

Iwona DESKA*, Ewa OCIEPA

Politechnika Częstochowska, Instytut Inżynierii Środowiska
ul. Brzeźnicka 60a, 42-200 Częstochowa

* e-mail: ideska@is.pcz.czesf.pl

Wpływ parametrów gruntów na zależność między miąższością rzeczywistą i pozorną LNAPL na zwierciadle wody podziemnej

W celu prawidłowego zaprojektowania szczywania lekkich cieczy organicznych (LNAPL) z powierzchni zwierciadła wody podziemnej niezbędne jest ustalenie miąższości LNAPL. Niestety, miąższość mierzona w studni obserwacyjnej (tzw. miąższość pozorna) zawsze różni się od rzeczywistej miąższości na zwierciadle wody podziemnej. Różnica między nimi zależy od właściwości gruntu oraz właściwości i ilości LNAPL. Istnieje wiele metod ustalania rzeczywistej miąższości LNAPL na podstawie zmierzonej miąższości pozornej, ale wyniki uzyskiwane przy ich zastosowaniu są często rozbieżne i nieprecyzyjne.

W artykule przedstawiono wyniki eksperymentów, których celem było zbadanie wpływu wybranych właściwości gruntów niespoistych (współczynnika filtracji, średnicy miarodajnej d_{10} oraz współczynnika nierównomierności uziarnienia wg Hazena) na zależność między miąższością pozorną i rzeczywistą LNAPL na zwierciadle wody podziemnej. Otrzymane wyniki wskazują, że wraz ze wzrostem współczynnika filtracji, jak również średnicy miarodajnej d_{10} wzrasta wartość ilorazu miąższości rzeczywistej do pozornej. Wyniki potwierdzają, że w zakresie analizowanych wartości obydwie te parametry w znaczącym stopniu wpływają na zależność między miąższościami. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że w przypadku badanych gruntów, w zakresie analizowanych wartości, współczynnik nierównomierności uziarnienia nie wykazuje istotnego wpływu na zależność między miąższością rzeczywistą i pozorną.

Słowa kluczowe: LNAPL, miąższość rzeczywista, miąższość pozorna, współczynnik filtracji, średnica miarodajna, współczynnik nierównomierności uziarnienia wg Hazena

Wprowadzenie

Postępujący rozwój motoryzacji w dużej mierze przyczynia się do zanieczyszczenia gruntów i wód podziemnych substancjami ropopochodnymi. Lekkie cieczy organiczne niemieszające się z wodą (LNAPL) dostają się do środowiska wodno-gruntowego na skutek wycieków z uszkodzonych, nieszczelnych podziemnych zbiorników magazynujących paliwa, a także w wyniku awarii rurociągów transportujących paliwa, wypadków z udziałem cystern itp. [1, 2]. Pewna ilość substancji ropopochodnych dostaje się do wód podziemnych wraz z odciekami z nieuszczelnionych składowisk odpadów komunalnych [3]. W przypadku wycieku LNAPL do gruntu pierwszy etap jej migracji stanowi pionowa infiltracja poprzez strefę aeracji, która odbywa się głównie pod wpływem działania siły grawitacji. W trakcie infiltracji część zanieczyszczenia zostaje zaadsorbowana na ziarnach osrodka porowatego, część zostaje unieruchomiona pod wpływem sił kapilarnych w postaci pojedynczych

kropki pomiędzy ziarnami gruntu jako faza nieciągła (rezydualna) [4]. Jeżeli wyciek posiada dostatecznie dużą objętość, LNAPL w postaci fazy ciągłej może dotrzeć do dolnej granicy strefy aeracji, a z uwagi na gęstość niższą od gęstości wody będzie kumulować się tuż nad strefą wzniosu kapilarnego wody [1, 5]. W przypadku osiągnięcia przez warstwę LNAPL stosunkowo dużej miąższości może dojść do obniżenia wzniosu kapilarnego wody i do przemieszczenia się granicy rozdziału faz woda-LNAPL nawet poniżej poziomu statycznego zwierciadła wody [6]. Dalsze rozprzestrzenianie się LNAPL polega na poziomej migracji na powierzchni zwierciadła wody podziemnej, której kierunek jest zgodny z gradientem hydraulicznym w ośrodku wodno-gruntowym [5]. Migracja wolnego produktu, podczas której powietrze jest wypierane przez LNAPL z porów strefy aeracji, a woda z większych porów strefy saturacji, trwa do momentu osiągnięcia stanu równowagi hydraulicznej. Po osiągnięciu stanu równowagi możliwe jest jeszcze pionowe przemieszczanie się warstwy LNAPL, spowodowane wahaniami poziomu zwierciadła wody podziemnej [6]. Po ustaleniu się stanu równowagi zarówno wolny produkt, jak i faza rezydualna LNAPL stanowią źródło wtórnego zanieczyszczenia ośrodka wodno-gruntowego frakcjami rozpuszczalnymi [7, 8]. W celu usunięcia źródła zanieczyszczenia należy przeprowadzić remediację gruntu [5]. Jednak, zgodnie z warunkami równowagi fazowej, dopóki w ośrodku wodno-gruntowym występuje ciekła faza LNAPL, to powietrze porowe będzie maksymalnie nasycone frakcjami lotnymi substancji ropopochodnych, woda podziemna frakcjami rozpuszczalnymi, a grunt frakcjami ulegającymi sorpcji [9]. W związku z tym prowadzenie remediacji gruntu bez uprzedniego usunięcia warstwy LNAPL ze zwierciadła wody podziemnej nie może być działaniem w pełni efektywnym. Dlatego w przypadku zalegania warstwy LNAPL na zwierciadle wody podziemnej wstępny etap remediacji powinno stanowić jej szczypanie [10].

W celu prawidłowego zaprojektowania operacji szczypania niezbędne jest odpowiednie ustalenie objętości wolnej (mobilnej) LNAPL [11]. Objętość ta może zostać oszacowana na podstawie miąższości LNAPL zmierzonej w studniach obserwacyjnych zafiltrowanych na wysokości zalegania warstwy wolnego produktu, odwierconych w kilku punktach zanieczyszczonego obszaru, które następnie mogą zostać wykorzystane podczas prowadzenia szczypania [12]. Niestety, miąższość zmierzona w studni (tzw. miąższość pozorna) zawsze różni się od miąższości strefy gruntu, w której na zwierciadle wody podziemnej obecna jest LNAPL (tzw. miąższości rzeczywistej) [13]. Na sytuację taką wpływ mają dwa podstawowe czynniki [11]: (a) zwierciadło wody w otworze jest obniżane przez zalegającą na nim warstwę LNAPL; (b) LNAPL w ośrodku wodno-gruntowym może zachowywać się w sposób zróżnicowany - może zarówno utrzymywać się na powierzchni strefy wzniosu kapilarnego wody, jak również wnikać do wnętrza tej strefy.

Sposób zachowania LNAPL w ośrodku wodno-gruntowym, a tym samym wielkość różnicy między miąższością pozorną i rzeczywistą zależy od właściwości gruntu oraz właściwości i ilości LNAPL [14]. Dodatkowymi czynnikami wpływającymi na zależność między miąższością pozorną i rzeczywistą są wahania rzędnej zwierciadła wody podziemnej [15].

Model opisujący zachowanie się LNAPL w ośrodku gruntowo-wodnym, opracowany w latach 80. ubiegłego wieku (tzw. model „Pancake”), zakłada, że na zwierciadle wody podziemnej tworzy się ciągła warstwa wolnego produktu, wewnątrz której nasycenie LNAPL jest zbliżone do 100%. Model ten pomija wpływ zjawisk kapilarnych na stopień nasycenia gruntu płynami (wodą, LNAPL i powietrzem). Przyjęcie takich uproszczeń powoduje znaczne przeszacowanie objętości mobilnej LNAPL obecnej w ośrodku gruntowo-wodnym nawet w przypadku ewentualnego, dokładnego ustalenia miąższości rzeczywistej [16]. Z drugiej strony, prawidłowe ustalenie miąższości rzeczywistej na podstawie pozornej jest bardzo skomplikowane. Zastosowanie dostępnych metod (opartych na modelu „Pancake”), służących do tego celu, prowadzi do uzyskiwania wyników rozbieżnych i w wielu przypadkach bardzo nieprecyzyjnych [11, 13, 14, 17]. Podstawowa wada większości z tych metod polega na tym, że jako parametry obliczeniowe uwzględniają one jedynie właściwości gruntów lub jedynie właściwości LNAPL [17]. Dodatkowym problemem jest to, że niektóre z tych parametrów są bardzo trudne do ustalenia zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i polowych [14].

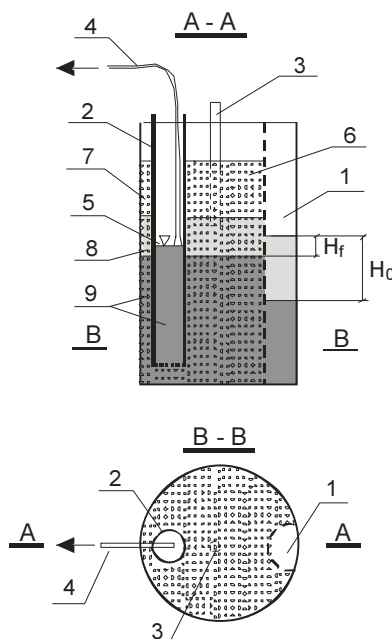
W latach 90. ubiegłego stulecia opracowano nowy model zachowania LNAPL na zwierciadle wody podziemnej, oparty na idealnych zależnościach między ciśnieniem kapilarnym a nasyceniem (tzw. model „wielofazowy” - ang. *multiphase model*) [13, 16, 18]. Model ten służy do ustalania tzw. objętości jednostkowej LNAPL (ang. *LNAPL specific volume*), czyli wysokości słupa LNAPL, jaka pozostałaby po ewentualnym usunięciu gruntu, wody i powietrza z profilu gruntowego. Objętość jednostkowa jest więc zawsze mniejsza od miąższości rzeczywistej LNAPL [13]. Według modelu „wielofazowego”, LNAPL, woda i powietrze równocześnie wypełniają pory w strefie występowania LNAPL. Z uwagi na obecność wody nasycenie LNAPL nie osiąga 100% i waha się w bardzo szerokich granicach od 5 do ok. 70%. Model „wielofazowy” zakłada, że wysokościowy rozkład nasycenia LNAPL pomiędzy poziomami powierzchni rozdziału powietrze-LNAPL i LNAPL-woda w studni obserwacyjnej jest funkcją ciśnienia kapilarnego na granicy faz woda-LNAPL. Z kolei nasycenie LNAPL powyżej granicy rozdziału powietrze-LNAPL w studni obserwacyjnej jest funkcją ciśnienia kapilarnego na granicy faz powietrze-LNAPL [16]. Nasycenie LNAPL w ośrodku jednorodnym generalnie zmniejsza się wraz z głębokością, aż do poziomu odpowiadającego granicy rozdziału faz LNAPL-woda w otworze obserwacyjnym, poniżej której w zasadzie powinno osiągnąć wartość zerową [16]. Zdarza się jednak, że LNAPL może osiągnąć pewne nasycenie nawet poniżej granicy rozdziału LNAPL-woda w studni na skutek wahań poziomu zwierciadła wody podziemnej, które w znacznym stopniu komplikują ustalenie miąższości rzeczywistej oraz objętości jednostkowej LNAPL [15].

Celem eksperymentów scharakteryzowanych w niniejszym artykule było ustalenie wpływu parametrów gruntów niespoistych (współczynnika filtracji względem wody o temperaturze 10°C, średnicy miarodajnej d_{10} i współczynnika nierównomierności uziarnienia wg Hazena) na obserwowane zależności między miąższością pozorną i rzeczywistą LNAPL na zwierciadle wody podziemnej.

1. Materiał i metodyka badań

Badania zależności między miąższością pozorną i rzeczywistą były prowadzone z użyciem 14 gruntów, scharakteryzowanych w tabeli 1. Jako LNAPL zastosowano olej rzepakowy, którego właściwości przedstawiono w tabeli 2.

Badania były prowadzone w kolumnach z plexiglasu o średnicy 10 cm, ze studniami obserwacyjnymi o przekroju półkolistym, wbudowanymi przy ściankach kolumn (rys. 1).



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 - studnia, 2 - kolumna wyrównawcza, 3 - rurka perforowana do iniekcji LNAPL, 4 - przewód do odpompowywania wody, 5 - zwierciadło wody, 6 - grunt, 7 - powietrze porowe, 8 - LNAPL, 9 - woda; H_0 - miąższość pozorna LNAPL, H_f - miąższość rzeczywista LNAPL bez uwzględniania wzniosu kapilarnego LNAPL

W każdej kolumnie badawczej wbudowano kolumnę wyrównawczą (z pełnymi ściankami i perforowanym dnem), której celem było utrzymywanie stałej wysokości hydraulicznej zwierciadła wody w układzie w czasie trwania eksperymentu. W kolumnie wyrównawczej, na wysokości odpowiadającej planowanej rzędnej swobodnego zwierciadła wody, została umiejscowiona końcówka przewodu, poprzez który odprowadzano nadmiar wody z układu badawczego. Każda kolumna badawcza została napełniona odpowiednim gruntem modelowym (grunty 1-14). W każdym gruncie umieszczono rurkę do iniekcji LNAPL, perforowaną w dolnej części (rys. 1). Rurkę umieszczono tak, by jej dolna krawędź znalazła się kilka centymetrów nad planowaną strefą wzniosu kapilarnego wody. Następnie każda kolumna badawcza została napełniona wodą poprzez kolumnę wyrównawczą w taki

sposób, by zwierciadło wody znalazło się dokładnie na poziomie wylotu przewodu do odprowadzania nadmiaru wody z układu. Po 3-4 dniach, po odpompowaniu nadmiaru wody i ustabilizowaniu się poziomów zwierciadła wody w gruncie i studni, pierwsza porcja LNAPL zabarwionej przy zastosowaniu barwnika Sudan III (około 100 cm³) została zatłoczona do każdej kolumny poprzez perforowaną rurkę. Po następnych 3-4 dniach zmierzono miąższość rzeczywistą LNAPL w gruncie oraz miąższość pozorną w studni. Jako rzeczywistą miąższość przyjęto odległość między uśrednionym położeniem powierzchni rozdziału faz LNAPL-woda w gruncie i powierzchnią rozdziału powietrze-LNAPL w studni (bez wzniosu kapilarnego LNAPL w gruncie). Procedury zatłaczania LNAPL i mierzenia miąższości pozornej i rzeczywistych były powtarzane kilka razy, do momentu uzyskania odpowiedniej ilości danych niezbędnych do wykreślenia krzywej zależności między miąższością pozorną i rzeczywistą lub do osiągnięcia maksymalnej dla danego układu badawczego miąższości pozornej. Poziom zwierciadła wody w każdej kolumnie wyrównawczej był utrzymywany na stałym poziomie w trakcie trwania eksperymentu. Badania były prowadzone w temperaturze 20 ±2°C. W celu zabezpieczenia przed parowaniem płynów górne części kolumn były zabezpieczone pokrywami z niewielkim otworem, który pozwalał na wyrównywanie ciśnień pomiędzy układami badawczymi a otoczeniem.

Tabela 1

Właściwości gruntów zastosowanych w badaniach

Grunt	Średnica miarodajna d ₁₀ mm	Średnica d ₆₀ mm	Współczynnik nierównomierności uziarnienia wg Hazena U	Współczynnik filtracji względem wody o temperaturze 10°C k ₁₀ m/d
1	0,19	0,33	1,73	7,87
2	0,2	0,36	1,8	11,28
3	0,22	0,46	2,09	11,7
4	0,16	0,26	1,625	12,66
5	0,15	0,25	1,67	13,88
6	0,21	0,5	2,38	14,66
7	0,21	0,38	1,81	17,06
8	0,3	0,59	1,97	35,09
9	0,33	0,67	2,03	42,02
10	0,39	0,7	1,79	78,37
11	0,44	0,72	1,64	112,31
12	0,51	0,83	1,63	119,76
13	0,5	0,9	1,8	139,104
14	0,53	1,02	1,92	204,36

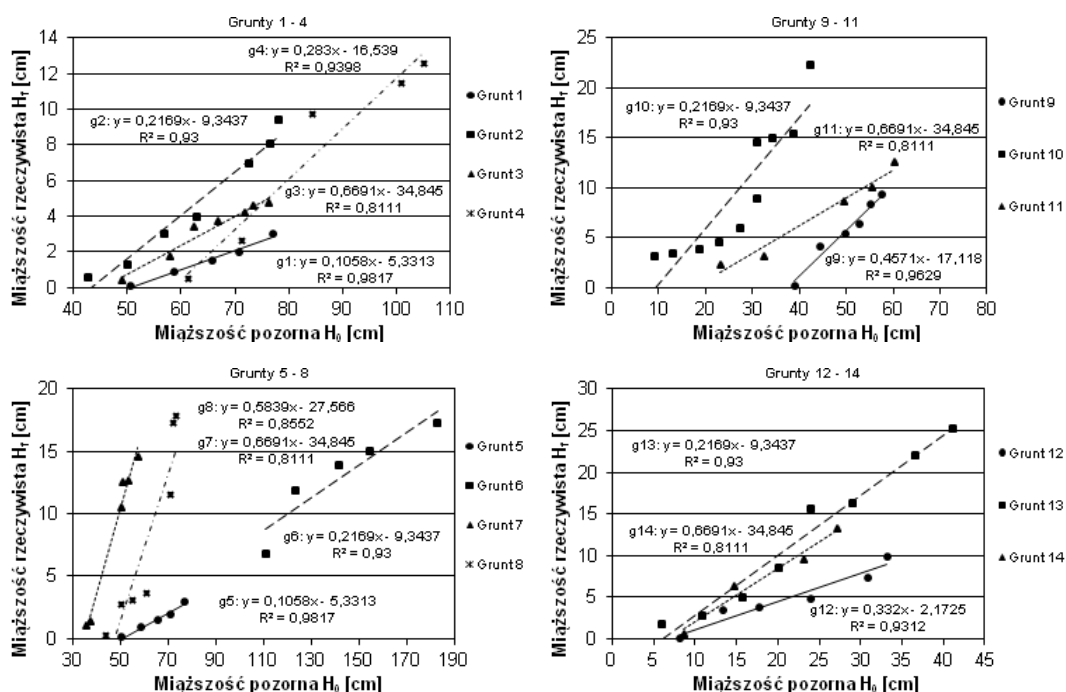
Tabela 2

Właściwości LNAPL zastosowanej w badaniach (w temperaturze 20°C)

Rodzaj LNAPL	Gęstość ρ_o kg/m ³	Ciężar właściwy γ_o N/m ³	Współczynnik lepkości dynamicznej η_o kg/m·s
Olej rzepakowy	918	9005,58	0,07

2. Wyniki badań i ich omówienie

Na podstawie wyników badań laboratoryjnych dla każdego gruntu wykonano wykresy punktowe przedstawiające zależność między miąższościami pozorną i rzeczywistą (rys. 2).



Rys. 2. Zależność między miąższościami pozorną i rzeczywistą dla gruntów 1-14

Do każdej serii wyników dodano liniową linię trendu wraz z opisującym ją równaniem. O wyborze typu zależności między zmiennymi zdecydowały informacje zawarte w literaturze [14] oraz wyniki badań prowadzonych wcześniej z zastosowaniem sztucznie wyselekcjonowanych gruntów równoziarnistych [17], wskazujące na istnienie liniowej zależności między miąższością pozorną i rzeczywistą. W każdym przypadku, w zakresie analizowanych wartości, uzyskano stosunkowo wysokie wartości współczynników determinacji ($R^2 = 0,8111 \div 0,9804$). Na podstawie otrzymanych

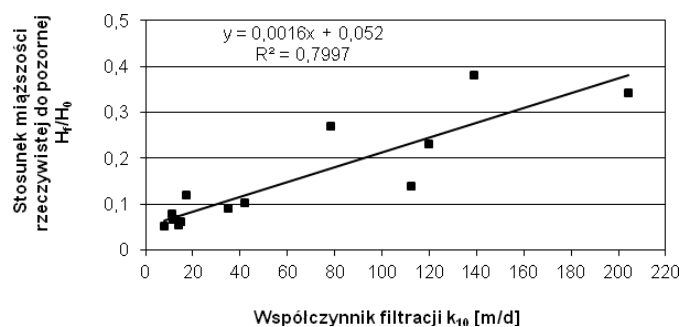
równań regresji liniowej obliczono wartości miąższości pozornych H_0 , jakie w przypadku każdego gruntu zastosowanego w badaniach, w zakresie otrzymanych wartości, odpowiadałyby miąższościom rzeczywistym H_f równym 5 cm. Na podstawie uzyskanych wyników obliczono wartości stosunków miąższości rzeczywistej do pozornej H_0/H_f (tab. 3), które następnie zestawiono na wykresach z odpowiednimi właściwościami gruntów (współczynnikiem filtracji, średnicą miarodajną d_{10} i współczynnikiem nierównomierności uziarnienia) w celu zbadania wpływu ww. parametrów na zależność między miąższościami.

Tabela 3

Zależności między miąższością rzeczywistą i pozorną w przypadku, gdy miąższość rzeczywista wynosi 5 cm (grunty 1-14)

Grunt	Miąższość pozorna H_0 cm	Stosunek miąższości rzeczywistej do pozornej H_0/H_f	Grunt	Miąższość pozorna H_0 cm	Stosunek miąższości rzeczywistej do pozornej H_0/H_f
1	97,6	0,0512	8	55,8	0,0896
2	63,8	0,0784	9	48,4	0,1033
3	75,9	0,0659	10	18,6	0,2688
4	76,1	0,0657	11	35,8	0,1397
5	92,2	0,0542	12	21,6	0,2315
6	81,8	0,0611	13	13,1	0,3817
7	41,8	0,1196	14	14,6	0,3425

Na rysunku 3 przedstawiono wpływ współczynnika filtracji gruntu względem wody o temperaturze 10°C (k_{10}) na wartość ilorazu miąższości rzeczywistej do pozornej LNAPL dla przyjętej miąższości rzeczywistej wynoszącej 5 cm.

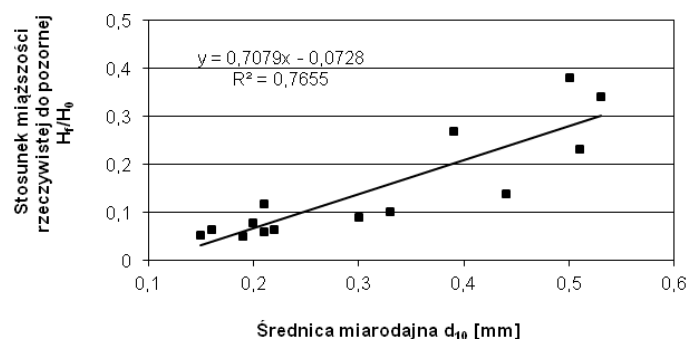


Rys. 3. Wpływ współczynnika filtracji gruntu względem wody o temperaturze 10°C na wartość ilorazu miąższości rzeczywistej do pozornej dla gruntów 1-14

Wyniki wskazują, że w zakresie analizowanych wartości wraz ze wzrostem współczynnika filtracji rośnie wartość stosunku miąższości rzeczywistej do pozornej na skutek malejącej różnicy między miąższościami. Na podstawie danych doświad-

czalnych poprowadzono liniową linię trendu, którą opisano równaniem regresji liniowej. Otrzymana wartość współczynnika determinacji wynosi $R^2 = 0,7997$. Uzyskane wyniki wskazują, że współczynnik filtracji k_{10} jest parametrem gruntu, który może w znacznym stopniu wpływać na zależność między miąższością rzeczywistą i pozorną (w przypadku gruntów zastosowanych w badaniach, zanieczyszczonych jednym rodzajem LNAPL, w zakresie otrzymanych wartości zmiany współczynnika filtracji w ok. 80% objaśniały zmiany ilorazu miąższości rzeczywistej do pozornej). Parametr ten może spełniać istotną rolę w modelu zależności między miąższością rzeczywistą i pozorną, ale można rozważyć uwzględnienie obok niego innych parametrów gruntów. Należy podkreślić, że w modelu należy uwzględnić także parametry LNAPL, których znaczenia nie analizowano podczas niniejszych badań.

Na rysunku 4 przedstawiono wpływ średnicy miarodajnej d_{10} na wartość ilorazu miąższości rzeczywistej do pozornej dla miąższości rzeczywistej równej 5 cm. Otrzymane wyniki wskazują, że wraz ze wzrostem średnicy miarodajnej d_{10} rośnie wartość ww. ilorazu. Na podstawie uzyskanych wyników poprowadzono liniową linię trendu, którą opisano równaniem regresji liniowej. Wartość współczynnika determinacji wynosi w tym przypadku $R^2 = 0,7655$. Otrzymane wyniki wskazują, że wartość średnicy miarodajnej d_{10} jest parametrem gruntu, który może w znacznym stopniu wpływać na zależność między miąższością rzeczywistą i pozorną (jego zmiany w ok. 76% objaśniały zmiany ilorazu miąższości rzeczywistej do pozornej w zakresie analizowanych wartości). Podobnie jak współczynnik filtracji, średnica miarodajna może więc zostać uwzględniona w modelu zależności między miąższością rzeczywistą i pozorną, przy czym należy wziąć pod uwagę uwzględnienie obok niej dodatkowych parametrów gruntów.

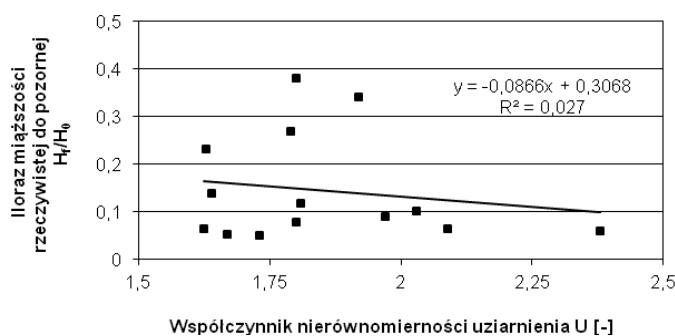


Rys. 4. Wpływ średnicy miarodajnej d_{10} na wartość ilorazu miąższości rzeczywistej do pozornej dla gruntów 1-14

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że wpływ średnicy miarodajnej d_{10} na zależność między miąższością rzeczywistą i pozorną jest bardzo zbliżony do wpływu współczynnika filtracji. Wynika to z faktu, że wyżej wymienione parametry są ze sobą silnie skorelowane (istnieją wzory empiryczne, pozwalające na ustalenie wartości współczynnika filtracji na podstawie średnicy miarodajnej). W związku z tym nie ma potrzeby równoczesnego uwzględniania obydwu

analizowanych parametrów w modelu zależności między miąższością rzeczywistą i pozorną.

Na rysunku 5 przedstawiono wpływ współczynnika nierównomierności uziarnienia gruntu ustalanego wg wzoru Hazena ($U = d_{60}/d_{10}$) [19] na wartość ilorazu miąższości rzeczywistej do pozornej. Na podstawie uzyskanych wyników poprowadzono liniową linię trendu, którą opisano równaniem. W tym przypadku otrzymana wartość współczynnika determinacji była bardzo niska ($R^2 = 0,027$) i wskazywała na istnienie nikłej korelacji między zmienną zależną i niezależną w zakresie analizowanych wartości. Odnotowano jednak nieznaczny trend do spadku wartości stosunku miąższości rzeczywistej do pozornej wraz ze wzrostem współczynnika nierównomierności uziarnienia.



Rys. 5. Wpływ współczynnika nierównomierności uziarnienia U na wartość ilorazu miąższości rzeczywistej do pozornej dla gruntów 1-14

Na podstawie otrzymanych wyników nie można jednak jednoznacznie stwierdzić, że współczynnik nierównomierności uziarnienia nie wpływa na zależność między miąższością rzeczywistą i pozorną, ponieważ wartości współczynników U gruntów zastosowanych w badaniach mieściły się w stosunkowo wąskim zakresie ($1,625 \div 2,38$). W związku z tym wszystkie grunty wykorzystane w badaniach zostały zakwalifikowane do gruntów równomiernie uziarnionych. W celu dokładniejszego zbadania wpływu ww. współczynnika na zależność między miąższością rzeczywistą i pozorną w dalszych eksperymentach należy zastosować grunty o bardziej zróżnicowanej nierównomierności uziarnienia.

Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników badań sformułowano następujące wnioski:

1. Wraz ze wzrostem współczynnika filtracji gruntu obserwuje się wzrost wartości ilorazu miąższości rzeczywistej do pozornej LNAPL. W zakresie analizowanych wartości zależność między tymi zmiennymi wykazuje w przybliżeniu charakter liniowy, co potwierdza względnie wysoka wartość współczynnika determinacji ($R^2 = 0,7997$). Wyniki wskazują, że współczynnik filtracji, jako jeden z kluczo-

- wych parametrów gruntu, może odgrywać znaczącą rolę w modelu zależności między miąższością pozorną i rzeczywistą LNAPL na zwierciadle wody podziemnej (w około 80% jego zmiany wyjaśniały zmiany wartości stosunku miąższości rzeczywistej do pozornej).
2. Wraz ze wzrostem wartości średnicy miarodajnej gruntu d_{10} zaobserwowano wzrost wartości ilorazu miąższości rzeczywistej do pozornej. Zależność między ww. zmiennymi w zakresie analizowanych wartości wykazuje w przybliżeniu charakter liniowy. Względnie wysoka wartość współczynnika determinacji ($R^2 = 0,7655$) wskazuje na dość silny wpływ średnicy miarodajnej na zależność między miąższością rzeczywistą i pozorną. Średnica miarodajna d_{10} może więc odgrywać znaczącą rolę w modelu zależności między miąższościami LNAPL.
 3. Współczynnik filtracji oraz średnica miarodajna d_{10} wpływają na zależność między miąższością rzeczywistą i pozorną LNAPL w sposób bardzo zbliżony. W związku z tym w modelu zależności między miąższościami powinno się uwzględnić tylko jeden z tych parametrów. W przypadku gruntów zastosowanych w badaniach, w zakresie analizowanych wartości, nieznacznie większy wpływ na zależność między miąższościami wykazywał współczynnik filtracji gruntu. Ostatecznej oceny analizowanych parametrów nie da się jednak dokonać bez przeprowadzenia większej ilości badań z zastosowaniem gruntów o bardziej zróżnicowanym uziarnieniu.
 4. W przypadku gruntów zastosowanych w badaniach, w zakresie analizowanych wartości, współczynnik nierównomierności uziarnienia w zasadzie nie wpływał na zależność między miąższością rzeczywistą i pozorną. Jednak wniosku tego nie można uogólniać, gdyż grunty były zbliżone do siebie pod względem wartości ww. współczynnika i wszystkie zostały zaliczone do gruntów równomiernie uziarnionych. W celu dokładniejszego zbadania znaczenia współczynnika nierównomierności uziarnienia konieczne jest przeprowadzenie badań z zastosowaniem gruntów o zróżnicowanym stopniu nierównomierności uziarnienia.
 5. W ramach badań prowadzonych w przyszłości celowe jest rozważenie wpływu kombinacji kilku parametrów gruntów na zależność między miąższością rzeczywistą i pozorną LNAPL na zwierciadle wody podziemnej.

Podziękowania

Badania były prowadzone w ramach BS-PB/401/306/11.

Literatura

- [1] Malina G., Wielofazowa migracja zanieczyszczeń ropopochodnych w strefie aeracji i saturacji, Inż. i Ochr. Środ. 1998, 1, 1, 85-105.
- [2] Wang Y., Shao M., Infiltration characteristics of non-aqueous phase liquids in undisturbed loessal soil cores, J. Environ. Sci. 2009, 21, 1424-1431.
- [3] Rosik-Dulewska C., Karwaczyńska U., Ciesielczuk T., Migracja WWA z nieuszczelnionego składowiska odpadów do wód podziemnych, Rocznik Ochrona Środowiska 2007, 9, 335-343.

- [4] Lenhard R.J., Oostrom M., Dane J.H., A constitutive model for air-NAPL-water flow in the vadose zone accounting for immobile, non-occluded (residual) NAPL in strongly water-wet porous media, *J. Contam. Hydrol.* 2004, 71, 261-282.
- [5] Zadroga B., Olańczuk-Neyman K., Ochrona i rekultywacja podłoża gruntowego: aspekty geotechniczno-budowlane, Rozdział 2: Migracja zanieczyszczeń w nawodnionym podłożu gruntowym, Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2001, 43-48.
- [6] Minnesota, Light Non-Aqueous Phase Liquid Management Strategy, Guidance Document 2-02, Minnesota Pollution Control Agency, July 2010, 2-3.
- [7] Yoon H., Werth C.J., Barkan C.P.L., Schaeffer D.J., Anand P., An environmental screening model to assess the consequences to soil and groundwater from railroad-tank-car spills of light non-aqueous phase liquids, *J. Hazard. Mater.* 2009, 165, 332-344.
- [8] Newell C.J., Acree S.D., Ross R.R., Huling S.G., Light Nonaqueous Phase Liquids, *Ground Water Issue*, EPA/540/S-95/500, 1995, 6.
- [9] Malina G., Biowentylacja (SBV) strefy aeracji zanieczyszczonej substancjami ropopochodnymi, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1996, 38.
- [10] Hernández-Espriú A., Martínez-Santos P., Sánchez-León E., Marín L.E., Free-product plume distribution and recovery modeling prediction in a diesel-contaminated volcanic aquifer, *Phys. Chem. Earth* 2012, 37-39, 43-51.
- [11] Dippenaar M.A., Sole M.D., Van Rooy J.L., du Toit G.J., Reynecke J.L., Determining actual LNAPL plume thickness: review and case study in a fractured aquifer, *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2005, 64, 347-360.
- [12] Charbeneau R.J., LNAPL Distribution and Recovery Model. Distribution and Recovery of Petroleum Hydrocarbon Liquids in Porous Media, Vol. 1, API Publication 4760, API Publications, Washington 2007, 17.
- [13] Lenhard R.J., Parker J.C., Estimation of free hydrocarbon volume from fluid levels in monitoring wells, *Ground Water* 1990, 28(1), 57-67.
- [14] USEPA, How to effectively recover free product at leaking underground storage tank sites: A guide for state regulators. Chapter IV: Methods for evaluating recoverability of free product, EPA 510-R-96-001, 1996, 23-27.
- [15] Aral M.M., Liao B., Effect of groundwater table fluctuations on LNAPL thickness in monitoring wells, *Environ. Geol.* 2002, 42, 151-161.
- [16] Golder Associates Ltd., Report on guidance on assessment of light non-aqueous phase liquid mobility for site classification purposes in British Columbia, Report Submitted to BC Ministry of Environment, October 9, 2008 (no. 08-1436-0016), 6-8.
- [17] Deska I., Malina G., Laboratoryjna weryfikacja metod ustalania rzeczywistej miąższości lekkich cieczy organicznych (LNAPL) na zwierciadle wody podziemnej, [w:] *Rekultywacja i rewitalizacja terenów zdegradowanych*, praca zbiorowa pod red. G. Maliny, Zakład Poligraficzny Moś-Luczak sp. j., PZiTS o. Poznań 2008, 147-160.
- [18] Farr A.M., Houghtalen R.J., McWhorter D.B., Volume estimation of light nonaqueous phase liquids in porous media, *Ground Water* 1990, 28(1), 48-56.
- [19] Pazdro Z., Kozerski B., *Hydrogeologia ogólna*, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1990, 94-95.

Impact of Soil Parameters on the Relationship between Actual and Apparent LNAPL Thickness on the Groundwater Table

In order to produce a proper design of the recovery of light non-aqueous phase liquid (LNAPL) from the groundwater table, the data on actual LNAPL thickness should be provided. Unfortunately, the LNAPL thickness measured in the observation well (the apparent thick-

ness) is always different from the actual thickness on the groundwater table. The difference between apparent and actual thicknesses depends on the properties of soil and the amount and properties of LNAPL. There are several models for calculating the actual LNAPL thickness, but the results obtained with use of different methods are inconsistent and in a lot of cases imprecise. The aim of experiments described in the current paper was to investigate the influence of the selected cohesionless soil parameters (hydraulic conductivity, effective grain size d_{10} and Hazen's uniformity coefficient) on the relationship between actual and apparent LNAPL thicknesses on the groundwater table.

The obtained results show that when both the hydraulic conductivity and the effective grain size d_{10} increase, the ratio of the actual thickness to the apparent thickness increases too. Both the hydraulic conductivity and the effective grain size d_{10} influence quite highly the relationship between the apparent and actual thicknesses within the scope of analysed values. The results confirmed that the above parameters can play an important role in the model of relationship between apparent and actual thicknesses. The results indicate that the Hazen's uniformity coefficient barely influences the relationship between actual and apparent LNAPL thicknesses within the scope of analysed values.

Keywords: LNAPL, actual thickness, apparent thickness, hydraulic conductivity, effective grain size, Hazen's uniformity coefficient