

Jarosław Zawadzki\*, Piotr Fabijańczyk\*

## TRÓJWYMIAROWA GEOSTATYSTYCZNA INTEGRACJA POMIARÓW PODATNOŚCI MAGNETYCZNEJ GLEBY

### THREE-DIMENSIONAL GEOSTATISTICAL INTEGRATION OF MEASUREMENTS OF SOIL MAGNETIC SUSCEPTIBILITY

**Słowa kluczowe:** podatność magnetyczna gleby, magnetometria terenowa, gleba, geostatystyka, metale ciężkie, integracja danych.

**Key words:** field magnetometry, soil magnetic susceptibility, geostatistics, data integration, soil pollution, heavy metals.

*Deposition of industrial and urban dust on the soil surface is a source of magnetic particles that later accumulated in upper soil horizons cause the increase of soil magnetic susceptibility. Field magnetometry is a convenient method that makes it possible to detect areas with heightened soil magnetic susceptibility and potentially polluted with heavy metals.*

*It is possible to carry out several types of measurements of soil magnetic susceptibility. Measurements performed at soil surface are very easy and cost-effective. However, at the same time they are sensitive to many environmental factors that may cause difficulties in analyses of measuring results. Measurements performed in the soil profile are more precise, but at the same time more complicated and time-consuming.*

*The aim of this work was to integrate measurements of soil magnetic susceptibility performed at the soil surface and in the soil profile. After that, three-dimensional spatial distributions of soil magnetic susceptibility were used to estimate the extent of area potentially polluted with heavy metals. Calculated spatial distributions of soil magnetic susceptibility were validated using chemical measurements of concentration of particular heavy metals in soil. Study area was located in Upper Silesian Industrial Area. At the study area a series of measure-*

---

\* *Dr hab. inż. Jarosław Zawadzki i mgr inż. Piotr Fabijańczyk – Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20, 00-661 Warszawa; tel.: 22 234 54 26; e-mail: j.j.zawadzki@gmail.com; piotr.fabijanczyk@is.pw.edu.pl*

*ments of magnetic susceptibility at soil surface and in the soil profile was performed. Additionally, soil samples were collected and used to measure the concentration of heavy metals in soil. Results show that the integrate measurements of magnetic susceptibility performed at soil surface and in soil profile. Using three-dimensional spatial distributions it was possible to differentiate areas with heightened values of magnetic susceptibility with predominant anthropogenic or natural factors.*

## 1. WPROWADZENIE

Jednym z celów badawczych pracy było zbadanie możliwości oraz opracowanie najefektywniejszych metod integracji danych pomiarowych w metodzie magnetometrycznej. W magnetometrii terenowej wykonuje się zazwyczaj kilka rodzajów pomiarów magnetometrycznych, które są później uzupełniane i weryfikowane pomiarami chemicznymi zawartości metali ciężkich w glebie. Z tego powodu w metodzie magnetometrycznej możliwe są dwa rodzaje integracji danych:

- obejmujący integrację różnego typu danych magnetometrycznych,
- obejmujący integrację danych magnetometrycznych i chemicznych.

Ponadto w odniesieniu do danych magnetometrycznych różnego typu możliwe jest wykonanie integracji danych w przestrzeni 2D lub 3D.

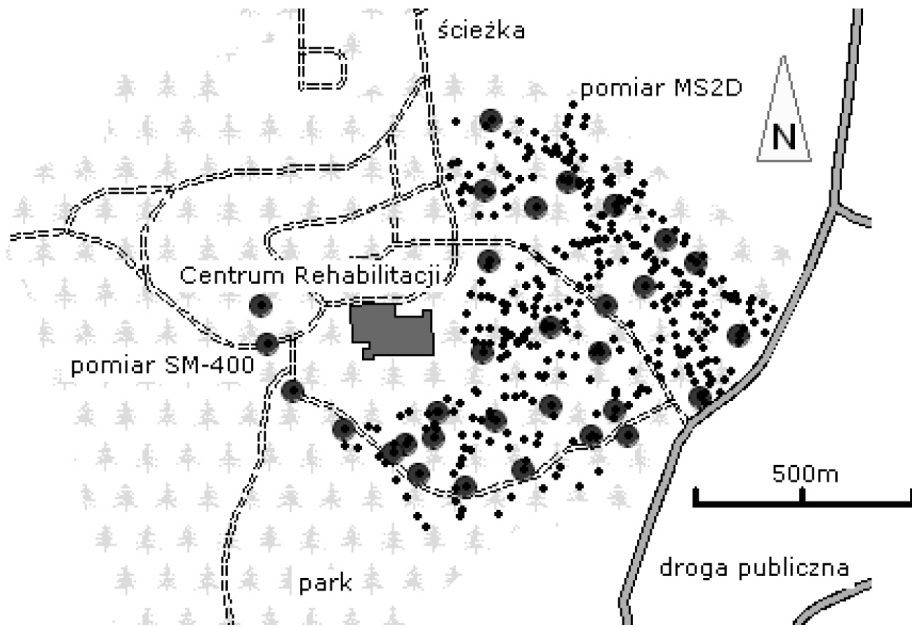
Integracja danych magnetometrycznych w przestrzeni trójwymiarowej (3D) może mieć sporo korzyści w ocenie potencjalnego zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi. Wykorzystywane są pomiary podatności magnetycznej na powierzchni gleby i w profilu glebowym. Są one szybkie i proste w wykonaniu. Sam proces integracji danych w przestrzeni 3D nie wymaga zdecydowanie większego nakładu pracy w porównaniu do integracji danych w przestrzeni 2D.

Rezultatem geostatystycznej integracji danych magnetometrycznych są trójwymiarowe rozkłady przestrzenne podatności magnetycznej górnej warstwy gleby badanego obszaru. W porównaniu do dwuwymiarowych rozkładów przestrzennych umożliwić mogą one wykrycie obszarów o podwyższonej podatności magnetycznej oraz określenie, na jakiej głębokości w profilu glebowym obserwowane są podwyższone wartości podatności magnetycznej. Pozwolić może to na lepsze rozróżnienie podwyższonych wartości podatności magnetycznej spowodowanych zanieczyszczeniem antropogenicznym od tych spowodowanych naturalnymi właściwościami gleby.

## 2. POMIARY MAGNETOMETRYCZNE

W integracji danych magnetometrycznych w przestrzeni 3D wykorzystane zostały pomiary podatności magnetycznej wykonywane na powierzchni gleby miernikiem Bartington

MS2D [Dearing 1994] oraz pomiary wykonywane w profilu glebowym miernikiem SM-400. Wynikiem pomiarów wykonywanych na powierzchni gleby był zbiór punktów rozmieszczonych na płaszczyźnie 2D, z pominięciem możliwych różnic wynikających z ukształtowania terenu. Rezultatem pomiarów wykonywanych w profilu glebowym był natomiast zbiór rozkładów podatności magnetycznej względem głębokości w profilu glebowym.



**Rys. 1.** Powierzchnia pomiarowa położona w Reptach Śląskich; czarne punkty oznaczają miejsca pomiaru podatności magnetycznej miernikiem MS2D, czerwone punkty oznaczają miejsca pomiaru podatności w profilu glebowym miernikiem SM-400

**Fig. 1.** Study area located in Repty Śląskie; noir points denote locations of magnetic susceptibility measurements performed with MS2D, red points denote locations where magnetic susceptibility was measured in soil profile

W celu wykonania rozkładu przestrzennego podatności magnetycznej konieczne było przekształcenie rozkładów w profilu glebowym z postaci ciągłej na dyskretyzowaną. W tym celu, wybrano wartości podatności magnetycznej na głębokościach od 0 cm do 20 cm, z interwałem co 1 cm. W rezultacie, w każdym miejscu, w którym wykonywany był pomiar w profilu glebowym otrzymany został zbiór 21 wartości podatności magnetycznej. Dla 27 punktów pomiarowych podatności magnetycznej w profilu glebowym dało to w rezultacie zbiór wartości podatności magnetycznej o liczności 567. Po połączeniu takiego zbioru danych ze zbiorem, który obejmował 1919 pomiarów podatności wykonywanych na powierzchni gleby, otrzymano zbiór 2825 punktów rozmieszczony w przestrzeni 3D.

### 3. METODY INTEGRACJI DANYCH

**Wybór metody.** Pomiarzy powierzchniowe i pomiary wykonywane w profilu glebowym dotyczyły tej samej wielkości, czyli objętościowej podatności magnetycznej. Z tego względu integracja danych pomiarowych nie wymagała stosowania takich geostatystycznych metod integracji jak kokriging, w którym wykorzystuje się dwa typy zmiennych. W prezentowanych badaniach bowiem wykorzystane mogły zostać metody geostatystyczne oparte tylko na jednym typie zmiennej. W konsekwencji, rozkłady przestrzenne podatności magnetycznej na badanym obszarze wykonano metodą krigingu zwykłego [Isaaks i Srivastava 1998].

**Tabela 1.** Współczynniki korelacji liniowej Pearsona między podatnością magnetyczną mierzoną na powierzchni gleby oraz w profilu glebowym, na obszarze pomiarowym w Reptach Śląskich

**Table 1.** Pearson correlation coefficients between magnetics susceptibility measured on the soil surface and in soil profile at study area in Repty Śląskie

Na głębokości (w cm)	Na powierzchni	Na głębokości (w cm)	Na powierzchni
1	-0,01	11	-0,12
2	0,01	12	-0,11
3	-0,02	13	-0,13
4	0,28	14	-0,18
5	0,44	15	-0,23
6	0,43	16	-0,25
7	0,33	17	-0,24
8	0,17	18	-0,13
9	0,00	19	0,06
10	-0,10	20	0,13

**Wstępna analiza danych pomiarowych.** Podatność magnetyczna mierzona na obszarze pomiarowym położonym w Reptach Śląskich, na powierzchni gleby była praktycznie nieskorelowana z podatnością magnetyczną na głębokościach 1 cm, 2 cm i 3 cm. Spowodowane było to tym, że tę część profilu glebowego zajmował głównie poziom ściółki, który zbudowany jest głównie z substancji o charakterze diamagnetycznym. Poziom ten na ogół charakteryzują bardzo niskie wartości podatności magnetycznej. Wzrost sił korelacji obserwowany był na głębokości 4 cm, maksimum korelacji obserwowane było na głębokościach od 5 cm do 6 cm. Na głębokości 9 cm następował zanik korelacji między podatnością magnetyczną mierzoną na powierzchni a podatnością mierzoną w profilu glebowym. Na większych głębokości wartości współczynników korelacji Pearson'a przyjmowały wartości ujemne. Obserwacje takie wynikają z tego, że na głębokościach od ok. 9 cm do 20 cm wartości podatności magnetycznej utrzymywały się często na jednakowym poziomie bądź też na-

stępował wzrost podatności magnetycznej spowodowany wymywaniem związków żelaza z wyżej położonych poziomów glebowych.

Statystyki opisowe podatności magnetycznej zmierzonej na obszarze pomiarowym wskazują, że znacznie wyższe wartości podatności magnetycznej obserwowane były w pomiarach wykonywanych w profilu glebowym. Wynikało to z tego, że większość zanieczyszczeń pochodzenia antropogenicznego zakumulowana była na głębokości ok. 5 cm. W związku z tym zasięg penetracji miernika MS2D (50% mierzonego sygnału pochodzi z głębokości do 1,5 cm, a 90% z głębokości do 6 cm) był zbyt mały do objęcia wszystkich poziomów glebowych, gdzie zakumulowane były zanieczyszczenia antropogeniczne.

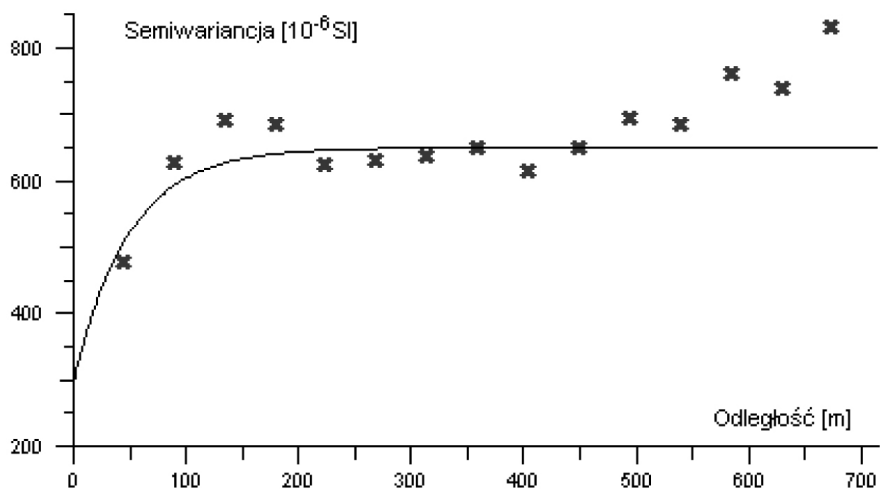
**Tabela 2.** Statystyki opisowe wartości podatności magnetycznej zmierzonej na powierzchni gleby oraz w profilu glebowym na obszarze pomiarowym w Reptach Śląskich

**Table 2.** Descriptive statistics of magnetic susceptibility measured on the soil surface and in soil profile at study area in Repty Śląskie

Wyszczególnienie	MS2D	SM-400
Średnia [10-3SI]	31,35	52,29
Błąd standardowy [10-3SI]	0,36	1,82
Mediana [10-3SI]	29,00	40,30
Odchylenie standardowe [10-3SI]	15,56	43,29
Wariancja [10-6SI]	242,21	1873,97
Kurtoza [-]	54,56	1,03
Współczynnik skośności [-]	3,87	1,11
Rozstęp [10-3SI]	309,00	262,20
Minimum [10-3SI]	0,00	0,00
Maksimum [10-3SI]	309,00	262,20

Analiza poszczególnych próbek glebowych wykazała, że rozkłady podatności magnetycznej w profilach glebowych miały przebieg charakterystyczny dla zanieczyszczenia antropogenicznego [Magiera i in. 2007]. Podwyższone wartości podatności magnetycznej obserwowane były średnio na głębokości ok. 5 cm. Następnie wraz z głębokością wartości podatności magnetycznej zmniejszały się i ustalały średnio na głębokości ok. 16 cm.

**Zmienność przestrzenna podatności magnetycznej w profilu glebowym.** W celu wykonania rozkładu przestrzennego podatności magnetycznej konieczne było zbadanie zmienności przestrzennej i wykonanie modelu wariogramu [Pannatier 1996]. W pierwszym etapie badania korelacji przestrzennych wykonane zostały w oparciu o 2825 wartości podatności magnetycznej, rozmieszczonych w przestrzeni 3D. Wariogram eksperymentalny został wymodelowany przy wykorzystaniu efektu samorodka i modelu sferycznego. Efekt samorodka wynoszący  $300 \cdot 10^{-6}$  SI miał stosunkowo dużą wartość w porównaniu do całkowitego progu, który wynosił  $650 \cdot 10^{-6}$  SI. Niemniej na wariogramie podatności magnetycznej zaobserwować można było wyraźną ciągłość przestrzenną, którą charakteryzował zasięg korelacji wynoszący 300 m.



**Rys. 2.** Wariogram eksperymentalny oraz jego model dla podatności magnetycznej zmierzonej na powierzchni gleby oraz w profilu glebowym na obszarze pomiarowym w Reptach Śląskich

**Fig. 2.** Experimental variogram and its model of magnetic susceptibility measured on the soil surface and in soil profile at study area in Repty Śląskie

Dodatkowo zbadana została zmienność przestrzenna podatności magnetycznej na podstawie wartości pomierzonych tylko na określonej głębokości w profilu glebowym. Wykonano serię wariogramów dla wartości podatności magnetycznej zmierzonej na powierzchni gleby oraz zmierzonej na głębokościach 1 cm, 2 cm, ..., 20 cm. W rezultacie otrzymanych zostało 21 wariogramów, z których każdy obrazował zmienność przestrzenną podatności magnetycznej w profilu glebowym na głębokościach od 0 cm do 20 cm.

**Tabela 3.** Parametry modeli wariogramów podatności magnetycznej zmierzonej na powierzchni gleby (0 cm) oraz na głębokościach do 20 cm w profilu glebowym; w odniesieniu do zasięgów korelacji w nawiasach podano typy modelu: G – Gaussowski, S – sferyczny

**Table 3.** Parameters of variogram models of magnetic susceptibility measured on the soil surface (0 cm) and at depths down to 20 cm in soil profile. In case of correlation ranges also the type of model was given: G – Gaussian, S – spherical

Głębokość	Parametry modeli wariogramów			Głębokość	Parametry modeli wariogramów		
	efekt samorodka	zasięg	próg		efekt samorodka	zasięg	próg
0 cm	–	265 m (G)	$760 \cdot 10^{-6} \text{SI}$	11 cm	$568 \cdot 10^{-6} \text{SI}$	–	–
1 cm	–	280 m (G)	$2280 \cdot 10^{-6} \text{SI}$	12 cm	$512 \cdot 10^{-6} \text{SI}$	–	–

c.d. tab. na str. 38

c.d. tab. 3

2 cm	–	308 m (S)	$2730 \cdot 10^{-6}\text{SI}$	13 cm	$447 \cdot 10^{-6}\text{SI}$	–	–
3 cm	–	270 m (S)	$2743 \cdot 10^{-6}\text{SI}$	14 cm	$392 \cdot 10^{-6}\text{SI}$	–	–
4 cm	$1339 \cdot 10^{-6}\text{SI}$	–	–	15 cm	$393 \cdot 10^{-6}\text{SI}$	–	–
5 cm	–	270 m (S)	$1320 \cdot 10^{-6}\text{SI}$	16 cm	$442 \cdot 10^{-6}\text{SI}$	–	–
6 cm	–	485 m (S)	$1677 \cdot 10^{-6}\text{SI}$	17 cm	$474 \cdot 10^{-6}\text{SI}$	–	–
7 cm	–	417 m (S)	$1477 \cdot 10^{-6}\text{SI}$	18 cm	$471 \cdot 10^{-6}\text{SI}$	–	–
8 cm	–	453 m (S)	$1100 \cdot 10^{-6}\text{SI}$	19 cm	$491 \cdot 10^{-6}\text{SI}$	–	–
9 cm	$1055 \cdot 10^{-6}\text{SI}$	–	–	20 cm	$404 \cdot 10^{-6}\text{SI}$	–	–
10 cm	$764 \cdot 10^{-6}\text{SI}$	–	–	–	–	–	–

Do opisanía zmienności przestrzennej podatności magnetycznej mierzonej na powierzchni gleby i na głębokości 1 cm wykorzystano model Gaussowski. W pozostałych przypadkach wykorzystywany był model sferyczny. Świadczy to o tym, że podatność magnetyczną mierzoną bardzo blisko powierzchni gleby (na głębokości 0 cm i 1 cm) charakteryzują niewielkie zmiany korelacji przestrzennych dla małych odległości pomiędzy punktami pomiarowymi. Wynikać może to z tego, że przypowierzchniowa 1-centymetrowa warstwa gleby zajmowana była głównie przez poziom organiczny ściółki O<sub>l</sub>, który charakteryzuje bardzo duża zawartość diamagnetycznych substancji organicznych. W przypadku podatności magnetycznej mierzonej na większych głębokościach, od 2 cm do 8 cm, zmiany korelacji przestrzennych dla małych odległości pomiędzy punktami pomiarowymi były większe. Obserwowane było znacznie większe zmniejszenie korelacji przestrzennych w porównaniu do podatności magnetycznej mierzonej na głębokości 0 cm i 1 cm. Obserwacje takie spowodowane były tym, że na większych głębokościach w profilu glebowym występowały poziomy glebowe organiczny fermentacyjny O<sub>f</sub>, organiczny humusowy O<sub>h</sub> oraz próchniczny humusowy A<sub>h</sub>, w których zakumulowane były największe ilości zanieczyszczeń pochodzenia antropogenicznego. Na poziomach tych obserwowano także najwyższe wartości podatności magnetycznej. Wpływało to na wzrost zmienności przestrzennej podatności mierzonej na tych poziomach glebowych.

Jedynie w odniesieniu do podatności magnetycznej mierzonej na głębokościach od 0 cm do 8 cm obserwowana była wyraźna zmienność przestrzenna, pozwalająca na określenie zasięgu korelacji przestrzennych. Zasięg korelacji przestrzennych podatności magnetycznej wzrastał wraz z głębokością w profilu glebowym. Dla podatności magnetycznej mierzonej na głębokości 0 cm wynosił 265 m i zwiększał się do 485 m dla podatności magnetycznej mierzonej na głębokości 6 cm. Obserwacje takie wskazywały na to, że zmienność przestrzenna podatności magnetycznej warunkowana zanieczyszczeniem antropogenicznym zmniejszała się wraz z głębokością w profilu glebowym. Na większych głębokościach, od ok. 6 cm do 8 cm, znacznie zmniejszały się zawartości zanieczyszczeń pochodzenia antropogenicznego oraz wartości podatności magnetycznej. Zasięg korelacji przestrzennych wynosił ciągle ponad 400 m.

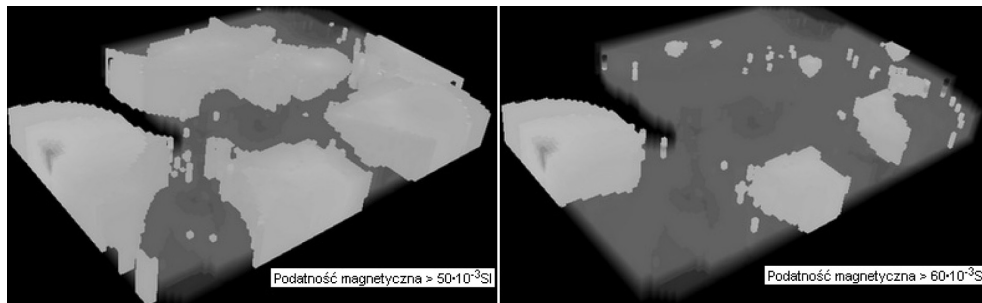
Na wariogramach podatności magnetycznej zmierzonej na większych głębokościach w profilu glebowym obserwowana była słabo widoczna zmienność przestrzenna. Wariogramy te zostały wymodelowane przy wykorzystaniu tylko czystego efektu samorodka, który zmniejszał się wraz ze wzrostem głębokości, na której mierzona była podatność magnetyczna. Związane jest z tym, że wraz ze wzrostem głębokości w profilu glebowym obserwowane były coraz mniejsze wartości podatności magnetycznej. Jedynie w przypadku wariogramów dotyczących podatności magnetycznej zmierzonej na głębokościach wynoszących od 16 cm do 19 cm obserwowany był ponowny wzrost wartości efektu samorodka. Dla tych głębokości mierzone były zwiększone wartości podatności magnetycznej, co spowodowane mogło być zwiększoną zawartością związków żelaza wypłukanych z wyższych poziomów glebowych.

Wraz ze zwiększeniem głębokości na wariogramach podatności magnetycznej obserwowany był wzrost wartości progów. Wartości maksymalne progów osiągnęte były w odniesieniu do wariogramów podatności magnetycznej zmierzonej na głębokości 3 cm. Związane jest to z tym, że na tych głębokościach zakumulowane były największe ilości zanieczyszczeń pochodzenia antropogenicznego.

Powyższe obserwacje zmienności przestrzennej podatności magnetycznej sugerować mogą wykonanie rozkładu przestrzennego podatności magnetycznej do głębokości ok. 10 cm–12 cm. Z jednej strony jest to głębokość wystarczająca do uchwycenia wartości podatności magnetycznej, które są bezpośrednio związane z zanieczyszczeniem antropogenicznym. Celowe może jednak być wykonanie rozkładu przestrzennego podatności magnetycznej do głębokości 20 cm, gdyż może to umożliwić rozróżnienie wpływu antropogenicznego od wpływu naturalnych właściwości gleb na podatność magnetyczną.

**Analiza rozkładów przestrzennych 3D podatności magnetycznej.** Na znacznej części badanego obszaru, głównie w części południowej oraz południowo-zachodniej, obserwowane były wartości podatności magnetycznej przekraczające  $50 \cdot 10^{-3}$  SI, którą można przyjąć jako wartość świadczącą o potencjalnym zanieczyszczeniu gleby metalami ciężkimi [Magiera 2005]. Zwiększone wartości podatności magnetycznej obserwowane były praktycznie w przekroju glebowym do głębokości 12 cm. Widoczne jest także, że w rejonach gdzie podatność magnetyczna przekraczała  $50 \cdot 10^{-3}$  SI na większych głębokościach w profilu glebowym, pierwsze 2 cm profilu glebowego charakteryzowały znacznie mniejsze wartości podatności magnetycznej. Wynikało to z diamagnetycznych właściwości pierwszych kilku centymetrów profilu glebowego zajmowanych przez poziom organiczny ściółki O1. W rezultacie otrzymano 21 wariogramów, z których każdy obrazował zmienności przestrzennej podatności magnetycznej na głębokościach od 0 cm do 20 cm w profilu glebowym. Obserwacje takie potwierdzają, że na badanym obszarze gleby charakteryzowało silne i wyraźne zanieczyszczenie antropogeniczne.





**Rys. 3.** Objętości gleby, gdzie podatność magnetyczna przekraczała wartości  $50 \cdot 10^{-3}$  SI oraz  $60 \cdot 10^{-3}$  SI. Odległości w głąb profilu glebowego przeskalowano pięćdziesięciokrotnie ze względu na czytelność rysunku

**Fig. 3.** Volumes of soil where magnetic susceptibility exceeded value of  $50 \cdot 10^{-3}$  SI and  $60 \cdot 10^{-3}$  SI. Distances in soil profile were multiplied by 50 to increase the readability of the figure

W północnej części badanego obszaru wartości podatności przekraczające  $50 \cdot 10^{-3}$  SI obserwowane były na większych głębokościach w profilu glebowym. Sugerować może to, że dla tej części badanego obszaru podwyższone wartości podatności magnetycznej mogły być wynikiem naturalnych właściwości gleb, a czynnik antropogeniczny miał mniejsze znaczenie [Magiera i in. 2006].

#### 4. PODSUMOWANIE

Rezultaty badań pokazały, że można w bardzo prosty i efektywny sposób dokonać integracji pomiarów podatności magnetycznej wykonywanych na powierzchni gleby i w profilu glebowym.

Stosując łącznie pomiary na powierzchni gleby i pomiary w profilu glebowym możliwe jest wykonanie rozkładów przestrzennych podatności magnetycznej w przestrzeni trójwymiarowej (3D).

Rozkłady przestrzenne 3D pozwalają na wygodniejsze i łatwiejsze wykrycie obszarów o zwiększonej podatności magnetycznej, a następnie na rozróżnienie miejsc, gdzie wzrost podatności magnetycznej gleby jest spowodowany zanieczyszczeniem antropogenicznym, od tych, gdzie wzrost podatności magnetycznej wynika z naturalnych właściwości gleb.

**Autorzy pragną podziękować dr hab. T. Magierze i prof. dr hab. inż. Z. Strzyszczeni z Instytutu Podstaw Inżynierii Środowiska PAN w Zabrze, za pomoc w pomiarach podatności magnetycznej.**

## PIŚMIENNICTWO

- DEARING J.A. 1994. Environmental Magnetic Susceptibility: Using the Bartington MS2 System, Chi Publishing. Kenilworth. UK.
- ISAAKS E.H., SRIVASTAVA R.M. 1998. Applied Geostatistics. Oxford University. New York.
- MAGIERA T. 2004. Wykorzystanie magnetometrii do oceny zanieczyszczenia gleb i osadów jeziornych. Works & Studies No 59. Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, Zabrze.
- MAGIERA T., STRZYSZCZ Z, KAPIČKAA., PETROVSKY E. 2006. Discrimination of Lithogenic and Anthropogenic Influences on Topsoil Magnetic Susceptibility in Central Europe. Geoderma: 130: 299–311.
- PANNATIER Y. 1996. Variowin, Software for Spatial Data Analysis in 2D. Springer Verlag, New York.