

## Badania przepuszczalności gruntów piaszczystych dla typowych zanieczyszczeń ropopochodnych

Józef Mikołajków\*



Research permeability on sandy grounds for typical petroleum pollutants. *Prz. Geol.*, 54: 993–995.

*S u m m a r y.* Percolation parameters of petroleum distillation products (diesel oil and petrol) in fine, medium and coarse sands were measured. The results are compared to water permeability coefficients. The petrol permeability coefficient is 2–3 times higher than for water and the most meaningful differences were found for fine sands. The permeability coefficient of diesel oil is 2–5 times lower than the same parameter for water, and the most significant difference was noted for coarse sands.

**Key words:** petroleum pollution, pollution transport

Produkty ropopochodne stanowią jedno z poważniejszych zagrożeń środowiska naturalnego. Wraz ze zwiększeniem się ich wykorzystania niebezpieczeństwo wzrasta, często na skutek nieodpowiedzialności człowieka. Nieumiejętne korzystanie, zaniedbania i zaniechania w modernizacji infrastruktury, spowodowane brakiem wiedzy i przygotowania merytorycznego, a także niewystarczającym wsparciem ekonomicznym, zbyt często prowadziły do emisji tego typu zanieczyszczeń do środowiska.

W ostatnich latach zdecydowanie poprawiła się zarówno jakość, jak i kontrola systemów oraz urządzeń związanych z magazynowaniem, transportem i dystrybucją paliw, wzrosło także tempo usuwania ze środowiska zanieczyszczeń ropopochodnych. Pomimo tego w wielu miejscach (przy rafineriach, magazynach i stacjach paliw, na lotniskach itp.) ciągle jeszcze występują znaczne ilości zanieczyszczeń. Miąższość warstwy gruntu powyżej zwierciadła wód podziemnych, w której pory lub szczeliny są wypełnione wolnym produktem ropopochodnym (fazą wolną) może osiągać nawet kilka metrów.

Migracja produktów ropopochodnych niejednokrotnie przebiega niezależnie od fazy wodnej — gdyż są to zanieczyszczenia niemieszające się z wodą (*Non Aquos Phase of Liquid* — NAPL). Ocena prędkości migracji typowych zanieczyszczeń odgrywa dużą rolę w ocenie zagrożeń, jakie stwarzają produkty ropopochodne w środowisku gruntowo-wodnym (często gromadzące się od wielu lat), a także w wypadkach, w których jednorazowo dochodzi do wycieku znacznej ilości paliwa (np. wypadek cysterny przewożącej kilka lub kilkanaście ton paliwa). Ocena prędkości migracji fazy wolnej produktu ropopochodnego ma istotne znaczenie w planowaniu i prowadzeniu akcji ratunkowych i działań zaradczych.

Najczęściej zanieczyszczenia tego typu powodują najpopularniejsze paliwa — benzyna i olej napędowy. Sposób ich rozchodzenia się zależy od właściwości cieczy migrującej, przede wszystkim od gęstości, lepkości dynamicznej oraz kinematycznej cieczy, a także napięcia powierzchniowego. Pozostałe właściwości, takie jak lotność, rozpuszczalność w wodzie czy zawartość procentowa poszczególnych węglowodorów, wpływając na wymienione wcześniej parametry, pośrednio decydują o ostatecznych właściwościach migracyjnych substancji zanieczyszczających — ciekłych, wolnych węglowodorów.

Benzyna jest mieszaniną ciekłych, nasyconych węglowodorów alifatycznych (parafinowych), naftenowych i aromatycznych (czasami z niewielką domieszką węglowodorów nienasyconych), przeciętnie zawiera od 4 do 10 atomów węgla w cząsteczce. Węglowodory parafinowe (alkany), o ogólnym wzorze  $C_nH_{2n+2}$ , cechuje duża bierność chemiczna, podobnie jak nafteny. Najczęściej występującym węglowodorem aromatycznym jest benzen ( $C_6H_6$ ) i jego pochodne: toluen, etylobenzen, ksyleny itp. Benzen jest cieczą lotną, toksyczną, słabo rozpuszczalną w wodzie, jednak w obecności innych zanieczyszczeń organicznych (np. rozpuszczalników lub detergentów) jego rozpuszczalność znacznie wzrasta. Benzyna jako mieszanina wyżej wymienionych węglowodorów jest substancją lotną. Na stacjach benzynowych sprzedawana jest również benzyna etylizowana, która zawiera dodatkowo, w ilości do 0,08% objętości, czterocykloheksan.

Olej napędowy także jest mieszaniną ciekłych węglowodorów (głównie niepolarnych węglowodorów alifatycznych), ale cięższych i mniej lotnych frakcji — o długości łańcucha węglowego  $C_9$ – $C_{26}$ .

W procesie migracji węglowodorów z powierzchni terenu do warstwy wodonośnej można wyodrębnić cztery etapy:

- pionową migrację fazy wolnej produktu ropopochodnego (NAPL) przez strefę nienasyconą (strefę aeracji);
- poziomą migrację po powierzchni zwierciadła wody lub na stropie warstw nieprzepuszczalnych;
- tworzenie się mieszaniny wodno-naftowej w strefie kontaktu i dyspersję węglowodorów rozpuszczonych w wodzie gruntowej;
- zmianę koncentracji zanieczyszczenia w czasie w wyniku procesów fizyczno-chemicznych (zwłaszcza parowania oraz wiązania z fazą stałą gruntu) i biologicznych (biodegradacji).

Przepływ zanieczyszczeń ropopochodnych w ośrodku porowatym jest na ogół dwu- (NAPL/woda) lub trójfazowy (NAPL/woda/powietrze). W obu przypadkach prędkość migracji zależy od współczynników przepuszczalności względnej, warunkowanej stopniem wysycenia przestrzeni porowej każdą z faz (Malina, 1997a). Aby poznać procesy migracji, istotne jest również określenie parametrów migracji NAPL w przepływie zbliżonym do jednofazowego — w warunkach pełnego nasycenia porów gruntu tylko produktem ropopochodnym.

Według przyjętej nomenklatury (Słownik hydrogeologiczny, 2002), współczynnik filtracji jest utożsamiany ze współczynnikiem wodoprzepuszczalności — parametrem

\*Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; j.mikolajkow@uw.edu.pl

**Tab. 1. Wybrane parametry fizyczne benzyny i oleju napędowego w temp. 20°C (Surygała, 2000; Izdebska-Mucha, 2003)**  
 Table 1. Selected physical parameters of petrol and diesel oil in 20°C (Surygała, 2000, Izdebska-Mucha, 2003)

Parametr Parameter	Benzyna Petrol	Olej napędowy Diesel oil	Woda Water
$\rho$ — gęstość cieczy, <i>density</i> [Mg/m <sup>3</sup> ]	0,72–0,78	0,81–0,88	1
$\eta$ — lepkość dynamiczna, <i>dynamic viscosity</i> [mPa·s]	0,36–0,49	1,2–3,9	1
$\nu$ — lepkość kinematyczna, <i>kinematic viscosity</i> [mm <sup>2</sup> /s]	0,49–0,66*	1,4–4,7	1
napięcie powierzchniowe, <i>surface tension</i> [J/m <sup>2</sup> ]	$26 \times 10^{-3}$		$73 \times 10^{-3}$

\*lepkość kinematyczną obliczono według wzoru  $\nu = \eta/\rho$   
 the kinematic viscosity was calculated from the formula  $\nu = \eta/\rho$

wyrażającym przepuszczalność wody w ośrodku skalnym. Na potrzeby niniejszych badań przyjęto, że współczynnik filtracji jest parametrem wyrażającym przepuszczalność ośrodka skalnego względem różnych płynów — benzyny, oleju napędowego, i wody.

Zaprezentowane wyniki stanowią jeden z elementów badań określających parametry migracji zanieczyszczeń ropopochodnych w gruncie.

### Badane grunty

Badania prowadzono w gruntach sypkich o różnym uziarnieniu i różnych parametrach filtracyjnych. Analizowano:

- 1) piasek średnio- i gruboziarnisty, wodnolodowcowy (sandrowy);
- 2) piasek średnioziarnisty, wodnolodowcowy;
- 3) piasek średnioziarnisty, rzeczny;
- 4) piasek drobnoziarnisty, kwarcowy;
- 5) piasek drobny, pylasty.

Krzywe granulometryczne poszczególnych gruntów przedstawiono na rycinie 1.

### Badania współczynnika filtracji

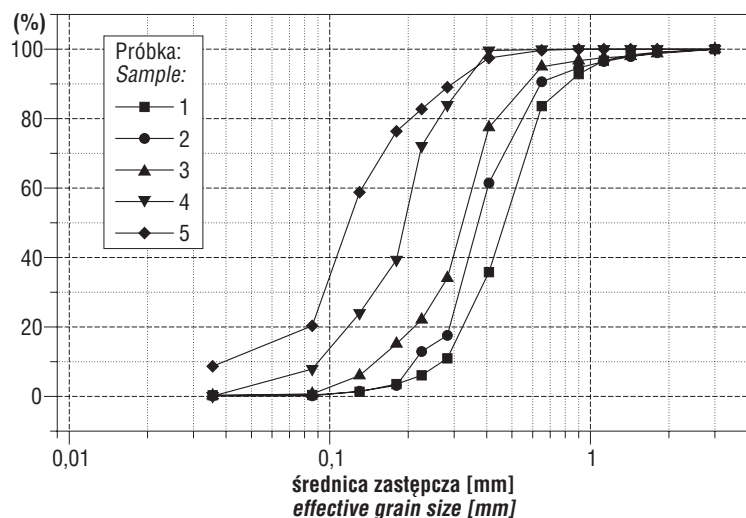
Badania współczynnika filtracji, zarówno wody, jak i dwóch rodzajów produktów ropopochodnych — benzyny Eurosuper 95 oraz letniego oleju napędowego — prowadzono metodą zmiennogradentową w stałej temperaturze 20°C. Badano grunt powietrznosuchy, od dołu nasączany wodą lub NAPL — zakładając, że wyznaczone współczynniki przepuszczalności wody i NAPL (ryc. 2, tab. 2) dotyczą przepływu jednofazowego.

W opisie migracji zanieczyszczeń ropopochodnych, poza bezwzględną wartością współczynnika filtracji, istotny jest również stosunek współczynnika filtracji poszczególnych rodzajów zanieczyszczeń ropopochodnych do

współczynnika wodoprzepuszczalności. Zwykle współczynnik filtracji produktów ropopochodnych ( $k_{NAPL}$ ) wyznacza się (Freeze & Cherry, 1979; Malina, 1997b) z wodoprzepuszczalności gruntu ( $k_w$ ) [LT<sup>-1</sup>] oraz gęstości ( $\rho$ ) [ML<sup>-3</sup>] i lepkości dynamicznej ( $\eta$ ) [ML<sup>-1</sup>T<sup>-1</sup>] lub kinematycznej ( $\nu$ ) [L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>] wody ( $w$ ) i produktu ropopochodnego ( $NAPL$ ):

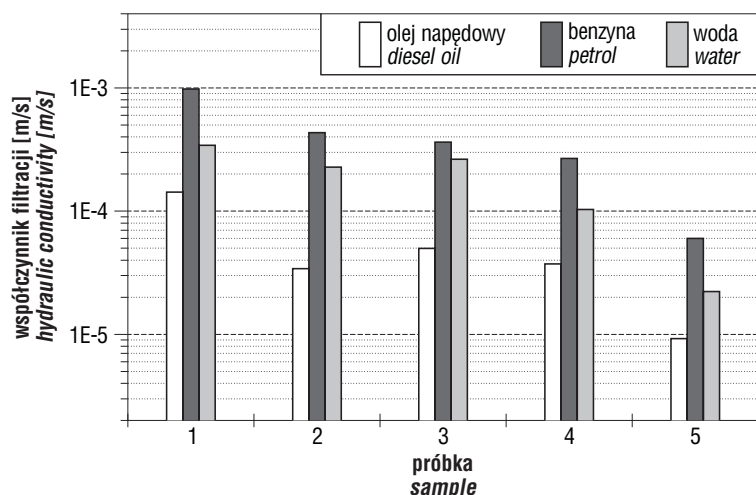
$$k_{NAPL} = k_w \frac{\eta_{NAPL} \rho_w}{\eta_w \rho_{NAPL}} = k_w \frac{\nu_{NAPL}}{\nu_w} [LT^{-1}]$$

Ze względu na różne jednostki spotykane w literaturze światowej w powyższym wzorze podano jedynie wymiary: L — długości, T — czasu i M — masy.



Ryc. 1. Krzywe granulometryczne badanych gruntów

Fig. 1. Grain-size distribution curves



Ryc. 2. Współczynniki filtracji wody, benzyny i oleju napędowego w poszczególnych próbkach gruntu (w temp. 20°C)

Fig. 2. Hydraulic conductivity of water, petrol and diesel oil in 20°C

**Tab. 2. Współczynniki filtracji wody, oleju napędowego i benzyny w różnych gruntach**  
 Table 2. Hydraulic conductivity of water, diesel oil and petrol in different soils

Próbka Sample no.	Rodzaj gruntu Ground type	Współczynnik filtracji Mean hydraulic conductivity of			$\frac{k_b}{k_w}$	$\frac{k_o}{k_w}$
		wody ( $k_w$ ) water ( $k_w$ ) [m/s]	oleju napędowego ( $k_o$ ) diesel oil ( $k_o$ ) [m/s]	benzyny Eurosuper 95 ( $k_b$ ) petrol (Eurosuper 95) ( $k_b$ ) [m/s]		
1	piasek średnio i gruboziarnisty medium and coarse sand	$6,35 \times 10^{-4}$	$1,22 \times 10^{-4}$	$9,98 \times 10^{-4}$	1,57	0,19
2	piasek średnioziarnisty medium and mixed-fraction sand	$2,31 \times 10^{-4}$	$3,45 \times 10^{-5}$	$4,40 \times 10^{-4}$	1,90	0,15
3	piasek średnioziarnisty medium sand	$1,88 \times 10^{-4}$	$5,04 \times 10^{-5}$	$3,68 \times 10^{-4}$	1,96	0,27
4	piasek drobnoziarnisty fine sand	$1,05 \times 10^{-4}$	$3,79 \times 10^{-5}$	$2,72 \times 10^{-4}$	2,59	0,36
5	piasek pylasty sand dusty	$2,16 \times 10^{-5}$	$9,34 \times 10^{-6}$	$6,10 \times 10^{-5}$	2,82	0,43

Według powyższej zależności stosunek współczynnika filtracji NAPL i wody w stałej temperaturze zależy od właściwości cieczy (gęstości i lepkości). Przeprowadzone badania wskazują jednak, że stosunek ten zmienia się również w zależności od uziarnienia gruntu, w którym zachodzi filtracja. Zależności pomiędzy współczynnikiem filtracji wody i NAPL przedstawiono w tabeli 2.

Współczynnik filtracji benzyny jest znacznie większy od współczynnika wodoprzepuszczalności, a współczynnik filtracji oleju napędowego znacznie mniejszy. Zmieniają się również zależności pomiędzy tymi współczynnikami w różnych gruntach. Wynika to prawdopodobnie zarówno z różnej lepkości tych cieczy, jak i innego napięcia powierzchniowego, gdyż od tych parametrów zależy porowatość aktywna czyli wielkość porów przez które może swobodnie przepływać ciecz.

Według uzyskanych wyników współczynnik filtracji benzyny jest dwu- lub trzykrotnie większy od współczynnika wodoprzepuszczalności. Większe różnice pomiędzy tymi współczynnikami stwierdzono w gruntach drobnoziarnistych. Współczynnik filtracji oleju napędowego jest z kolei w przybliżeniu 2–5 razy mniejszy od współczynnika wodoprzepuszczalności, największe różnice stwierdzono w piaskach gruboziarnistych.

### Podsumowanie

Jednym z elementów oceny potencjalnego oddziaływania na środowisko obiektów związanych z magazynowaniem i transportem paliw jest określenie podatności na zagrożenia wód podziemnych. Określenie prędkości migracji zanieczyszczeń w różnych typach gruntu, która zależy bezpośrednio od współczynnika filtracji zanieczyszczających cieczy, ma istotne znaczenie w ocenie zagrożenia wód podziemnych (Krogulec, 2004). W obiektach punktowych (zbiornikach, magazynach, stacjach paliw itp.) łatwo jest przeprowadzić badania i ocenić potencjalne zagrożenie, łącznie z określeniem specyficznej podatności w odniesieniu do poszczególnych produktów ropopochod-

nych. Znacznie trudniejsze i kosztowniejsze jest przeprowadzenie tego typu analizy w obiektach liniowych (rurociągach, drogach i liniach kolejowych), którymi odbywa się transport znacznych ilości paliw. Ocena stopnia zagrożenia wód podziemnych powinna być brana pod uwagę zarówno na etapie wyboru lokalizacji, jak i projektu technicznego tego typu obiektów (Mikołajków, 2005). W ocenie podatności wód podziemnych i stopnia zagrożenia, opartej na ogólnych (regionalnych) danych o budowie geologicznej i wynikach badań podłoża tego typu inwestycji, należy uwzględnić znacznie większą prędkość filtracji potencjalnych zanieczyszczeń, zwłaszcza benzyny. Na podstawie przeprowadzonych badań należy przyjmować w gruntach sypkich dwu- lub trzykrotnie większy współczynnik filtracji benzyny niż wody i wynikającą z tego dwa, trzy razy większą prędkość przepływu zanieczyszczeń w gruncie. Oznacza to również znacznie większe zagrożenie wód podziemnych i znacznie krótszy czas na reakcję w razie wypadku i rozszczelnienia się cysterny przewożącej paliwo.

### Literatura

- FREEZE R.A. & CHERRY J.A. 1979 — Groundwater. Englewood Cliffs, Prentice Hall, New Jersey.  
 IZDEBSKA-MUCHA D. 2003 — Wpływ benzyny i oleju napędowego na właściwości deformacyjne monomineralnych ilów wzorcowych oraz gruntów spoistych. Arch. Wyzd. Geol. UW.  
 KROGULEC E. 2004 — Ocena podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie w dolinie rzecznej na podstawie przesłanek hydrogeologicznych. Wyd. Geol. Warszawa.  
 MALINA G. 1997a — Migracja plamy zanieczyszczeń ropopochodnych w ośrodku porowym. [W:] Współczesne problemy hydrogeologii. T. VIII, WIND Wrocław: 291–295.  
 MALINA G. 1997b — Zagrożenie ujęć wód podziemnych zanieczyszczeniami ropopochodnymi. [W:] Współczesne problemy hydrogeologii. T. VIII, WIND Wrocław: 297–300.  
 MIKOŁAJKÓW J. 2005 — Planowanie inwestycji drogowych w aspekcie zagrożenia dla wód podziemnych na przykładzie fragmentu autostrady A2. Prz. Geol., 53: 586–590.  
 Słownik hydrogeologiczny, 2002, Państw. Inst. Geol., Min. Środ.  
 SURYGALA J. (red.) 2000 — Zanieczyszczenia naftowe w gruncie. OW Politechniki Wrocławskiej.