S-1/1	nasyp z gruzu i piasku średniego <i>rubble with medium sand bank</i>	$3,1 \times 10^{-5}$	$4,3 \times 10^{-4}$
S-1/2	piasek średni, żółty i czarny, mokry <i>yellow, black, wet and medium sand</i>	$8,4 \times 10^{-6}$	$3,1 \times 10^{-4}$
S-2/1	nasyp z gruzu i piasku średniego <i>rubble with medium sand bank</i>	$4,3 \times 10^{-5}$	$5,3 \times 10^{-4}$
S-2/2	piasek średni, żółty i czarny, mokry <i>yellow, black, wet and medium sand</i>	$2,1 \times 10^{-5}$	$3,9 \times 10^{-4}$
S-3/1	nasyp z gruzu i piasku średniego <i>rubble with medium sand bank</i>	$2,4 \times 10^{-4}$	$4,7 \times 10^{-4}$
S-3/2	piasek średni i drobny, żółty, mokry <i>yellow, wet, medium and fine sand</i>	$1,2 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-4}$
S-4/1	nasyp z gruzu i piasku średniego <i>rubble with medium sand bank</i>	$4,9 \times 10^{-5}$	$4,4 \times 10^{-4}$
S-4/2	piasek średni i gruby, żółty, szary i mokry <i>yellow, grey, wet, medium and coarse sand</i>	$8,0 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-3}$
S-5/1	nasyp z gruzu i piasku średniego <i>rubble with medium sand bank</i>	$2,2 \times 10^{-5}$	$4,9 \times 10^{-4}$
S-5/2	piasek średni, żółty i szary, mokry <i>yellow, grey, wet and medium sand</i>	$4,8 \times 10^{-5}$	$8,2 \times 10^{-4}$
S-6/1	piasek średni, żółty, wilgotny <i>yellow, humid and medium sand</i>	$6,3 \times 10^{-4}$	$6,3 \times 10^{-4}$
S-6/2	piasek średni, żółty, mokry <i>yellow, wet and medium sand</i>	$6,7 \times 10^{-4}$	$6,7 \times 10^{-4}$
S-7/1	piasek drobny, żółty, wilgotny <i>yellow, wet and fine sand</i>	$2,3 \times 10^{-5}$	$2,3 \times 10^{-5}$
S-7/2	piasek średni i gruby, żółty, mokry <i>yellow, wet, medium and coarse sand</i>	$1,1 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$
S-8/1	piasek średni żółty i szary, mokry <i>yellow, grey, wet and medium sand</i>	$1,6 \times 10^{-4}$	$2,9 \times 10^{-4}$
S-8/2	piasek średni żółty i szary, mokry <i>yellow, grey, wet and medium sand</i>	$4,5 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-4}$
S-9/1	nasyp z gruzu i piasku średniego <i>rubble with medium sand bank</i>	$2,2 \times 10^{-4}$	$5,8 \times 10^{-4}$
S-9/2	piasek średni, żółty, mokry <i>yellow, wet and medium sand</i>	$3,2 \times 10^{-4}$	$7,2 \times 10^{-4}$

silnie skażonych terenów bez jakichkolwiek zabiegów rekultywacyjnych, co prowadzi do rozprzestrzeniania się niepożądanych substancji na przyległe obszary niezanieczyszczone.

Wyniki oznaczeń zawartości zanieczyszczeń organicznych (olei mineralnych, sumy benzyn oraz WWA) zaprezentowano w tabeli 3. Wyniki badań próbek gruntów pobranych zarówno w partiach płytszych, jak i głębszych, wykazały bardzo wysokie zawartości substancji ropopochodnych, niskie i średnie zawartości węglowodorów aromatycznych oraz brak skażeń benzynami. Współczynniki filtracji zmieniały się w przedziale od $1,5 \times 10^{-3}$ do $8,4 \times 10^{-6}$ m/s. Zawartość WWA w analizowanym materiale wynosiła od ok. 0,1 do 259 mg/kg. Prawie we wszystkich badanych próbkach zawartość sumy WWA nie przekraczała 250 mg/kg. Jedynie w gruntach pobranych z głębokości 0–1 m z otworu S2 stwierdzono stężenie WWA nieznacznie wyższe od dopuszczalnej normy. Analizowane grunty zawierały oleje mineralne w ilości od ok. 300 mg/kg (w próbkach „czystych”) do 11 400 mg/kg. Większość próbek charakteryzowała się wyższym stężeniem olejów mineralnych niż dopuszczalne, które według *Rozporządzenia Ministra Środowiska* (2002) nie może przekraczać 3000 mg/kg. Wyłącznie w próbkach pobranych z profili S-3, S-7 i S-9 wszystkie uzyskane wyniki były poniżej wartości 250 mg/kg, w związku z czym nie zostały one przedstawione. Ze względu na

bardzo wysokie zawartości szkodliwych zanieczyszczeń organicznych badane grunty zaklasyfikowano jako materiał odpadowy. Dodatkowo stwierdzono wyraźne obniżenie własności filtracyjnych gruntów silnie skażonych substancjami ropopochodnymi. Przy zanieczyszczeniu, gdzie prawie wszystkie ziarna kwarcu badanych piasków otoczone są substancjami ropopochodnymi, współczynnik wodoprzepuszczalności obniża się o około dwa rzędy wielkości.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono zanieczyszczenie badanych gruntów substancjami ropopochodnymi na obszarze obejmującym ok. 2500 m². Uzyskane wyniki pozwoliły określić sposób rozprzestrzeniania się tych zanieczyszczeń. Od ostatnich 20–30 lat strefa pierwotnego skażenia gruntów jest całkowicie przesycona substancjami ropopochodnymi typu smół i olei mineralnych. Jej zanieczyszczenie sięga od powierzchni gruntu do głębokości najniższego zalegania zwierciadła wód podziemnych. Substancje ropopochodne powoli rozprzestrzeniały się horyzontalnie po granicy stref aeracji i saturacji w kierunku przepływu wód podziemnych w postaci poziomów powstających na różnych głębokościach – w zależności od okresowego położenia zwierciadła wód. Obecnie, wskutek zwiększenia lepkości i gęstości, zanieczyszczenia

Tab. 2. Dopuszczalne wartości stężeń zanieczyszczeń w glebie i ziemi [mg/kg suchej masy] wg *Rozporządzenia Ministra Środowiska* (2002)

Table 2. Quality standard in soil and ground [mg/kg of dry mass] according to *Rozporządzenie Ministra Środowiska* (2002)

Zanieczyszczenie Contamination	Grupa A Group A	Grupa B Group B				Grupa C Group C					
		Głębokość (m p.p.t.) Depth (m p.p.t.)									
		0–0,3		0,3–15,0		> 15,0		0–2,0		2,0–15,0	
		Wodoprzepuszczalność gruntów (m/s) Water permeability of soils (m/s)									
		do to		poniżej below		do to		poniżej below		Dopuszczalne wartości* Max. acceptable values*	
1×10^{-7}		1×10^{-7}		1×10^{-7}		1×10^{-7}		1×10^{-7}			
Olej mineralny (>C ₁₂) Mineral oil (>C ₁₂)	30	50	200	1000	1000	3000	3000	1000	3000		
Σ Benzyny (C ₆ ÷C ₁₂) Σ Gasoline (C ₆ ÷C ₁₂)	1	1	5	375	50	750	500	50	750		
Naftalen Naphthalene	0,1	0,1	5	20	10	40	50	10	40		
Fenantren Phenanthrene	0,1	0,1	5	20	10	40	50	10	40		
Antracen Anthracene	0,1	0,1	5	20	10	40	50	10	40		
Fluoranten Fluoranthene	0,1	0,1	5	20	10	40	50	10	40		
Chryzen Chrysene	0,1	0,1	5	20	10	40	50	10	40		
Benzo(a)antracen Benzo(a)anthracene	0,1	0,1	5	20	10	40	50	10	40		
Benzo(a)piren Benzo(a)pyrene	0,02	0,03	5	10	5	40	50	5	40		
Benzenofluoranten Benzo(a)fluoranthene	0,1	0,1	5	10	5	40	50	5	40		
Benzo(g,h,i)perylene Benzo(g,h,i)perylene	0,1	0,1	10	10	5	40	50	5	100		
Σ WWA Σ PAH	1,0	1,0	20	40	20	200	250	20	200		

*Dopuszczalne wartości dla próbek pobranych z badanego terenu

*Max. acceptable values for samples taken from investigated area

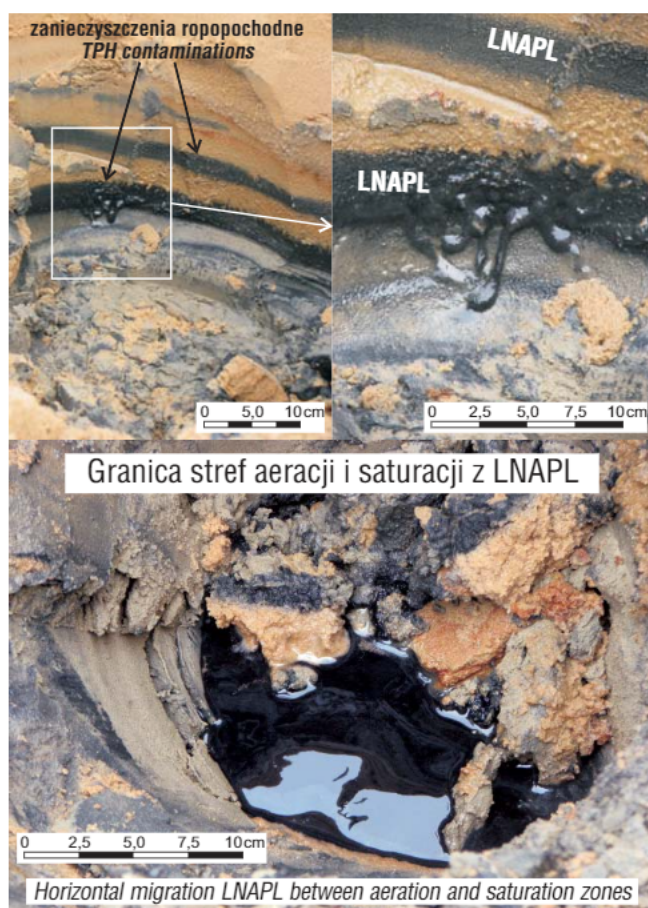
Tab. 3. Zawartości zanieczyszczeń organicznych w badanych próbkach [mg/kg]

Table 3. Organic contaminations content in samples investigated [mg/kg]

Składnik Component	S-1/1	S-1/2	S-2/1	S-2/2	S-4/1	S-4/2	S-5/1	S-5/2	S-6/1	S-6/2	S-8/1	S-8/2
Olej mineralny (>C ₁₂) Mineral oil (>C ₁₂)	8600*	10 400*	11 400*	3600*	6800*	7600*	2300	5800*	1400	3200*	1100	3100*
Σ Benzyny (C ₆ ÷C ₁₂) Σ Gasoline (C ₆ ÷C ₁₂)	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Naftalen Naphthalene	7,51	8,32	6,84	3,11	3,49	4,87	0,55	2,92	0,85	0,34	0,12	0,19
Fenantren Phenanthrene	23,95	51,16*	63,92*	21,60	28,5	28,12	0,39	23,9	0,43	0,03	1,55	1,04
Antracen Anthracene	14,88	54,63*	60,22*	27,10	11,43	21,13	0,54	20,2	0,09	< 0,01	1,03	< 0,01
Fluoranten Fluoranthene	9,34	18,05	19,07	12,00	12,00	12,04	1,58	9,07	0,67	0,16	2,80	0,52
Chryzen Chrysene	8,21	12,24	13,45	3,73	6,10	4,95	1,26	3,21	0,24	0,95	< 0,01	0,41
Benzo(a)antracen Benzo(a)anthracene	9,92	24,66	59,62*	9,81	9,23	9,06	0,13	9,66	0,03	0,01	0,03	2,59
Benzo(a)piren Benzo(a)pyrene	15,8	14,10	19,90	6,54	8,31	9,94	0,29	10,6	0,06	0,09	0,23	0,14
Benzenofluoranten Benzo(a)fluoranthene	4,65	9,70	8,65	3,11	3,26	3,96	0,32	4,65	0,34	1,07	< 0,01	0,16
Benzo(g,h,i)perylene Benzo(g,h,i)perylene	6,08	9,67	7,34	5,76	5,76	5,76	0,16	6,22	< 0,01	0,08	0,81	0,06
Σ WWA Σ PAH	100,34	202,53	259,01*	92,76	88,08	99,83	5,22	90,43	2,72	2,36	0,81	3,88

*Wartości przekroczone względem dopuszczalnych stężeń wg Rozporządzenia Ministra Środowiska (2002) (zob. tab. 2)

*Values above specification limit according to Rozporządzenie Ministra Środowiska (2002) (see Table 2)



Ryc. 3. Zdjęcia poziomych stref zanieczyszczonych substancjami ropopochodnymi w gruncie na granicy stref aeracji i saturacji

Fig. 3. Photographs of horizontal THP contaminated areas in ground between aeration and saturation zones

te osiągnęły stan stabilizacji w górotworze, a dalsza ich migracja następuje już tylko w wyniku rozpuszczania części związków w wodach podziemnych oraz parowania w przestrzeni porową gruntów (silny zapach fenolu). Badania uwidoczniły wyraźny wpływ substancji ropopochodnych na zmniejszenie się współczynnika filtracji badanych próbek piasków (nawet o dwa rzędy wielkości). Aureola zanieczyszczeń rozciągająca się wokół pierwotnie skażonego terenu uwidacznia się jedynie w spągowych częściach sondowań badawczych na głębokościach od ok. 1,0 m p.p.t. do ponad 2,0 m p.p.t., co prezentują zdjęcia z wykopów badawczych (ryc. 3). Taki sposób migracji może powodować zaniżenie szacowanej powierzchni obszaru skażonego, jeśli ocenie podlegają jedynie płytko pobierane próbki gruntów.

Literatura

- KUNA P. 2008 – Ocena skażenia środowiska glebowego wielopierścieniowymi węglowodorami aromatycznymi (WWA) na terenach rolniczych zlokalizowanych w pobliżu zakładów koksowniczych. II Konferencja Aktualne Problemy Chemii Analitycznej, 30 maja 2008 r., Katowice.
- NAMIEŚNIK J., ŁUKASIAK J. & JAMRÓGIEWICZ Z. 1995 – Pobieranie próbek środowiskowych do analizy. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- MALINA G. 1996 – Badania sorpcji węglowodorów ropopochodnych w gruncie piaszczystym strefy aeracji. Stałe podziały dla liniowych izoterm i kinetyka sorpcji. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 12: 507–531.
- MALINA G. 1998 – Wielofazowa migracja zanieczyszczeń ropopochodnych w strefie aeracji i saturacji. Inżynieria i Ochrona Środowiska, 1: 87–104.
- MALINA G. & SZCZEPAŃSKI A. 1994 – Wskazówki metodyczne do oceny stopnia zanieczyszczenia gruntów i wód podziemnych produktami ropopochodnymi i innymi substancjami chemicznymi w procesach rekultywacji. Biblioteka Monitoringu Środowiska, PIOŚ, Warszawa.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi (Dz. U. Nr 165, poz. 1359).

Praca wpłynęła do redakcji 14.12.2009 r.

Po recenzji akceptowano do druku 02.02.2010 r.

