

Badania modelowe zanieczyszczenia substancjami ropopochodnymi na terenach lotnisk w Brzegu i w Szprotawie

Jacek Gurwin*, Paweł Janczarski**

Na obszarze Polski istnieje wiele lotnisk opuszczonych przez rosyjskich żołnierzy. Badania terenów lotnisk w Szprotawie i w Brzegu wykazały, że uległy one w znacznym stopniu skażeniu produktami ropopochodnymi. Przez lata słabo zabezpieczone zbiorniki paliwa i rejonny płyt tankowania były źródłem narastającego zanieczyszczenia gruntów i wód podziemnych oraz zagrożeniem dla wód powierzchniowych.

Celem przeprowadzonych prac badawczych było rozpoznanie zanieczyszczeń wód podziemnych i gruntów substancjami ropopochodnymi, a następnie stworzenie interaktywnych baz danych oraz ich modelowa interpretacja. Opisane w artykule wyniki są pierwszą próbą numerycznej analizy danych i wykonania modelu matematycznego podjętą na tych obszarach. Zebrano bogaty materiał archiwalny z lat 1991–1995, z którego zostały wybrane elementy rozpoznania przydatne przy wykonywanych obliczeniach i symulacjach. Dane te uzupełniono własnymi pomiarami terenowymi z roku 1996/1997. Starano się odtworzyć stan zanieczyszczenia lotnisk dla tego okresu, oszacować ilość paliwa zawartego w gruntach i w wodzie podziemnej oraz zasymulować sposób jego szczyrpywania. Autorzy zwracają również uwagę na możliwość wykorzystania istniejących sieci piezometrów do monitoringu zagrożonych obszarów. Sukcesywne uzupełnianie bazy danych pozwoli bowiem na weryfikację modelu oraz jej wykorzystanie do dalszego planowania prac oczyszczająco-rekultywacyjnych i optymalizacji metod usuwania zanieczyszczeń.

Tereny lotnisk pod Szprotawą i Brzegiem były miejscem prowadzenia prac przez różne zespoły badawcze. Przystąpiono do pełnej inwentaryzacji obiektów lotnisk oraz całej towarzyszącej infrastruktury. Systematycznie rozpoznawano rozmiar szkód ekologicznych i opracowywano koncepcje ich usuwania, dokonywano także ich wyceny. Uzyskane wyniki są etapem prowadzonych zadań rekultywacyjnych wykonywanych w ostatnich 2 latach przez P.P.W. Czyste Powietrze Sp. z o.o.

Warunki naturalne na obszarach badanych obiektów

Lotniska wojskowe w Brzegu i w Szprotawie są poniemieckimi obiektami przejętymi po II wojnie światowej przez wojska radzieckie. Istotne znaczenie ma ich lokalizacja (ryc. 1). Lotnisko w Brzegu jest położone na Równinie Grodkowskiej w odległości 2 km na SW od miasta Brzeg, na SW od wsi Skarbimierz, SE od wsi Małujowice oraz na N od wsi Pępice. Odległości od zabudowań wiejskich są niewielkie i wynoszą w każdym wymienionym przypadku ok. 0,5 km. We wsiach Małujowice i Skarbimierz znajdują się ujęcia wody, a w bezpośredniej bliskości obiektów lotniska przepływa Pępicki Potok (ryc. 1, 2).

Obszar lotniska pod Szprotawą wchodzi w skład Kotliny Zagańskiej i jest zarazem częścią Równiny Szprotawskiej, ukształtowanej jako morena denną stadiału Warty zlodowacenia środkowopolskiego. Ma powierzchnię ok. 670 ha i jest położone na wschód od miasta. Na północ od lotniska przebiega droga relacji Szprotawa–Wiechlice, a na południu obszar jest ograniczony przez drogę Szprotawa–Leszno Dole, gdzie w bezpośrednim sąsiedztwie lotniska leży wieś Dzieńmierowice (ryc. 1).

Lotnisko w Brzegu pod względem hydrograficznym należy do dwóch zlewni. Z części północno-wschodniej wody są odprowadzane do Kościelnego Potoku, a z południa i południowego zachodu do Pępickiego Potoku. Wspomniany Pępicki Potok, przepływający wzdłuż południowej granicy terenu lotniska, jest w zasadzie kanałem przerzutowym wód z Nysy Kłodzkiej do rzeki Oławy i jednym ze źródeł zaopatrzenia w wodę dla miasta Wrocławia. Z tego względu rejon ten powinien podlegać szczególnej kontroli i ochronie przed przedostawaniem się ewentualnych zanieczyszczeń. Dodatkowo cały teren lotniska jest pokryty siecią kanałów i drenów (ryc. 2), co w niekorzystnych warunkach może ułatwiać migrację zanieczyszczeń i stanowić ognisko wtórne skażenia wód i gleb produktami ropopochodnymi.

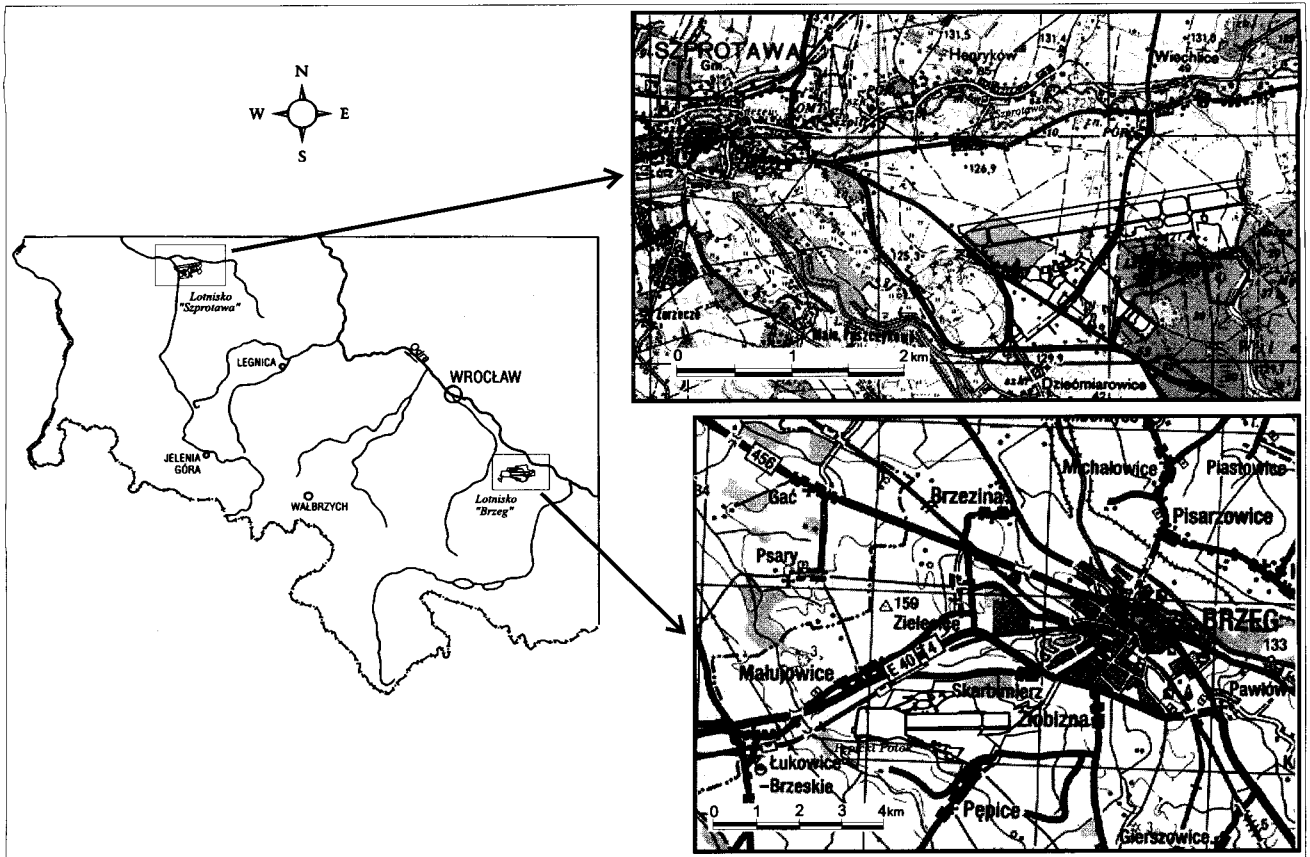
Sieć hydrograficzna rejonu lotniska w Szprotawie jest urozmaicona ze względu na swoje położenie w widłach rzek Bóbr i Szprotawa. Po stronie wschodniej przepływa Kamienny Potok, będący lewobrzeżnym dopływem Szprotawy (ryc. 1). Sieć hydrograficzną uzupełniają drobne ciekły powierzchniowe (przeważnie rowy melioracyjne) odprowadzające swoje wody do rzeki Szprotawy.

Zarys budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych

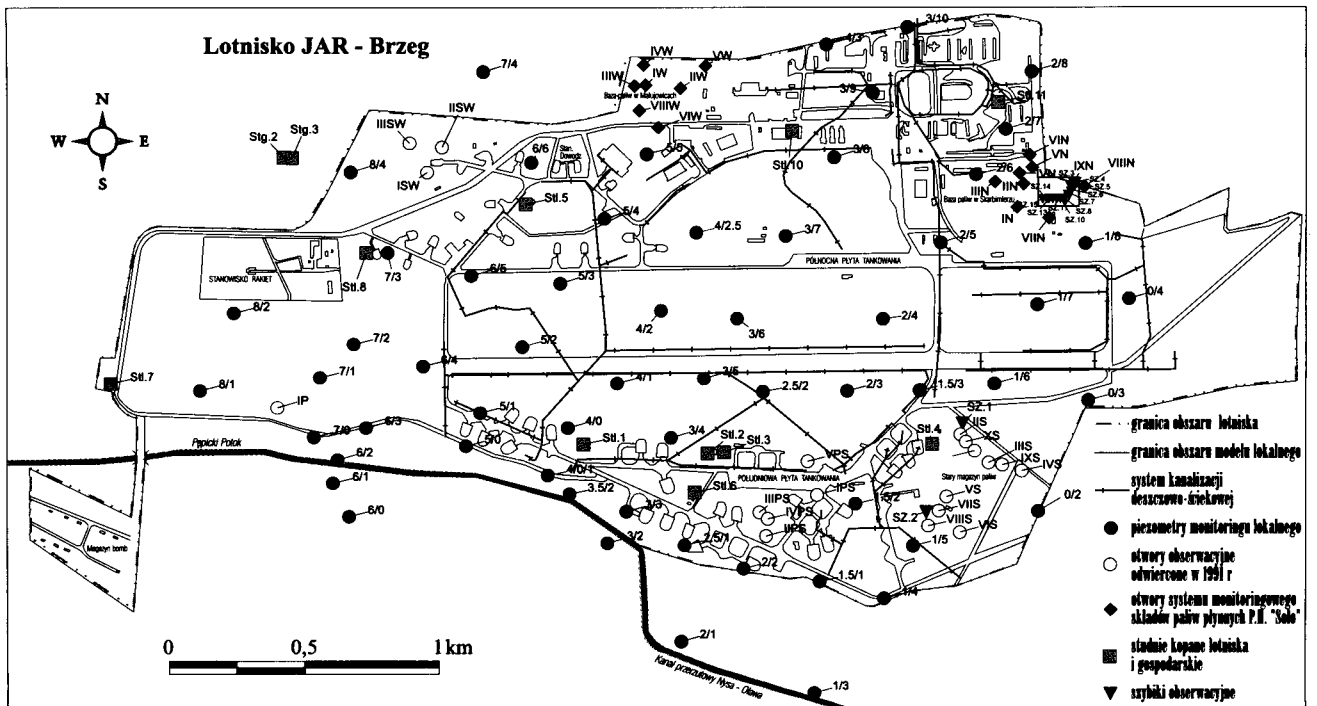
Lotnisko w Brzegu jest położone w obszarze monokliny przedsudeckiej. Niezgodnie zalegające utwory trzeciorzędu występują ciągłą warstwą o zróżnicowanych miąższościach (od kilkudziesięciu do ponad 120 m). Jest to jednolity kompleks ilasty z lokalnie występującymi przewarstwieniami piasków o miąższości do kilku metrów. Osady trzeciorzędowe na omawianym obszarze zaliczono do miocenu środkowego i górnego. Stropową partię trzeciorzędu w rejonie lotniska stanowią praktycznie nieprzepuszczalne ility, których powierzchnia stropowa została ukształtowana w czwartorzędzie i leży na zróżnicowanych głębokościach od 2 do 14 m p.p.t. Utwory czwartorzędowe w okolicach lotniska są reprezentowane przez trzy serie osadów lodowcowych, zaburzonych w interstadiałach. Są to serie związane ze zlodowaczeniami południowo- i środkowopolskim, głównie fluwioglacjalne o niewielkiej miąższości. Warstwa glin zwałowych występuje w części NE, piaski i żwiry holocenijskie natomiast w dolinie Pępickiego Potoku.

W rejonie lotniska występują dwa piętra wodonośne: czwartorzędowe i trzeciorzędowe, rozdzielone warstwą iltów, co powoduje brak bezpośrednich kontaktów hydraulicznych między nimi. Piętro czwartorzędowe tworzy fluwioglacjalna seria osadów piaszczysto-żwirowych o średniej

*Zakład Hydrogeologii ING, Uniwersytet Wrocławski, pl. Maxa Borna 9, 50-205 Wrocław, e-mail: jgur@ing.uni.wroc.pl
 **BEG Spółka z o.o., ul. Braci Gierymskich 88, 51-640 Wrocław, e-mail: pawel@cybernet.com.pl



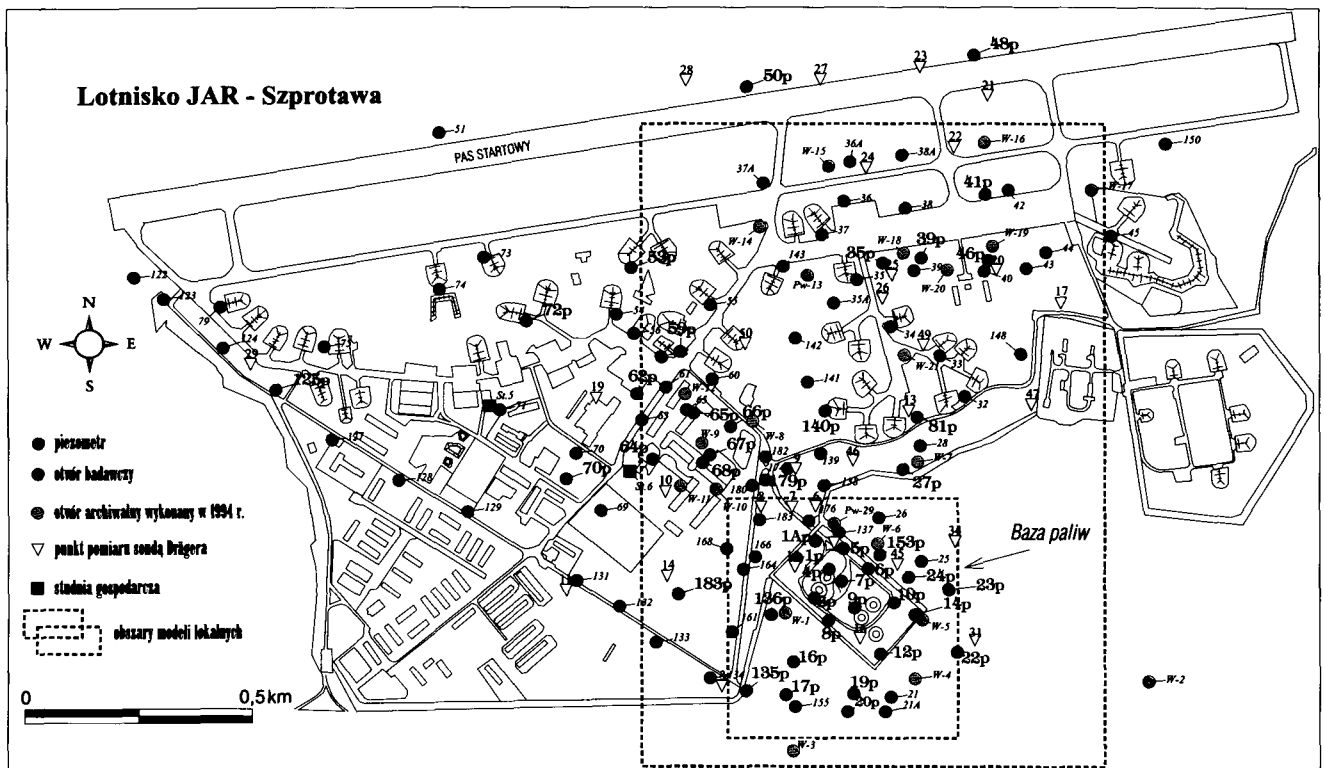
Ryc. 1. Lokalizacja badanych obiektów



Ryc. 2. Mapa punktów badawczych lotniska w Brzegu

miąższości w granicach 4–8 m. Występuje ona niemal na całej powierzchni lotniska. Utwory fluwiogłacjalne charakteryzują się bardzo zmienną przepuszczalnością. Ich współczynnik filtracji obliczony na podstawie analizy granulometrycznej zawiera się w granicach $3,12 \cdot 10^{-5}$ – $1,75 \cdot 10^{-3}$

m/s (średnio $1,9 \cdot 10^{-4}$ m/s). Poziom czwartorzędowy jest zasilany poprzez infiltrację z opadów atmosferycznych. Obszar lotniska drenażują w sposób naturalny potoki: Pepicki i Kościelny oraz sztucznie sieć rowów i system kanalizacji deszczowo-ściekowej.



Ryc. 3. Mapa punktów badawczych lotniska w Szprotawie

Wody podziemne w utworach trzeciorzędu występują w warstwach piasków drobno i średnioziarnistych. Zwierciadło wody jest napięte i stabilizuje się na głębokości do kilkunastu metrów. Współczynniki filtracji określone na podstawie próbnych pompowań wynoszą $2,3 \cdot 10^{-5}$ – $5,8 \cdot 10^{-5}$ m/s.

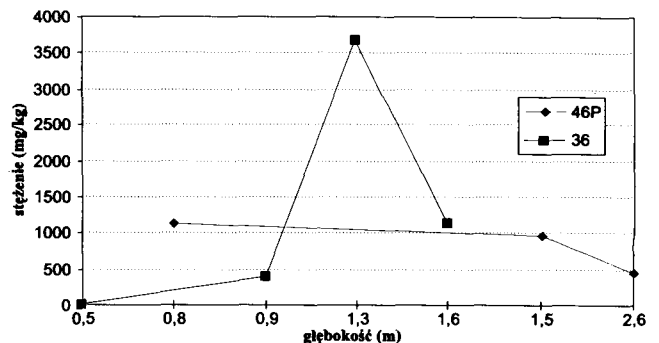
Rejon lotniska w Szprotawie leży także w obszarze monokliny przedsudeckiej. Na monoklinie występują utwory trzeciorzędowe reprezentowane przez osady miocenu zbudowanego z serii ilastych przewarstwionych pokładem węgla brunatnego i osadami piaszczysto-żwirowymi oraz pliocenu, w którego skład wchodzi ropy i mułki przewarstwiane piaskami i żwirami. Jednak najistotniejsze znaczenie w kontekście prowadzonych prac badawczych ma, podobnie jak na lotnisku w Brzegu, budowa utworów czwartorzędowych. Są to osady lodowcowe i wodnolodowcowe, reprezentowane głównie przez gliny zwałowe i piaski różnoziarniste (miejscami zaglinione) z domieszką żwirów. W rejonie położonym na północ od rzeki Szprotawy czwartorzęd osiąga miąższość do 70 m, gdzie część stropową budują gliny zwałowe. Pod nimi leżą piaski o różnej granulacji z wkładkami żwirów. Natomiast obszar samego lotniska, położony na lewym brzegu Szprotawy, charakteryzuje się przede wszystkim zredukowaną miąższością osadów czwartorzędowych wynoszącą od 10 do 25 m. Część stropową stanowią różnoziarniste piaski fluwioglacjalne, miejscami zaglinione, z domieszkami żwirów.

W rejonie lotniska w Szprotawie główne piętra wodonośne to czwartorzędowe i trzeciorzędowe. W skład czwartorzędowego piętra wodonośnego wchodzi kilka warstw wodonośnych o zróżnicowanej więzi hydraulicznej. Na prawym brzegu Szprotawy warunki hydrogeologiczne są bardziej zróżnicowane podobnie jak opisana budowa geologiczna. Występujące tu utwory wodonośne mają zmienne miąższości od kilkudziesięciu centymetrów do kilkunastu metrów i przykryte są ok. 10-cio metrową warstwą glin zwałowych.

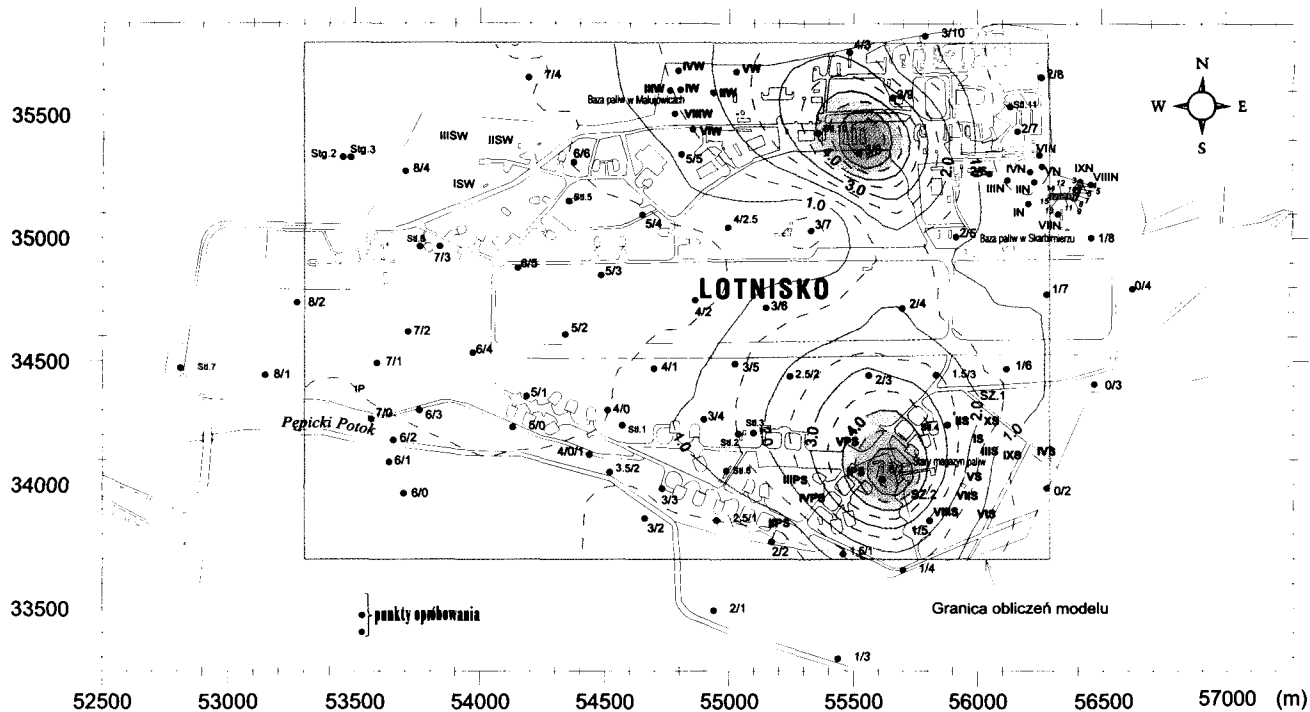
Warunki hydrogeologiczne terenu lotniska są mniej skomplikowane. Najbardziej narażona na zanieczyszczenia produktami ropopochodnymi jest przypowierzchniowa warstwa wodonośna o miąższości 5–10 m, zbudowana z piasków drobno i średnioziarnistych ze żwirami. Współczynniki filtracji otrzymane z próbnych pompowań wynoszą od $1,04 \cdot 10^{-5}$ do $9,4 \cdot 10^{-5}$ m/s, a wartości wytarowane na modelu numerycznym $1,2 \cdot 10^{-6}$ – $7,0 \cdot 10^{-5}$ m/s (Gurwin & Janczarski, 1997). Zwierciadło wody ma charakter swobodny i występuje na głębokości od 0,25 do 7,40 m p.p.t. Tylko miejscami zwierciadło było napięte, a warstwę napinającą stanowiły muły.

Stwierdzony układ hydrostrukturalny (Gurwin & Janczarski, 1997) szczególnie zagrożonego obszaru, jakim jest baza paliw na południu lotniska, wskazuje na możliwość przemieszczania się plamy substancji ropopochodnych w kierunku Kamiennego Potoku na E i wsi Dzieńmierowice na S.

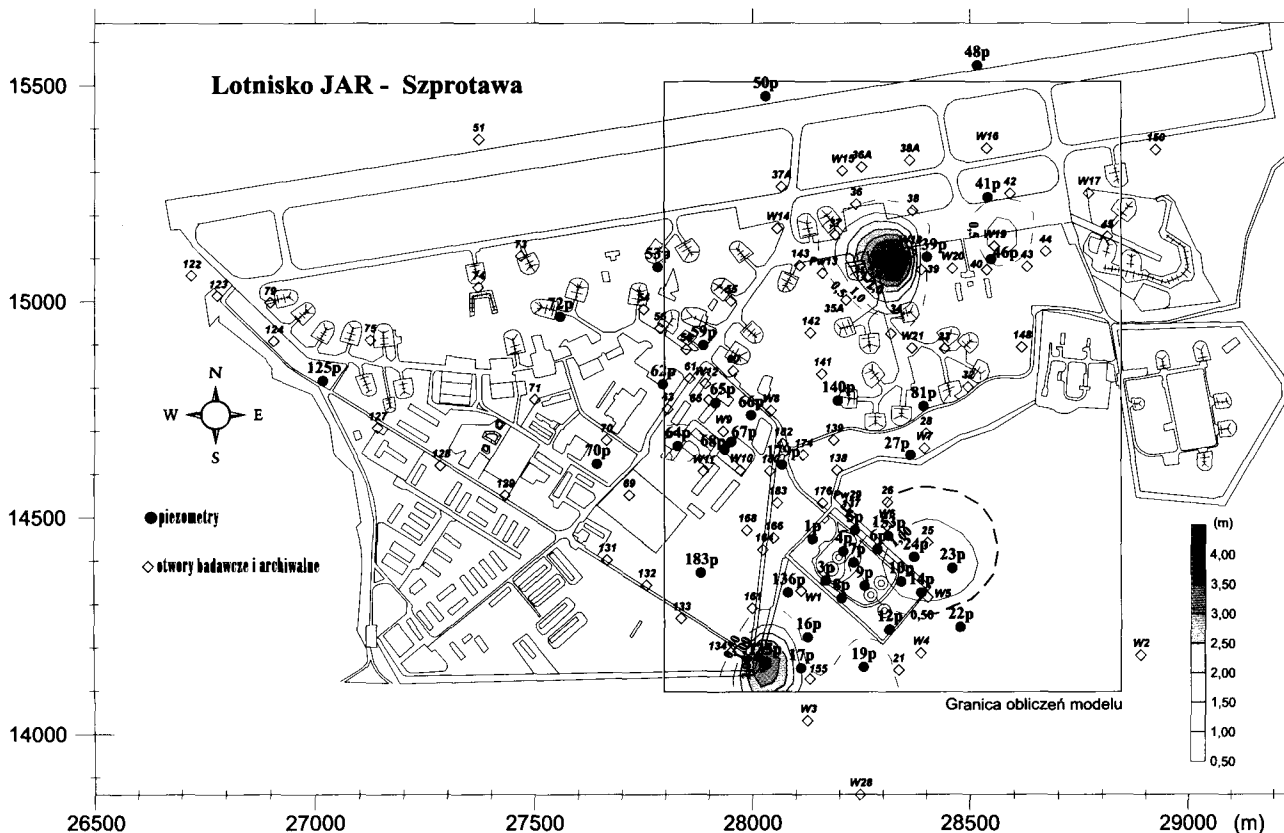
W trzeciorzędowym piętrze wodonośnym wyróżnić można 3–4 poziomy wodonośne związane z zailonymi piaszczysto-żwirowymi utworami miocenu. Górny trzeciorzędowy poziom wodonośny jest oddzielony od czwartorzędowego



Ryc. 4. Zmiana stężenia substancji ropopochodnych w wybranych profilach gruntowych



Ryc. 5. Mapa objętości jednostkowej skażonego gruntu na lotnisku w Brzegu, w [m³/m²]

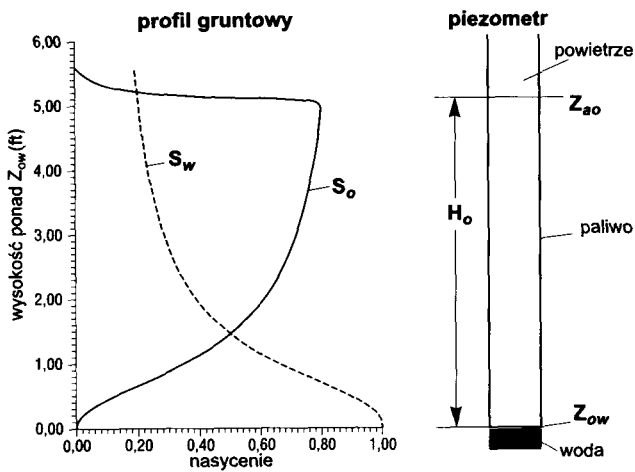


Ryc. 6. Mapa zawartości substancji ropopochodnych w gruncie na lotnisku w Szprotawie w [l/m²]

piętra wodonośnego kilkunastometrową warstwą ilów serii poznańskiej. Wydajność studni o wartości 24 m³/h uzyskano przy stosunkowo dużej depresji $s=15$ m. Współczynniki filtracji zawierają się w granicach od $5,28 \cdot 10^{-5}$ m/s do $9,16 \cdot 10^{-5}$ m/s (Dokumentacja, 1996).

Przygotowanie materiałów wyjściowych i schematyzacja parametrów obliczeniowych

Przed przystąpieniem do analizy geostatystycznej i wykonania modelu matematycznego należało przygotować i

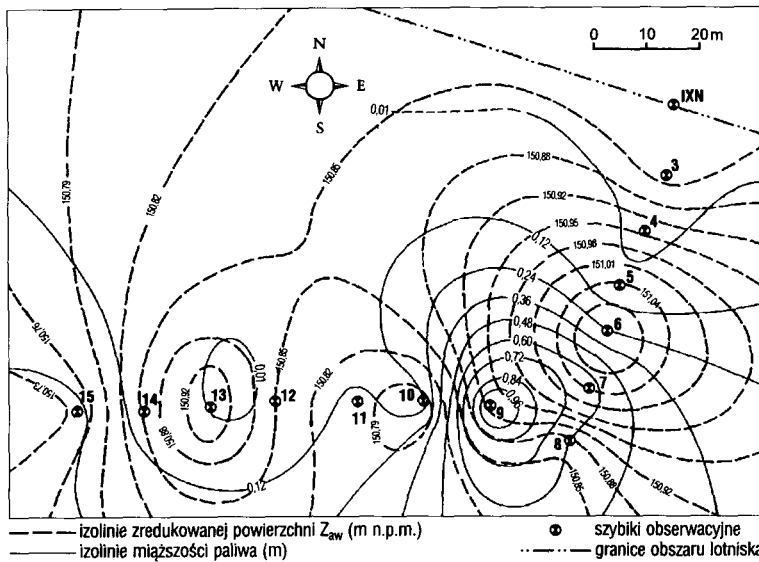


Ryc. 7. Układ trójfazowy powietrze-paliwo-woda (wg Spillcad..., 1996)

opracować wstępnie dane wyjściowe. Ponieważ program Spillcad nie ma możliwości wykonywania w nim numerycznego podkładu mapowego, pomocnego przy tworzeniu modelu i korzystania z jego wyników, posłużono się w tym celu programem komputerowym typu GIS. Lokalizacja wszystkich punktów badawczych została przedstawiona na mapach (ryc. 2, 3).

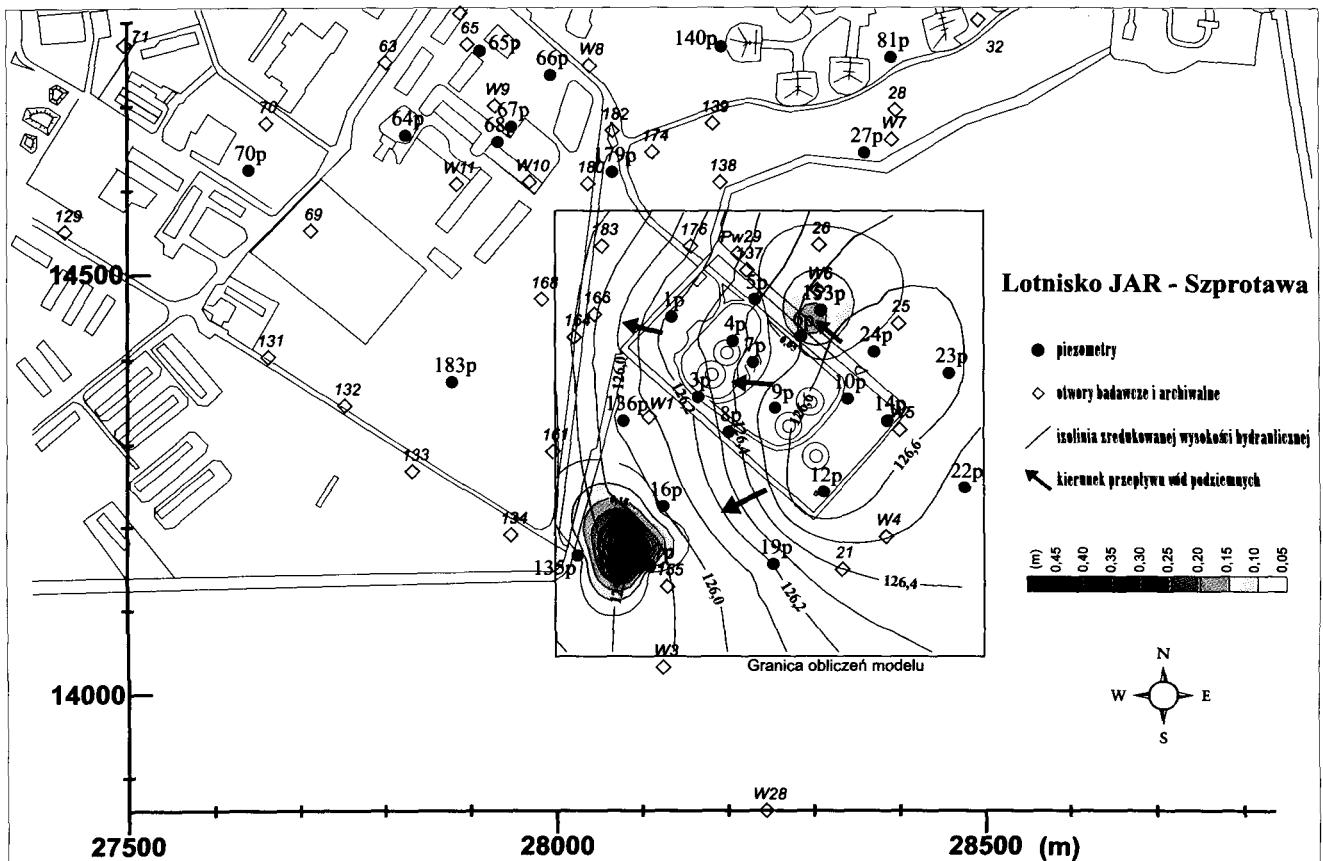
W bogatym materiale źródłowym nie było niestety dostatecznie szczegółowego opróbowania w zakresie miąższości paliwa leżącego bezpośrednio na zwierciadle wód podziemnych. W związku z tym zostały wykonane serie pomiarów uzupełniających w terenie.

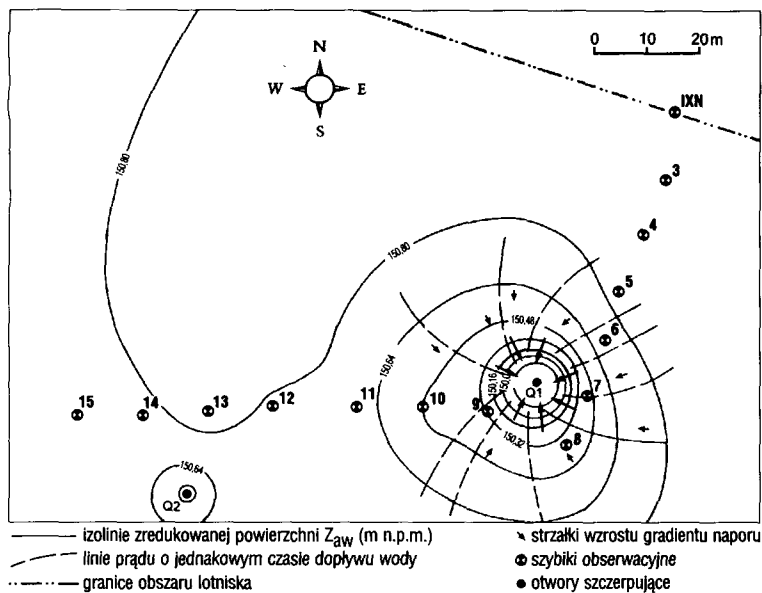
Do badań zawartości substancji ropopochodnych w gruntach i wodach podziemnych został wykorzystany program komputerowy Spillcad wersja 4.1 amerykańskiej firmy Environmental Systems & Technologies Inc. Program Spillcad został wybrany ze względu na możliwość prowadzenia dokładnych obliczeń na podstawie wypra-



Ryc. 8. Mapa zredukowanej powierzchni Z_{aw} i miąższości paliwa w rejonie bazy paliw Skarbmierz na lotnisku w Brzegu

Ryc. 9. Mapa zredukowanej powierzchni Z_{aw} i miąższości paliwa w rejonie bazy paliw na lotnisku w Szprotawie





Ryc. 10. Symulacja szczerpywania paliwa na lotnisku w Brzegu

cowanych teoretycznych modeli szacowania zawartości substancji ropopochodnych z jednoczesną graficzną prezentacją wyników w postaci map izolinowych. Bardzo istotną zaletą wybranego programu jest fakt wykorzystywania w szacowaniu objętości rozlewów geostatystycznej metody krigingu, powszechnie uznawanej za najlepszą metodę interpretacji danych przestrzennych pochodzących z obserwacji terenowych, szczególnie o nierównomiernym zagęszczeniu.

Program Spillcad pozwala określać ilościowe zmiany objętości rozlewu i koncentracji zanieczyszczenia w gruncie dla wolnej i rezydualnej fazy produktu naftowego. Obliczenia są wykonywane na podstawie baz danych, zawierających informacje dotyczące koncentracji substancji w gruncie i w wodzie oraz monitorowania głębokości zalegania powierzchni granicznych faz: powietrze–substancja ropopochodna (Z_{ao}), substancja ropopochodna–woda (Z_{ow}) (ryc. 7). Baza ta może być sukcesywnie uzupełniana nowymi danymi terenowymi,

Tab. 1. Parametry przyjęte w schemacie obliczeniowym

Parametry gruntu		Lotniska	
		Brzeg	Szprotawa
współczynnik filtracji, [m/s]	k	0,000192	0,000032
porowatość całkowita, [-]	ϕ	0,41	0,41
wilgotność naturalna, [-]	S_m	0,24	0,23
gęstość objętościowa gruntu, [g/cm ³]	ρ_b	1,3	1,3
maksymalne nasycenie produktem ropopochodnym rezydualnym w strefie saturacji, [-]	S_{or}	0,228	0,23
maksymalne nasycenie produktem ropopochodnym rezydualnym w strefie aeracji, [-]	S_{og}	0,055	0,051
parametr w modelu ciśnienia kapilarnego Van Genuchtena związany z rozkładem wielkości porów gruntu, [-]	n	2	2,2
parametr w modelu ciśnienia kapilarnego Van Genuchtena związany ze średnią wielkością porów w gruncie, [1/m]	α	20	10
Parametry produktu naftowego			
stosunek gęstości produktu naftowego do gęstości wody, [-]	ρ_{ro}		0,73
stosunek lepkości produktu naftowego do lepkości wody, [-]	η_{ro}		0,62
stosunek napięcia powierzchniowego wody do napięcia powierzchniowego produktu naftowego, [-]	β_{ao}		3,3
stosunek napięcia powierzchniowego wody do napięcia międzyfazowego woda–produkt naftowy, [-]	β_{ow}		1,4

stając się tym samym narzędziem tworzenia interaktywnego systemu monitorowania wielkości skażenia w czasie i przestrzeni.

Aby na wykonanym modelu skażenia substancjami ropopochodnymi przeprowadzać obliczenia za pomocą wbudowanych modułów liczących, niezbędne jest uprzednie zadanie parametrów warstwy wodonośnej, właściwości fizycznych gruntu i produktu ropopochodnego. Zostały one wyznaczone na podstawie archiwalnych dokumentacji, pomiarów własnych i wartości charakterystycznych podawanych lub szacowanych w programie komputerowym. Wprowadzone zostają wartości uśrednione, ponieważ w schemacie obliczeniowym ośrodek jest traktowany jako jednorodny i izotropowy. Dla określenia współczynnika filtracji, jako podstawowego parametru hydrogeologicznego, w przypadku lotniska w Brzegu wykorzystano dane z archiwalnych próbnych pompowań, natomiast dla lotniska w Szprotawie przeprowadzono własne pompowania badawcze, a wartości współczynnika filtracji dodatkowo zweryfikowano na modelu hydrodynamicznym (Gurwin & Janczarski, 1997). Zestawienie wszystkich niezbędnych parametrów zawiera tab. 1. Przy czym w odniesieniu do produktu naftowego przyjęto w obu obszarach takie same wartości - typowe dla benzyn. Badania właściwości technicznych paliwa wskazały, że pod względem większości norm spełnia ono wymagania dla paliw do turbinowych silników lotniczych. Ogólnie można zatem przyjąć następujący procentowy podział zawartości węglowodorów poszczególnych typów (*Wskazówki metodyczne...*, 1995):

- węglowodory alifatyczne ok. 60 %
- węglowodory naftenowe ok. 20 %
- węglowodory aromatyczne ok. 20 %

Najczęściej dysponujemy jedynie informacjami odnośnie niektórych z wymienionych parametrów, toteż program Spillcad stwarza automatyczną możliwość przeliczenia pozostałych wartości na podstawie znanych parametrów lub analizy sitowej gruntu.

Do obliczeń w modelu lokalnym lotniska w Brzegu, w rejonie bazy paliw w Skarbmierzu (ryc. 2), przyjęto parametry gruntu odpowiednie dla glin piaszczystych i pylastych, występujących na tym obszarze. Współczynnik filtracji zmieniono na $k = 2,7 \cdot 10^{-5}$ m/s, a $\alpha = 9$ 1/m. Pozostałe wielkości pozostały bez zmian.

Zanieczyszczenie substancjami ropopochodnymi

Całkowita ilość substancji ropopochodnych w gruncie. Odpowiedni moduł obliczeniowy posłużył do określenia zawartości węglowodorów pochodzenia naftowego (TPH) w zanieczyszczonym gruncie. Można obliczyć objętość skażonego gruntu, wyznaczyć

rozkład zanieczyszczenia w przestrzeni 3-D, a także ocenić zawartości składników specyficznych jak: benzen, toluen, WWA.

Znając stężenie TPH na różnych głębokościach opróbowania w siatce punktów badawczych została obliczona jednostkowa objętość produktu ropopochodnego w przeliczeniu na 1 m² powierzchni oraz objętość całkowita V₀.

Wytypowano także reprezentatywne profile gruntowe, w których była dostępna dostateczna liczba danych o zanieczyszczeniu w profilu pionowym. Na ich podstawie wykonano wykresy zmian zawartości produktów ropopochodnych wraz z głębokością dla przykładowego profilu gruntowego nr 36 na lotnisku w Brzegu i nr 46P na lotnisku w Szprotawie (ryc. 4).

Obliczenia zawartości produktów ropopochodnych w gruntach zostały wykorzystane do opracowania map wyników. Dla lotniska w Brzegu zaprezentowano mapę objętości jednostkowej skażonego gruntu (ryc. 5), która ukazuje zmienność w planie ilości skażonego gruntu w przeliczeniu na 1 m² powierzchni. Największe wartości w przedziale 3–6 m³/m² występują na północy obszaru, w rejonie pomiędzy bazami paliw w Małujowicach i Skarbmierzu. Drugi taki teren można wydzielić w okolicy tzw. starego magazynu paliw w południowo-wschodniej części lotniska. Obliczona całkowita objętość produktów ropopochodnych zawartych w gruncie wynosi ok. 2500 m³ przy przyjętym zakresie głębokościowym 0–9 m. Natomiast całkowita objętość zanieczyszczonego gruntu szacowana jest na 7 mln m³.

Celem przedstawienia skażenia gruntów na lotnisku w Szprotawie zamieszczono mapę zawartości substancji ropopochodnych w gruncie (ryc. 6). Dla 1996 r. dysponowano znacznie większą liczbą pomiarów niż z pierwszej serii opróbowania w 1994 r., co ma zasadniczy wpływ na wiarygodność uzyskanych wyników. W obszarze bazy paliw zawartości produktów ropopochodnych w gruncie wynoszą od 0,5 do 2 l/m². Maksymalne zawartości występują w rejonie płyty tankowania (punkt 35p) oraz w okolicach punktu 135p i wynoszą odpowiednio 3–5 l/m² oraz 2–4 l/m². Zawartość graniczną obliczeń przyjęto na poziomie 0,01 l/m². Ilość paliwa w gruncie została oszacowana w modelu na 1932 m³, co odpowiada masie 1412 t. Obliczona całkowita objętość skażonego gruntu wynosi 1 132 196 m³.

Na uwagę zasługują także obliczenia w zakresie składników specyficznych. Na obszarze lotniska w Brzegu jednostkowe zawartości WWA powyżej 0,05 kg/m² notuje się w całej południowej części lotniska w sąsiedztwie Pępickiego Potoku.

Obliczanie wolnej fazy produktów ropopochodnych na podstawie obserwacji w otworach

Do bezpośredniego szacowania zawartości wolnej fazy produktów ropopochodnych zalegających na zwierciadle wód podziemnych wykorzystano pomiary poziomu paliwa w piezometrach. Miąższość warstwy paliwa obserwowana w otworze badawczym różni się od miąższości rzeczywistej zalegającej na zwierciadle wód podziemnych zgodnie z zależnością (Van Dam, 1967):

$$\frac{h_1}{h_2} \approx \frac{\Delta p_1 \rho_{sr} - \rho_p}{\Delta p_2 \rho_w - \rho_p}$$

gdzie:

$\Delta p_1, \Delta p_2$ — różnice ciśnień kapilarnych między: wodą i paliwem, paliwem i powietrzem porowym, [Pa]

$\rho_{sr}, \rho_w, \rho_p$ — gęstości: paliwa, wody i powietrza, [M/L³]
 h_1, h_2 — miąższość paliwa: zmierzona w otworze i rzeczywista, [L]

Obliczenia prowadzono według matematycznego modelu uwzględniającego zmiany nasycenia gruntu płynami, pochodzącego ze wzniosu kapilarnego (Van Genuchten, 1980; Parker i in., 1987; Lenhard & Parker, 1990):

$$S_w = (1 - S_m) (1 + (\alpha \beta_{ow} h_{ow})^n)^{-m} + S_m$$

$$S_t = (1 - S_m) (1 + (\alpha \beta_{ao} h_{ao})^n)^{-m} + S_m$$

gdzie:

S_w — nasycenie gruntu wodą, [L⁰]

S_t — całkowite nasycenie gruntu paliwem i wodą, [L⁰]

h_{ao}, h_{ow} — różnice wysokości ciśnienia między fazami: powietrze–paliwo, paliwo–woda, [L]

$m = 1 - 1/n$, [L⁰]

Pozostałe oznaczenia są zgodne z tab. 1.

Na ryc. 7 przedstawiony został rozkład nasycenia gruntu cieczą dla stanu równowagi trójfazowej. Nasycenie fazą wolną produktów ropopochodnych obliczane jest ze wzoru:

$$S_{of} = S_t - S_w \text{ dla } Z_{ow} < Z < Z_u$$

$$S_{of} = 0 \text{ dla pozostałych przypadków}$$

gdzie Z_u — wysokość powyżej której nasycenie wolną fazą substancji ropopochodnych jest równe 0.

Mając dane o położeniu powierzchni granicznej Z_{ao} i Z_{ow} (ryc. 7) w monitorowanych punktach można obliczyć pionowy rozkład nasycenia fazą wolną produktu, a następnie jego objętość jednostkową, tj. przypadającą na jednostkę powierzchni, V_{of} , jako:

$$V_{of} = \int_{Z_{ow}}^{Z_u} \phi S_{of}(z) dz$$

gdzie: ϕ — porowatość gruntu, [L⁰]

S_{of} — nasycenie fazą wolną produktów ropopochodnych, [L⁰]

Z_{ow} — wysokość powierzchni granicznej paliwo–woda, [L]

Z_u — wysokość powyżej której nasycenie wolną fazą substancji ropopochodnych jest równe 0, [L]

Całkowitą objętość na obszarze modelu otrzymuje się następnie ze wzoru:

$$\sum V_{of} = A \sum_{i=1}^N V_{of_i}$$

gdzie: A — pole powierzchni elementarnej siatki dyskretnej

N — liczba węzłów obliczeniowych siatki dyskretnej.

Pierwszy model lokalny na obszarze lotniska w Brzegu został zlokalizowany na N od bazy paliw w Skarbmierzu (ryc. 2), gdzie na niewielkim obszarze zanotowano miąższości paliwa dochodzące do 1,13 m. Wykreślona mapa miąższości wolnego paliwa H_o (ryc. 8) dokumentuje plamę paliwa od wartości granicznej 1 cm do wartości maksymalnej w szybiku nr 9. Dynamikę układu trójfazowego przedstawia mapa powierzchni zredukowanej $Z_{aw} = Z_{ow} + \rho_{ro} H_o$ (ryc. 8, tab. 1). Wartości zmieniają się od 151,1 m n.p.m. na zachodzie do 150,7 m n.p.m. na wschodzie. Strefa skażona oszacowana została na 14 500 m², a obliczona objętość wolnej fazy produktu wynosi $V_{of} = 138038$ l.

Drugi model lokalny jest położony w rejonie tzw. stare-

Tab. 2. Prędkości dopływu cieczy do studni szcerpujących

	Woda			Paliwo
prędkość śr. [m/d]	0,035	0,023	0,036	1,13
droga [m]	26,5	17,46	24	1,7
czas [d]	758	758	672	1,5

go magazynu paliw (ryc. 2), gdzie zanotowano niewielkie miąższości paliwa w granicach 1–4 cm. Obliczona objętość wolnej fazy produktu jest niska i wynosi $V_{of} = 4636$ l.

Na obszarze lotniska w Szprotawie plamy wolnego paliwa stwierdzono (ryc. 3):

- na południe od bazy paliw — rejon piezometrów 16p i 17p,

- na NE od bazy — piezometr 153p,

- rejon płyty tankowania — punkt 43 oraz piezometr 35p,

- północna część bazy samochodowej — piezometr 65p.

Pomiary miąższości wolnego paliwa wskazują, że najwyższe wartości ok. 0,5 m występują w rejonie bazy paliw. Przepływ wód podziemnych następuje tu w kierunku E oraz SE, co jest zgodne z przemieszczeniem się głównej plamy paliwa od obszaru bazy (ryc. 9). Powierzchnia strefy skażonej oszacowana została na 35 400 m², a obliczona objętość wolnej fazy produktu naftowego wynosi $V_{of} = 5900$ l.

Symulacja szcerpywania plamy paliwa w rejonie bazy paliw na lotnisku w Brzegu

Ważną funkcją programu Spillcad jest możliwość symulacji odzyskiwania wolnej fazy produktów ropopochodnych. Poprzez testowanie wielowariantowych systemów studni o założonym wydatku można określić optymalną konfigurację dla szcerpania zanieczyszczenia. W ten sposób uzyskuje się na modelu układ dynamiczny, w którym przy maksymalnym szcerpywaniu produktu osiąga się jednocześnie pełną hydrauliczną kontrolę nad migracją plamy zanieczyszczeń ropopochodnych nie mieszących się z wodą (NAPL). Dalsze zwiększanie wydatku pompowania (ponad wartość optymalną) obniża ilość odzyskiwanego paliwa ze względu na przyrost zawartości produktu w fazie rezydualnej w wytorzonym leju depresji. Program pozwala oszacować ilość produktu rezydualnego pozostającego wskutek rozmazywania w porach gruntu podczas pompowania.

Podczas modelowania procesu szcerpywania wolnej fazy paliwa metodą prób i błędów dobrano układ dwóch studni dogłębnionych o wydajnościach $Q_1 = 0,14$ l/s i $Q_2 = 0,05$ l/s w rejonie bazy w Skarbimierzu (ryc. 10), kontrolujących plamę paliwa po wartość graniczną miąższości 1 cm.

Układ dynamiczny wywołany pompowaniem najlepiej przedstawia mapa powierzchni granicznej powietrze-paliwo Z_{ao} (ryc. 10). Zadane wymuszenie wywołało radialny układ strumienia w kierunku studni. Dopływ wody i paliwa do zadanych otworów szcerpujących był dodatkowo kontrolowany poprzez wyznaczanie linii prądu i obliczanie prędkości rzeczywistych przepływu tych płynów w ośrodku o porowatości ϕ . Na tej podstawie można obliczać czas przepływu na drodze Δx i wyznaczać izochrony dopływu do studni. Przykładowe wartości zestawiono w tab. 2.

W wyniku obliczeń numerycznych uzyskano następujące wyniki symulacji procesu szcerpywania paliwa:

- początkowa objętość wolnej fazy paliwa $Q_0 = 1\ 38\ 038$ l

- rezydualna faza paliwa w strefie nienasyceńca po pompowaniu 32 996 l.

- rezydualna faza paliwa w strefie saturacji po pompowaniu 27 497 l

- objętość paliwa szcerpana 77 545 l.

- strefa skażona 1,45 ha.

Objętość odzyskanego wolnego produktu stanowi

56,2% objętości początkowej, co jest dobrą prognozą dla procesu oczyszczania, zważywszy na łatwość przechodzenia produktów ropopochodnych do fazy rezydualnej w porach gruntu w obrębie wywołanego leja depresji. Przeprowadzona symulacja wskazuje, że 23,9% wolnego paliwa pozostanie w fazie rezydualnej w strefie nienasyceńca, a 19,9% w strefie saturacji.

Wnioski

Komputerowa analiza danych i symulacje modelowe potwierdzają przydatność metod numerycznych w prawidłowym planowaniu oczyszczania i rekultywacji terenów skażonych produktami ropopochodnymi.

Całkowita zawartość substancji ropopochodnych w gruncie jest dla obu lotnisk podobna, ale w przypadku lotniska w Szprotawie dla znacznie mniejszej objętości skażonego gruntu. W wyniku przeprowadzonych pomiarów terenowych określono rejon występowania wolnego paliwa na zwierciadle wód podziemnych.

Możliwość komputerowej symulacji procesu szcerpywania ułatwia dobranie prawidłowej lokalizacji otworów depresjonujących i oczyszczających. Przewidywania odnośnie skuteczności szcerpywania paliwa przesłedzono na przykładzie bazy paliw na lotnisku w Brzegu, gdzie na małej przestrzeni zgromadziła się znaczna objętość wolnego paliwa. Odpowiednia lokalizacja wraz z dobranym wydatkiem studni pozwoli odzyskać ponad połowę paliwa. Na obszarach lotnisk przeprowadza się już likwidację ognisk zanieczyszczeń przez zastosowanie skimerów czynnych i biernych.

Podjęcie monitoringu w sieci punktów obserwacyjnych na obszarach obydwu lotnisk pozwoli na uzupełnianie bazy danych i weryfikację modeli w kolejnych etapach rekultywacji.

Literatura

- Dokumentacja** hydrogeologiczna dla określenia stanu zanieczyszczenia terenu bytego lotniska JAR w Szprotawie substancjami ropopochodnymi — 1996. Czyste Powietrze Sp. z o.o.
- GURWIN J. & JANCZARSKI P. 1997 — Model ustalonych warunków hydrodynamicznych poziomu przypowierzchniowego w rejonie lotniska JAR w Szprotawie. [W:] Mat. XII Symp. pt. Modelowanie w hydrogeologii i ochronie środowiska, Częstochowa.
- LENHARD R.J. & PARKER J.C. 1990 — Estimation of free hydrocarbon volume from fluid levels in observation wells. *Ground Water*, 28: 57–67.
- PARKER J.C., LENHARD R.J. & KUPPUSAMY T. 1987 — A parametric model for constitutive properties governing multiphase flow in porous media. *Water Resour. Res.*, 23: 618–624.
- SPILLCAD Data Management And Decision For Hydrocarbon Spills. User And Technical Guide. ES&T Software, Ltd. 1996.
- Wskazówki metodyczne** do oceny stopnia zanieczyszczenia gruntów i wód podziemnych produktami ropopochodnymi i innymi substancjami chemicznymi w procesach rekultywacji. Wyd. TRIO, PIOŚ Warszawa 1995.
- Van DAM J. 1967 — The migration of hydrocarbons in a water-bearing stratum. [W:] The joint problems of the oil and water industries. Hepple P.: 55–96, Institute of Petroleum.
- Van GENUCHTEN M., Th. 1980 — A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity for unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 44: 892–898.