

**POLITECHNIKA WARSZAWSKA**

**Wydział Inżynierii Środowiska**

**ROZPRAWA DOKTORSKA**

**Mgr inż. Piotr Fabijańczyk**

**Statystyczna i geostatystyczna analiza możliwości wykorzystania  
pomiarów magnetometrycznych do oceny potencjalnego  
zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi**

Promotor

dr hab. inż. Jarosław Zawadzki – prof. PW

Warszawa, 2010

## ***Podziękowania***

*Autor pracy pragnie podziękować:*

*Promotorowi,  
za opiekę merytoryczną, za cenne uwagi i sugestie,  
za zaangażowanie, dzięki któremu możliwe było napisanie tej pracy.*

*Pracownikom Instytutu Podstaw Inżynierii Środowiska PAN w Zabrze,  
za pomoc w wykonaniu pomiarów terenowych i laboratoryjnych  
oraz za wsparcie merytoryczne w pracy.*

*Pracownikom Zakładu Informatyki i Badań Jakości Środowiska,  
za możliwość realizowania pracy doktorskiej w tym zakładzie.*

*Żonie,  
za cierpliwą pomoc w sprawdzeniu pracy.*

## **Streszczenie**

Obecnie w badaniach środowiskowych coraz częściej wykorzystuje się szybkie i łatwe do wykonania w terenie pomiary. Rezultatem takich pomiarów są wartości, które nie dają bezpośredniej informacji o badanym zjawisku, lecz są z nim silnie skorelowane. Przykładem takiej metody pomiarowej jest prezentowana w pracy metoda magnetometrii terenowej. Pomiary magnetometryczne nie dają bezpośredniej informacji na temat zawartości poszczególnych metali ciężkich w glebie. Jednak silna korelacja pomiędzy podatnością magnetyczną gleby i zawartością metali ciężkich w glebie pozwala na wyznaczanie obszarów potencjalnie zanieczyszczonych.

Dotychczasowe badania w zakresie magnetometrii terenowej poruszały głównie tematykę technik pomiarowych oraz fizycznych zależności, wiążących podatność magnetyczną gleby z zawartością zanieczyszczeń pochodzenia antropogenicznego. Wykonywano też badania wykorzystujące magnetometrię terenową do analiz zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi wokół obiektów przemysłowych, skupisk miejskich, dróg o dużym natężeniu ruchu samochodowego. Jednak liczba prac, w których stosowano zaawansowane metody statystyki przestrzennej była jak do tej pory znikoma.

W niniejszej pracy skupiono się na wykorzystaniu metod geostatystycznych w celu zwiększenia efektywności magnetometrii terenowej w określaniu obszarów potencjalnie zanieczyszczonych metalami ciężkimi. Zbadano możliwości użycia metod geostatystycznych do wytyczania sieci pomiarowych, w celu osiągnięcia zakładanej dokładności szacowanych rozkładów przestrzennych. Przeanalizowano najbardziej efektywne geostatystyczne metody integracji danych magnetometrycznych i chemicznych. Określono także miary na podstawie pomiarów podatności magnetycznej, które mogą być pomocne w określaniu poziomu zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi przy wykorzystaniu geostatystycznych metod wskaźnikowych.

Rezultaty przeprowadzonych badań pokazały, że metody geostatystyczne mogą w znacznym stopniu zwiększyć dokładność i jednocześnie zredukować koszty zastosowania metody magnetometrii terenowej do oceny potencjalnego zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi. Możliwe zastosowania metod geostatystycznych w magnetometrii terenowej zilustrowano wykorzystując dane pomiarowe pochodzące z wybranych obszarów pomiarowych, położonych na terenie Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego.

## **Abstract**

At the moment, the number of applications of fast and easy-to-perform measuring methods in environmental studies is increasing rapidly. The results of such measurements are not giving the direct information about studied phenomenon, but are strongly correlated with it. Field magnetometry that was used in this work is an example of such measuring method. Magnetometric measurements do not provide direct information about the concentration of particular heavy metals in soil. However, strong correlation between soil magnetic susceptibility and the concentration of heavy metals in soil allow estimating the extent of an area potentially polluted with heavy metals.

Since now, studies related to field magnetometry were mostly focused on measuring techniques or physical relations between soil magnetic susceptibility and the concentration of pollutants of anthropogenic origin. Field magnetometry was also used for analyses of soil pollution with heavy metals in the vicinity of industrial objects, major cities or roads with heavy traffic. However, the number of studies that make use of advanced geostatistical methods was so far very limited.

The aim of this work was to make use of geostatistical methods in order to improve the efficiency of field magnetometry in estimations of the extent of areas potentially polluted with heavy metals. The analyses included possible applications of geostatistical methods in determining the sampling grids in order to achieve the assumed precision of spatial distributions. Additionally, the most efficient geostatistical methods for integration of magnetometric and chemical data were analyzed. Furthermore, some magnetometric measures were determined that might be used to estimate the level of soil pollution with heavy metals using geostatistical indicator methods.

The results of analyses showed that geostatistical methods can significantly increase the precision and simultaneously reduce the costs of application of field magnetometry to an estimation of soil pollution with heavy metals. Possible use of geostatistical methods in field magnetometry was illustrated using several study cases based on measurements collected from chosen study areas.

## Spis treści

---

<b>1</b>	<b>Wprowadzenie.....</b>	<b>8</b>
1.1	Cel i zakres pracy .....	9
1.2	Teza pracy .....	10
1.3	Zakres badań .....	10
<b>2</b>	<b>Aktualny stan wiedzy w zakresie magnetometrii terenowej .....</b>	<b>13</b>
2.1	Definicja podatności magnetycznej .....	13
2.2	Badania podatności magnetycznej i składu pyłów przemysłowych .....	13
2.3	Badania związków podatności magnetycznej z zawartością metali ciężkich w glebie .....	15
2.4	Rozwój metod pomiarowych podatności magnetycznej gleby .....	17
2.5	Badania rozkładów podatności magnetycznej w profilu glebowym .....	18
2.6	Badania nad wykorzystaniem magnetometrii do określania obszarów potencjalnie zanieczyszczonych .....	19
<b>3</b>	<b>Ogólne metody badawcze wykorzystane w pracy .....</b>	<b>22</b>
3.1	Metody geostatystyczne .....	22
3.1.1	<i>Jednorodność w geostatystyce.....</i>	<i>23</i>
3.1.2	<i>Semiwariancja.....</i>	<i>24</i>
3.1.3	<i>Semiwariancja krzyżowa .....</i>	<i>25</i>
3.1.4	<i>Modele wariogramów i wariogramów krzyżowych .....</i>	<i>25</i>
3.1.5	<i>Inne geostatystyczne miary korelacji przestrzennych .....</i>	<i>28</i>
3.1.6	<i>Kriging .....</i>	<i>29</i>
3.1.7	<i>Kriging prosty .....</i>	<i>29</i>
3.1.8	<i>Kriging zwykły.....</i>	<i>31</i>
3.1.9	<i>Kriging wskaźnikowy.....</i>	<i>32</i>
3.1.10	<i>Kokriging .....</i>	<i>32</i>
3.1.11	<i>Liniowy model koregionalizacji .....</i>	<i>33</i>
3.1.12	<i>Metoda Co_Est.....</i>	<i>34</i>
3.1.13	<i>Błędy estymacji.....</i>	<i>35</i>
3.2	Pomiary terenowe i laboratoryjne.....	35
3.2.1	<i>Pomiary zawartości metali ciężkich w glebie.....</i>	<i>36</i>
3.2.2	<i>Pomiary podatności magnetycznej gleby miernikiem MS2D Bartington.....</i>	<i>36</i>
3.2.3	<i>Pomiary podatności magnetycznej gleby miernikiem MS2F Bartington .....</i>	<i>38</i>
3.2.4	<i>Pomiary podatności magnetycznej gleby miernikiem MS2C Bartington .....</i>	<i>39</i>
3.2.5	<i>Pomiary podatności magnetycznej gleby miernikiem MS2B Bartington .....</i>	<i>40</i>
3.2.6	<i>Pomiary podatności magnetycznej gleby miernikiem SM-30 .....</i>	<i>41</i>
3.2.7	<i>Pomiary podatności magnetycznej gleby miernikiem SM-400 .....</i>	<i>41</i>
<b>4</b>	<b>Sieci pomiarowe w magnetometrii terenowej .....</b>	<b>43</b>
4.1	Badania zmienności przestrzennej podatności magnetycznej.....	44
4.1.1	<i>Wpływ podłoża glebowego na zmienność przestrzenną podatności magnetycznej.....</i>	<i>44</i>
4.1.2	<i>Wpływ lasów różnego typu na zmienność przestrzenną podatności magnetycznej.....</i>	<i>53</i>
4.1.3	<i>Wpływ wykorzystania terenu na zmienność przestrzenną podatności magnetycznej.....</i>	<i>58</i>
4.1.4	<i>Wpływ utworów dolomitowych na zmienność przestrzenną podatności magnetycznej .....</i>	<i>61</i>

4.2	Dobór sieci pomiarowych w magnetometrii terenowej .....	68
4.2.1	<i>Charakterystyczne cechy zmienności przestrzennej podatności magnetycznej</i> .....	68
4.2.2	<i>Dobór średniej odległości pomiędzy punktami pomiarowymi podatności magnetycznej</i> .....	69
4.3	Podsumowanie.....	72
<b>5</b>	<b>Wstęp do integracji danych w magnetometrii terenowej .....</b>	<b>74</b>
5.1	Korelacje pomiędzy podatnością magnetyczną różnych poziomów glebowych .....	74
5.2	Miąższość poziomu organicznego gleby a podatność magnetyczna mierzona miernikiem MS2D .....	78
5.3	Weryfikacja wyników .....	80
5.4	Podsumowanie.....	87
<b>6</b>	<b>Określenie najodpowiedniejszych miar do integracji pomiarów magnetometrycznych .....</b>	<b>89</b>
6.1	Korelacje pomiędzy miarami magnetometrycznymi a podatnością magnetyczną mierzoną miernikiem MS2D .....	89
6.2	Krzyżowe korelacje przestrzenne pomiędzy miarami magnetometrycznymi a podatnością magnetyczną mierzoną miernikiem MS2D .....	91
6.3	Krzyżowe korelacje przestrzenne pomiędzy miarami magnetometrycznymi a zawartością metali ciężkich w glebie .....	93
6.4	Podsumowanie.....	95
<b>7</b>	<b>Integracja danych magnetometrycznych w przestrzeni dwuwymiarowej .....</b>	<b>97</b>
7.1	Wykorzystane pomiary magnetometryczne.....	97
7.2	Integracja podatności magnetycznej na różnych głębokościach w profilu glebowym.....	97
7.3	Integracja pomiarów wykonywanych miernikami MS2D Bartington i SM-400 .....	101
7.4	Podsumowanie korzyści integracji danych w przestrzeni dwuwymiarowej .....	104
<b>8</b>	<b>Integracja danych magnetometrycznych w przestrzeni trójwymiarowej .....</b>	<b>106</b>
8.1	Wykorzystane pomiary magnetometryczne.....	106
8.2	Wykorzystane metody integracji danych.....	107
8.3	Przykład integracji danych magnetometrycznych na obszarze <i>Repty Śląskie</i> .....	108
8.3.1	<i>Analiza wstępna danych pomiarowych</i> .....	108
8.3.2	<i>Badania zmienności przestrzennej podatności magnetycznej w profilu glebowym</i> .....	111
8.3.3	<i>Analiza trójwymiarowych rozkładów przestrzennych podatności magnetycznej</i> .....	115
8.3.4	<i>Weryfikacja wyników – pomiary zawartości metali ciężkich w glebie</i> .....	116
8.4	Podsumowanie.....	119
<b>9</b>	<b>Integracja danych magnetometrycznych i chemicznych .....</b>	<b>121</b>
9.1	Integracja danych magnetometrycznych i chemicznych metodą Co_Est .....	121
9.1.1	<i>Wykorzystane pomiary magnetometryczne i chemiczne</i> .....	122
9.1.2	<i>Przykład integracji danych na obszarze Miechowice</i> .....	122
9.2	Podsumowanie.....	124
<b>10</b>	<b>Szacowanie zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi na podstawie pomiarów magnetometrycznych .....</b>	<b>125</b>
10.1	Wykorzystane pomiary magnetometryczne.....	125
10.2	Stopień zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi na badanym obszarze <i>Lasy Błędowskie</i> .....	125

10.3	Określenie wartości progowych dla wybranych miar magnetometrycznych .....	127
10.4	Weryfikacja wyników .....	132
10.5	Podsumowanie.....	135
<b>11</b>	<b>Podsumowanie wyników pracy i wnioski końcowe .....</b>	<b>136</b>
11.1	Podsumowanie i wnioski .....	136
11.2	Możliwości dalszych badań.....	138
	<b>Bibliografia .....</b>	<b>140</b>
	<b>Załącznik nr 1 – Obszary pomiarowe .....</b>	<b>150</b>
Z1.1.	Używane oznaczenia powierzchni i serii pomiarowych .....	150
Z1.2.	Obszary pomiarowe Województwo Śląskie i GOP .....	151
Z1.3.	Obszar pomiarowy <i>Mikołów</i> .....	153
Z1.4.	Obszar pomiarowy <i>Makoszów</i> .....	154
Z1.5.	Obszar pomiarowy <i>Miechowice</i> .....	155
Z1.6.	Obszar pomiarowy <i>Repty Śląskie</i> .....	156
Z1.7.	Obszary pomiarowe Rudziniec Las Bukowy, Rudziniec Las Sosnowy, Rudziniec Pole Pszenicy.....	157
Z1.8.	Obszar pomiarowy <i>Lasy Błędowskie</i> .....	159
Z1.9.	Obszar pomiarowy <i>Szczejkowice</i> .....	160
	<b>Załącznik nr 2 – Standardy jakości gleb obowiązujące w Polsce .....</b>	<b>161</b>
	<b>Załącznik nr 3 – Używane oznaczenia.....</b>	<b>162</b>

# 1 Wprowadzenie

Obecnie, w badaniach środowiskowych coraz częściej wykorzystuje się szybkie i łatwe do użycia w terenie metody pomiarowe. Rezultatem takich pomiarów są wartości, które nie dają bezpośredniej informacji o badanym zjawisku, są natomiast z nim silnie skorelowane. Przykładem tego typu metody pomiarowej jest opisana w niniejszej pracy metoda magnetometryczna. Pomiar magnetometryczny nie daje bezpośredniej informacji na temat zawartości poszczególnych metali ciężkich w glebie. Jednak silna korelacja pomiędzy podatnością magnetyczną gleby i zawartością metali ciężkich w glebie pozwala na wyznaczanie obszarów potencjalnie zanieczyszczonych. Pomimo że tego typu proste metody pomiarowe są często czułe na wpływ czynników pomiarowych i środowiskowych, które mogą utrudniać interpretację wyników, są często stosowane. Ich rosnąca popularność jest spowodowana wysokimi kosztami monitoringu środowiska. W celu wykorzystania zalet prostych metod pomiarowych, przy jednoczesnym zminimalizowaniu ich ograniczeń, konieczne jest stosowanie jak najlepszych metod do analizowania wyników pomiarów terenowych.

W badaniach związanych z ochroną i monitoringiem środowiska, w tym środowiska glebowego, obserwuje się ciągły wzrost zainteresowania geostatystyką. W literaturze jest dostępna coraz większa liczba prac, w których do badania środowiska wykorzystywano metody geostatystyczne. We wrześniu 2007 ukazała się praca „*A Practical Guide to Geostatistical Mapping of Environmental Variables*”, opublikowana przez Institute of Environment and Sustainability, który dostarcza wsparcia naukowo-technicznego Komisji Europejskiej w zakresie zrównoważonego rozwoju i ochrony środowiska. W niniejszej pracy przedstawiono przegląd metod geostatystycznych oraz możliwości ich wykorzystania w monitoringu środowiska oraz w przeprowadzaniu analiz i wnioskowaniu na temat stopnia zanieczyszczenia. Zwrócono uwagę na znaczenie korelacji przestrzennych, modelowanie zmienności przestrzennej, możliwości zaawansowanych geostatystycznych metod interpolacji przestrzennej oraz integracji metod geostatystycznych z technikami GIS. Rosnące zainteresowanie geostatystyką potwierdza słusność prowadzenia prac nad wdrażaniem metod geostatystycznych do obowiązujących obecnie procedur monitoringowych.

W obowiązujących obecnie w Polsce przepisach, które dotyczą identyfikacji obszarów zanieczyszczonych wymieniono kilka etapów postępowania. Szczególnie istotne są te obejmujące wstępną ocenę potencjalnych źródeł zanieczyszczeń oraz identyfikację



obszarów, na których mogły zostać przekroczone standardy jakości gleby. Dotychczas, wszelkie analizy mające na celu wstępne rozpoznanie badanego obszaru, opierały się na klasycznych metodach chemicznych. Niemniej, zalety magnetometrii terenowej połączone z zaletami metod geostatystycznych mogą znacznie uprościć ten proces oraz pozwolić na zredukowanie kosztów badań terenowych.

Dotychczasowe badania w zakresie magnetometrii terenowej skupiały się głównie na rozwoju terenowych i laboratoryjnych technik pomiarowych (*Dearing i inni, 1996; Boyko i inni, 2004; Gettacceca i inni, 2004; D'Emilio i inni, 2007*) oraz na badaniu fizycznych zależności, wiążących podatność magnetyczną gleby z zawartością zanieczyszczeń pochodzenia antropogenicznego (*Fialova i inni, 2006*), w tym metali ciężkich (*Georgeaud i inni, 1997; Desenfant i inni, 2002; Jordanova i inni, 2003; Maier i inni, 2005*). W literaturze są też dostępne prace, w których przedstawiono wykorzystanie magnetometrii terenowej do analiz zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi (*Kapička i Petrovsky, 1997; Kapička i inni, 1999, 2003; Hanesch i Scholger, 2002; Hanesch i inni, 2003; Knab i inni, 2006; Magiera i inni, 2006; 2007*). Jednakże liczba publikacji, w których do opracowywania wyników pomiarów magnetometrycznych wykorzystano zaawansowane metody statystyki przestrzennej, była jak do tej pory znikoma.

W niniejszej pracy skoncentrowano się na wykorzystaniu metod geostatystycznych w magnetometrii terenowej, w celu zwiększenia efektywności szacowania obszarów potencjalnie zanieczyszczonych metalami ciężkimi. W szczególności skupiono się na opracowaniu danych pomiarowych, integracji danych pomiarowych magnetometrycznych i chemicznych oraz na metodach wnioskowania o zanieczyszczeniu gleby na podstawie zebranego materiału pomiarowego.

## **1.1 Cel i zakres pracy**

Ogólnym celem niniejszej pracy było zaprezentowanie wykorzystania możliwości metod geostatystycznych do zwiększenia efektywności metody magnetometrycznej. W szczególności zbadano, w jakim stopniu metody geostatystyczne mogą pomóc w zminimalizowaniu ograniczeń metody magnetometrycznej i zwiększeniu precyzji szacowania potencjalnego zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi.

Szczegółowe cele badawcze obejmowały:

- i. określenie sposobu wykorzystania metod geostatystycznych w magnetometrii terenowej do wytyczania sieci pomiarowych, w celu osiągnięcia zakładanej dokładności szacowanych rozkładów przestrzennych,
- ii. określenie czynników pomiarowych, które w istotny sposób mogą utrudniać lub zmniejszać efektywność integracji danych pomiarowych w magnetometrii terenowej,
- iii. określenie najbardziej odpowiednich, geostatystycznych metod integracji danych magnetometrycznych oraz chemicznych,
- iv. określenie miar wyznaczanych na podstawie pomiarów podatności magnetycznej, które mogą być użyte do określania poziomu zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi przy wykorzystaniu geostatystycznych metod wskaźnikowych.

## **1.2 Teza pracy**

Teza niniejszej pracy została sformułowana następująco: metody geostatystyczne stanowią narzędzie, które może znacząco zwiększyć dokładność oraz jednocześnie, w istotnym stopniu zredukować koszty zastosowania metody magnetometrii terenowej do oceny potencjalnego zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi.

## **1.3 Zakres badań**

W niniejszej pracy nie była poruszana tematyka dotycząca technik pomiarowych oraz metod wykonywania terenowych pomiarów podatności magnetycznej. Zagadnienia te były już w wyczerpujący sposób rozpatrywane w literaturze (*Dearing i inni, 1996; Boyko i inni, 2004; Gettacceca i inni, 2004; D'Emilio i inni, 2007*). Postawione cele badawcze były związane głównie z zagadnieniami dotyczącymi efektywnego zbierania informacji pomiarowej oraz późniejszego wnioskowania na temat potencjalnego zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi. W szczególności poruszono następujące elementy magnetometrii terenowej:

- i. planowanie pomiarów magnetometrycznych i chemicznych z uwzględnieniem zmienności przestrzennej,
- ii. przygotowanie zebranej informacji pomiarowej do analiz geostatystycznych,
- iii. integracja danych pomiarowych magnetometrycznych i chemicznych,

iv. wyznaczanie rozkładów przestrzennych podatności magnetycznej i określanie obszarów potencjalnie zanieczyszczonych metalami ciężkimi.

Pomiary terenowe podatności magnetycznej gleb oraz zawartości poszczególnych metali ciężkich były prowadzone na terenie Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego (GOP). Jest to duża konurbacja miejska, w obrębie której zlokalizowane są rozległe skupiska miejskie, parki oraz kompleksy leśne. Silna presja antropogeniczna na tym obszarze, jest związana z obecnością różnorodnych ośrodków przemysłowych. Na terenie GOP zlokalizowano kilkanaście obszarów pomiarowych, których dokładniejszy opis został zawarty w Załączniku nr 1.

Pomiary podatności magnetycznej oraz pomiary zawartości metali ciężkich w glebie dotyczyły górnej warstwy gleby, do głębokości około 30 cm w profilu glebowym. Głębokość taka była wystarczająca, aby objąć następujące podpoziomy (*Zawadzki, 1999*): organiczny ściółki O1, organiczny fermentacyjny Of, organiczny humusowy Oh oraz próchniczny humusowy Ah. Wybrana część profilu glebowego była także wystarczająca ze względu na metodę magnetometryczną, gdyż jak wynika z dotychczasowych badań, głównie w tych poziomach glebowych są akumulowane metale ciężkie pochodzenia antropogenicznego (*Hanesch i inni, 2005; Magiera i inni, 2006*). Dodatkowo, przyrządy pomiarowe wykorzystywane do pomiarów podatności magnetycznej gleby charakteryzowały się zasięgiem penetracji nie większym niż 30 cm (*Dearing, 1994; Lecoanet i inni, 1999*) w profilu glebowym (szczegółowe parametry przyrządów pomiarowych zostały podane w rozdziale poświęconym metodom badawczym).

Pomiary terenowe podatności magnetycznej były wykonywane głównie na obszarach leśnych lub w przypadku terenów miejskich, na obszarach parków. Pomiary podatności magnetycznej wykonywane na terenach uprawnych oraz otwartych, takich jak ugory i łąki, zostały wykorzystane tylko w ograniczonym stopniu i tylko w niektórych elementach pracy. Postępowanie takie było uzasadnione wynikami dotychczasowych badań, w których stwierdzono, że na terenach uprawnych pomiary magnetometryczne mogą być mniej użyteczne w ocenie potencjalnego zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi (*Magiera i Zawadzki, 2006*). Wynika to z silnego zniekształcenia lub nawet zniszczenia profilu glebowego, zwłaszcza najwyższych położonych poziomów glebowych (*Magiera i inni, 2006*), co jest efektem działań rolniczych.

Pomiary wykonywane na terenach leśnych w większości przypadków dotyczyły lasów iglastych bądź też lasów iglastych z domieszką drzew liściastych. Pomiary przeprowadzane na terenach lasów liściastych stanowiły jedynie około 20% wszystkich pomiarów

wykorzystanych w niniejszej pracy, ponieważ w badanym rejonie GOP dominowały głównie lasy iglaste lub z przewagą drzewostanu iglastego.

Pomiary podatności magnetycznej na powierzchni gleby były wykonywane miernikami MS Bartington (*Dearing, 1994*), które są jednymi z najpopularniejszych mierników, wykorzystywanych w monitoringu zanieczyszczenia gleb. Pomimo że podatność magnetyczna gleby nie zależy od użytego przyrządu pomiarowego, to jednak jest możliwe, że wartości podatności magnetycznej, mierzone na powierzchni gleby miernikami innego typu, mogą się nieznacznie różnić. Znacznie różniące się zasięgi penetracji w profilu glebowym, mogą powodować, że zmierzona zostanie podatności magnetycznej z innej części profilu glebowego.

## 2 Aktualny stan wiedzy w zakresie magnetometrii terenowej

### 2.1 Definicja podatności magnetycznej

W pracy zostały wykorzystane pomiary podatności magnetycznej gleby wyrażane w dwóch jednostkach. Pomiary terenowe podatności magnetycznej wyrażano w jednostkach bezwymiarowych, a podatność taka była określana mianem objętościowej podatności magnetycznej i oznaczana symbolem  $\kappa$  (ang. *volume magnetic susceptibility*) (Thompson i Oldfield, 1986; Kapička i inni, 1997). Objętościowa podatność magnetyczna jest bezwymiarowym współczynnikiem, określającym proporcję namagnesowania do natężenia pola magnetycznego. W zależności od właściwości magnetycznych substancji, objętościowa podatność magnetyczna może przyjmować różne wartości. Dla substancji o charakterze diamagnetycznym wartości podatności magnetycznej są mniejsze od zera, natomiast dla substancji o charakterze paramagnetycznym i ferromagnetycznym wartości podatności są większe od zera.

W przypadku pomiarów laboratoryjnych wykonywanych na pobranych w terenie próbkach glebowych była mierzona masowa podatność magnetyczna (Kapička i inni, 1997), oznaczana symbolem  $\chi$  (ang. *specific magnetic susceptibility*, *specific mass magnetic susceptibility*). W odróżnieniu od bezwymiarowej objętościowej podatności magnetycznej, podatność masowa odnosi się do pewnej masy próbki glebowej, co pozwala na zniwelowanie wpływu gęstości gleby na mierzoną wartość podatności. Masowa podatność magnetyczna gleby wyrażana była w  $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ .

W dalszej części pracy, w celu uproszczenia zapisu, zarówno w przypadku podatności magnetycznej objętościowej, jak i masowej, używano pojęcia *podatność magnetyczna*. Jedynie w przypadkach, gdy było to niezbędne, stosowano pełne nazwy konkretnych podatności magnetycznych.

### 2.2 Badania podatności magnetycznej i składu pyłów przemysłowych

Jednym ze składników pyłów powstających podczas procesów przemysłowych, jak i spalania paliw stałych, są magnetyczne tlenki żelaza (Strzyszczyk i Magiera, 1993; 2001; Magiera i Strzyszczyk 1996; Magiera i inni 1998; Strzyszczyk 1999). W wyniku tego, opad pyłów pochodzenia antropogenicznego na powierzchnię gleby powoduje zmiany podatności magnetycznej górnych poziomów glebowych (Strzyszczyk i inni, 1996; Maier i Scholger, 2004). Obszary, gdzie obserwuje się podwyższone wartości podatności magnetycznej, są więc także

potencjalnie zanieczyszczone pyłami przemysłowymi, w tym metalami ciężkimi. Wykrywaniem obszarów o podwyższonej podatności magnetycznej zajmuje się magnetometria terenowa.

Pierwsze badania dotyczące tematyki magnetometrii terenowej były wykonywane w latach siedemdziesiątych zeszłego wieku. Rezultaty tych badań (*Doyle i inni, 1976*) potwierdziły antropogeniczne pochodzenie cząstek magnetycznych, znalezionych w osadach dennych Zatoki Meksykańskiej. W badaniach przeprowadzonych w późniejszym okresie, stwierdzono podwyższoną wartość podatności magnetycznej w górnych poziomach glebowych, wokół ośrodków przemysłowych środkowej i północnej Anglii (*Thompson i Oldfield, 1986; Culbard i inni, 1988; Robertson i inni, 2003*). Wyniki tych badań sugerowały istnienie wyraźnego związku pomiędzy wzrostem podatności magnetycznej gleb i emisjami przemysłowymi.

W Polsce badania dotyczące podatności magnetycznej oraz składu pyłów przemysłowych prowadzono głównie w Instytucie Podstaw Inżynierii Środowiska (IPIŚ) PAN w Zabrze (*Strzyszczyk i Magiera, 1993, 1996, 1998, 2001, 2006; Strzyszczyk i inni, 1994, 1996, 2005; Magiera i inni, 1998, 2006, 2007; Strzyszczyk 1999*). Badania nad podatnością magnetyczną gleb i pyłów przemysłowych rozpoczęto pod koniec lat osiemdziesiątych. Obecność cząstek magnetycznych stwierdzono w pyłach pochodzących z przemysłu metalurgicznego oraz cementowego (*Strzyszczyk, 1995*). Jednak, jak wykazują wyniki badań, pyły tego pochodzenia oddziałują na środowisko glebowe głównie w bliskim sąsiedztwie punktów emisji.

Jak pokazały wyniki badań przeprowadzonych w IPIŚ (*Strzyszczyk, 1995, 1999; Strzyszczyk i inni, 1998*), największe ilości cząstek magnetycznych pochodzenia antropogenicznego jest zawarte w popiołach lotnych, powstających w wyniku spalania paliw stałych. Emisja tego typu charakteryzuje się dużym zasięgiem oddziaływania na środowisko glebowe, gdyż popioły lotne, emitowane do atmosfery z wysokich kominów elektrowni, mogą być transportowane na duże odległości.

W wielu krajach, w tym w Polsce, spalanie węgla jest ciągle jeszcze głównym źródłem energii. Dodatkowo, duże ilości węgla są spalane w małych kotłowniach miejskich i zakładowych oraz paleniskach domowych (tzw. niska emisja). Z tego względu, cząstki magnetyczne pochodzenia antropogenicznego mogą być obecne nawet w glebach terenów znacznie oddalonych od głównych punktów emisji zanieczyszczeń.

Wyraźne magnetyczne właściwości popiołów pochodzących z przemysłu energetycznego wynikają głównie z zawartości związków żelaza w węglu kamiennym i brunatnym.

Żelazo jest zawarte w węglu głównie w siarczku tego metalu, które w procesie spalania są przekształcane w magnetyczne tlenki żelaza, głównie magnetyt i maghemit. Wyniki badań (*Flanders, 1994*) pokazują, że wzrost zawartości siarczku w węglu o 1% wagowy, powoduje wzrost zawartości tlenków żelaza w popiele o 7%.

### **2.3 Badania związków podatności magnetycznej z zawartością metali ciężkich w glebie**

Do tej pory przeprowadzono wiele badań popiołów lotnych pochodzących z elektrowni węglowych (*Hulett i inni, 1980; Pacyna, 1986; Magiera i inni, 1998; Strzyszc i Magiera, 2000; Ferdyn i Strzyszc, 2002; Spiteri i inni, 2005*). Wyniki tych badań potwierdziły wysoką zawartość metali ciężkich w popiołach lotnych. Ponadto, rezultaty pokazały, że większość metali ciężkich (Pb, Zn, Cd, V, Cr, Co, Ni, Cu) w popiołach lotnych jest związana z minerałami magnetycznymi. Powstające podczas spalania węgla w wysokich temperaturach, cząstki magnetytu i ferrytów posiadają strukturę krystalograficzną, pozwalającą na wprowadzenie w jej obręb licznych pierwiastków, które w środowisku glebowym mogą być potencjalnie niebezpieczne dla roślin, zwierząt i ludzi.

Geochemiczne badania popiołów lotnych dowiodły, że metale ciężkie mogą być również zaadsorbowane na powierzchni cząstek. Sytuację taką obserwowano szczególnie w przypadku najdrobniejszej frakcji popiołów lotnych, o bardzo rozwiniętej powierzchni czynnej, która była wzbogacona w takie metale jak Cr, Mn, Pb, V i Zn. Metale ciężkie, związane na powierzchni cząstek popiołów jedynie siłami adsorpcji, mogą być szczególnie łatwo uruchamiane w glebie, zwłaszcza w kwaśnym odczynie, co może stanowić poważne niebezpieczeństwo dla środowiska glebowego (*Krishnan i inni, 1994*). Postępujące zakwaszanie gleb, związane z emisją SO<sub>2</sub> i kwaśnymi deszczami, może być elementem przyspieszającym uwalnianie metali ciężkich.

Badania nad związkiem pomiędzy podatnością magnetyczną pyłów przemysłowych i zawartością metali ciężkich zostały zapoczątkowane w latach osiemdziesiątych zeszłego wieku. Wyniki licznych badań wykazały istnienie liniowej zależności pomiędzy zawartością cząstek magnetycznych, a zawartością Cu, Fe, Pb i Zn w pyłach miejskich (*Heller i inni, 1998; Strzyszc i inni, 1996; Magiera, 2004; Wang i Qin, 2005*). Wyniki powyższych badań przyczyniły się w znacznym stopniu do zapoczątkowania prac nad magnetometrią terenową oraz wykorzystaniem tej metody do oceny potencjalnego zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi. Zbadane zależności korelacyjne pozwoliły przypuszczać, że jeśli cząstki

magnetyczne oraz znaczna część metali ciężkich pochodzą z tych samych punktów emisji, to jest możliwe wykorzystanie cząstek magnetycznych jako wskaźnika potencjalnego zanieczyszczenia gleb.

Badania prowadzone w Polsce przez IPIŚ w Zabrze (*Strzyszcz, 1993*) potwierdziły, że zależność pomiędzy wartością podatności magnetycznej, a zawartością metali ciężkich w pyłach przemysłowych oraz glebach leśnych rejonów przemysłowych, była bardzo wysoka. Na terenie anomalii magnetyczno-geochemicznych województwa śląskiego obserwowano bardzo wysokie współczynniki korelacji liniowej Pearsona pomiędzy podatnością magnetyczną gleb, a wybranymi parametrami związanymi z emisją pyłów przemysłowych. Podatność magnetyczna gleby w największym stopniu była skorelowana z całkowitą emisją pyłów oraz emisją pyłów energetycznych i metalurgicznych, dla których współczynnik korelacji liniowej Pearsona wynosił około 0,90. Najślabiej skorelowana z podatnością magnetyczną gleby była emisja pyłów cementowych, dla której współczynnik korelacji liniowej Pearsona wynosił 0,37. Wyniki badań wykazały także dużą zależność pomiędzy opadem żelaza, cynku, kadmu i ołowiu na powierzchnię gleby, a podatnością magnetyczną (*Strzyszcz, 1993; Strzyszcz i Magiera, 1998*).

Obserwowano także silne korelacje pomiędzy zawartością metali ciężkich w glebie i podatnością magnetyczną gleby. Przykładowo, na terenie województw śląskiego i części opolskiego, gdzie opad pyłu przekraczał  $50 \text{ g/m}^2$ , współczynniki korelacji Pearsona pomiędzy wartością podatności magnetycznej gleb, a zawartością w niej Pb wynosiły od 0,70 do 0,90. Jednocześnie zawartość Pb rozpuszczalnego w 2M  $\text{HNO}_3$  często przekraczała wartość graniczną  $50 \text{ mg/kg}$  (*Strzyszcz i Magiera, 1998*).

Dotychczasowe badania zależności pomiędzy podatnością magnetyczną, a parametrami emisji i zawartością metali ciężkich sprowadzały się głównie do wykorzystania narzędzi statystyki klasycznej, regresji i wyliczania współczynnika korelacji liniowej Pearsona. Metody te są przeznaczone do badań klasycznych zmiennych losowych, które są niezależne od współrzędnych położenia na badanym obszarze. W sytuacjach, gdy wymiar przestrzenny odgrywa istotną rolę w interpretacji otrzymanych wyników, korzystanie z tradycyjnych miar statystycznych może prowadzić do zbytich uproszczeń lub nawet niepełnych wniosków. Wykorzystanie w dotychczasowych badaniach niemal wyłącznie tradycyjnych metod statystycznych nie pozwoliło na wyznaczenie istotnych parametrów dotyczących magnetometrii terenowej, na przykład korelacji przestrzennych pomiędzy podatnością magnetyczną, a zanieczyszczeniami antropogenicznymi. Liczba prac, w których



wykorzystano zaawansowane metody geostatystyczne do badań korelacji przestrzennych podatności magnetycznej gleby, jest jak do tej pory znikoma.

## **2.4 Rozwój metod pomiarowych podatności magnetycznej gleby**

W latach 2000 – 2003, w trakcie realizacji międzynarodowego projektu MAGPROX, opracowano ogólne zasady magnetometrii terenowej oraz procedury pomiarowe, stosowane na obszarach leśnych (*Schibler i inni, 2002*). Ze względu na znaczną rozległość obszaru badań, obejmującego cztery kraje Europy Środkowej: Polskę, Czechy, Niemcy i Austrię, przyjęto 10-kilometrową siatkę pomiarową. Jednocześnie, ze względu na niejednolite rozmieszczenie obszarów leśnych na badanym obszarze, dopuszczalno znaczne, dochodzące do 20%, odchylenia od sieci regularnej. Na obszarach, na których były obserwowane anomalie magnetyczne, zwiększano gęstość sieci pomiarowej, uzyskując dokładniejsze mapy rozkładu anomalii. Nie zostały jednak opracowane szczegółowe sposoby wyznaczania optymalnej sieci pomiarowej. Ponadto, w dotychczasowych pracach nie wykorzystywano badań zmienności przestrzennej podatności magnetometrycznej do planowania sieci pomiarowych.

Przeprowadzono także badania porównawcze rezultatów pomiarów podatności magnetycznej pomierzonej różnymi przyrządami. Rezultaty badań potwierdziły wysoką zgodność takich pomiarów. Wykonane zostały także badania porównawcze pomiarów terenowych objętościowej podatności magnetycznej z pomiarami laboratoryjnymi masowej podatności magnetycznej pobranych próbek glebowych. Wyniki prac wykazały istnienie silnej korelacji pomiędzy rozkładami przestrzennymi podatności magnetycznej, które wykonano na podstawie pomiarów podatności objętościowej oraz masowej (*Kapička i inni, 1997*).

Prowadzono także badania, mające na celu odróżnianie anomalii magnetycznych, wynikających z naturalnych właściwości gleb, od spowodowanych czynnikami antropogenicznymi. W tym celu, oprócz pomiarów podatności magnetycznej gleby wykorzystywano także inne rodzaje danych, takie jak: wielkość opadu pyłów na powierzchnię gleby, odległość od punktów emisji, dane na temat przeważających kierunków wiatrów oraz dane dotyczące ukształtowania terenu (*Maier i Scholger, 2004*). Badania pokazały, że dominującymi czynnikami, które warunkują zmienność podatności na badanym obszarze, są: presja antropogeniczna, czynniki geologiczne oraz sposób wykorzystania terenu. Drobne zmienności typu gleby oraz warunków glebowych na badanym

obszarze nie były czynnikami dominującymi (*Hanesch i inni, 2001*). Pomimo że w badaniach tych, oprócz pomiarów podatności magnetycznej wykonywano pomiary innych wielkości, nie wykorzystano możliwości geostatystycznej integracji danych.

## **2.5 Badania rozkładów podatności magnetycznej w profilu glebowym**

Istotnym etapem w rozwoju magnetometrii terenowej były badania nad rozkładem podatności magnetycznej w profilu glebowym. Liczne badania (*Spitieri i inni, 2005; Magiera i inni, 2006; Fialova i inni, 2006*), wykorzystujące pomiary magnetometryczne w profilu glebowym potwierdziły, że maksymalne wartości podatności magnetycznej, spowodowane akumulacją zanieczyszczeń pyłowych, są obserwowane w profilu glebowym na głębokości od około 3 do 4 cm. Najwyższe wartości podatności obserwowano dla podpoziomów glebowych organicznego fermentacyjnego Of i organicznego humusowego Oh. Sytuacja taka była typowa dla gleb położonych na terenach leśnych. W przypadku gleb położonych na terenach otwartych, wyniki badań pokazały, że krzywe podatności magnetycznej w profilu glebowym mają znacznie łagodniejszy przebieg, a maksymalne wartości obserwowane są na głębokościach dochodzących nawet 20 cm.

Przeprowadzone badania (*Magiera i inni, 2006*) wykazały, że na terenach objętych badaniami projektu MAGPROX można było wyróżnić siedem typowych przebiegów podatności magnetycznej w profilu glebowym. Spośród nich można było wyodrębnić profile, dla których obserwowane wzrosty podatności magnetycznej były spowodowane zanieczyszczeniem antropogenicznym oraz takie, dla których wzrost wartości podatności magnetycznej wynikał z naturalnych właściwości gleb. W przypadku profili, dla których był zaznaczony silny wpływ antropogeniczny, obserwowano wysokie zawartości metali ciężkich oraz silne korelacje pomiędzy ich zawartością i podatnością magnetyczną. W przypadku profili glebowych, dla których obserwowane podwyższone wartości podatności magnetycznej wynikały z naturalnych właściwości gleb, zawartość metali ciężkich była na ogół niskia. Podobnie niskie były korelacje pomiędzy zawartością metali ciężkich w glebie i podatnością magnetyczną.

W Polsce, w ramach projektu badawczego prowadzonego przez IPIŚ PAN w Zabrze w latach 2003 – 2006, wykonano badania mające na celu wyjaśnienie charakteru wybranych anomalii magnetycznych i geochemicznych, na terenach gdzie nie były jasne przyczyny ich powstania (*Magiera i inni, 2006*). Wyniki badań pokazały, że gdy wykorzystana jest rozkład podatności magnetycznej w profilu glebowym, jest możliwe ustalenie przyczyn anomalii

magnetycznych. Możliwe jest też określenie, czy ich charakter jest warunkowany zanieczyszczeniem antropogenicznym, czy też naturalnymi właściwościami podłoża glebowego. Rezultaty tych badań potwierdziły wysoką przydatność i efektywność pomiarów w profilu glebowym do wykrywania obszarów potencjalnie zanieczyszczonych przez depozycje pyłów przemysłowo-miejskich.

Przeprowadzono także badania (*Spiteri i inni, 2005*), w których analizowano łącznie rozkłady podatności magnetycznej oraz rozkłady zawartości metali ciężkich w profilach glebowych. Wyniki badań pokazały, że istnieje bardzo wysoka dodatnia korelacja (wartości współczynników Pearsona wynosiły od 0,80 do 0,90) pomiędzy obserwowanymi na poszczególnych głębokościach w profilu glebowym wartościami podatności magnetycznej i zawartością metali ciężkich. Dodatkowo, maksymalne wartości obu wskaźników były obserwowane na tych samych głębokościach w profilu glebowym, co potwierdziło dużą zgodność rozkładów tych wielkości.

Jak do tej pory, wykonano niewiele badań, w których wykorzystano pomiary podatności magnetycznej w profilu glebowym do opracowania wskaźników potencjalnego zanieczyszczenia metalami ciężkimi. Dostępne są publikacje, w których sugerowano, że dobrym wskaźnikiem tego typu może być pole pod krzywą podatności magnetycznej w profilu glebowym (*Spiteri i inni, 2005*). W niektórych badaniach, jako wartość świadcząca o potencjalnym zanieczyszczeniu gleb metalami ciężkimi, wskazywano także maksymalną wartość podatności magnetycznej w profilu glebowym. Niestety, jednak do tej pory nie wykonano prac, w których zostałyby przeprowadzone analizy korelacji przestrzennych podatności magnetycznej i zawartości metali ciężkich, zmierzonych w przekroju glebowym. Nie wykonano także badań, w których wskaźniki potencjalnego zanieczyszczenia gleb, wyliczane z rozkładów podatności w profilu glebowym, byłyby przygotowywane z wykorzystaniem metod geostatystycznych. Nie określono także wartości progowych, które mogłyby zostać użyte w geostatystycznych metodach wskaźnikowych, takich jak kriging i kokriging wskaźnikowy, do określania obszaru, na którym gleby są potencjalnie zanieczyszczone metalami ciężkimi.

## **2.6 Badania nad wykorzystaniem magnetometrii do określania obszarów potencjalnie zanieczyszczonych**

W Polsce przeprowadzono badania (*Strzyszcz i inni, 2001; Magiera i inni, 2002*), w których stosowano metodę magnetometryczną do określania obszarów potencjalnie

zanieczyszczonych metalami ciężkimi w skali regionalnej. W badaniach tych wykorzystano archiwalne próbki glebowe Państwowego Instytutu Geologicznego, na podstawie których został sporządzony Atlas Geochemiczny Polski (*Lis i Pasieczna, 1995*). Wykonane pomiary magnetometryczne pozwoliły na opracowanie mapy podatności magnetycznej gleb całego obszaru Polski. Analizy porównawcze rozkładów przestrzennych podatności magnetycznej gleb i zawartości poszczególnych metali ciężkich w glebie wykazały, że dla badań w skali regionalnej metoda magnetometryczna może być efektywna i pomocna w określaniu obszarów potencjalnie zanieczyszczonych metalami ciężkimi (*Magiera i inni, 2003; Strzyszczyk i Magiera 2006*).

W ramach projektów badawczych prowadzonych przez IPIŚ PAN w Zabrze, wykonano także badania nad wykorzystaniem metody magnetometrycznej do celów wstępnego monitoringu gleb w skali lokalnej. W ramach prac wykonano szereg pomiarów na obszarach o powierzchni około 0,01 km<sup>2</sup>, położonych wokół wybranych punktów krajowego monitoringu gleb ornych oraz na stałych powierzchniach obserwacyjnych gleb leśnych w województwie śląskim. Uzyskane wyniki potwierdziły wysoką korelację pomiędzy wartościami podatności magnetycznej, a zawartością Pb, Zn i Cd w glebie. Tym samym, wyniki badań potwierdziły efektywność metody magnetometrycznej w określaniu potencjalnego zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi. Niemniej, w badaniach tych nie były wykorzystywane metody statystyki przestrzennej, które pozwalałyby na precyzyjne wykonanie i analizę rozkładów przestrzennych oraz integrację danych magnetometrycznych z danymi chemicznymi. W badaniach zostały zastosowane głównie narzędzia statystyki klasycznej, oraz metody regresji.

W dotychczasowych badaniach, magnetometrię terenową wykorzystywano także do badań zanieczyszczeń wokół dróg miejskich, spowodowanych emisją spalin z ruchu samochodowego. Wyniki badań pokazały, że pomiędzy podatnością magnetyczną a zawartością metali ciężkich w glebie, istnieje wyraźna i silna korelacja, zarówno pod względem wartości, jak i w funkcji odległości od drogi (*Hoffmann i inni, 1999*). Pomiary podatności magnetycznej były także z powodzeniem stosowane do badań zanieczyszczeń osadów dennych (*Pozza i inni, 2002*).

Prowadzono także badania, w których używano jednocześnie kilku rodzajów pomiarów magnetometrycznych do oceny potencjalnego zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi (*Chianese i inni, 2005*). W pierwszej części wykonywano pomiary powierzchniowe podatności magnetycznej miernikami Bartington MS2D i MS2F. Pomiary te były wykorzystywane jako szybka metoda wstępnego rozpoznania badanego terenu. W następnym

etapie wykonywano bardziej szczegółowe pomiary geofizyczne badanej powierzchni. W badaniach tych jednak, nie stosowano metod geostatystycznej integracji danych, a każdy ze zbiorów danych pomiarowych był analizowany oddzielnie.

Liczba prac, w których wykorzystano metody geostatystyczne do wyznaczania rozkładów przestrzennych w magnetometrii terenowej była jak do tej pory bardzo mała. Używano głównie najprostsze odmiany krigingu (*Kapička i inni, 1997; Maier i Scholger, 2004*), natomiast bardziej zaawansowane metody geostatystyczne, w tym metody integracji danych, takie jak kokriging, nie były praktycznie używane.

### 3 Ogólne metody badawcze wykorzystane w pracy

#### 3.1 Metody geostatystyczne

Początki geostatystyki są datowane na lata 60. i 70. ubiegłego wieku, kiedy to ukazały się prace Georges Matherona (*Matheron, 1963*), dotyczące podstaw teoretycznych geostatystyki. Początkowo metody geostatystyczne były rozwijane głównie z myślą o ich wykorzystaniu w górnictwie i przemyśle wydobywczym (*David, 1977; Journel i Huijbregts, 1978*). Jednak z upływem czasu zaczęły znajdować zastosowanie także w innych dziedzinach, jak na przykład w przemyśle naftowym, hydrologii, naukach o ziemi oraz w inżynierii środowiska (*Tao, 1995; von Staiger i inni, 1996; Namysłowska-Wilczyńska i Wilczyński, 1997; Goovaerts, 2000, 2001; Webster i Oliver, 2001; Markus i McBratney, 2001; Cattle i inni, 2002; Usowicz, 1999; Usowicz i inni, 2007*).

W odróżnieniu do statystyki klasycznej, w geostatystyce oprócz zmierzonej wartości istotną rolę odgrywa aspekt przestrzenny badanego zjawiska. Analogicznie jak w przypadku statystyki klasycznej, gdzie jest używana zmienna losowa, w geostatystyce został zdefiniowany nowy rodzaj zmiennej, nazwanej zmienną zregionalizowaną (*Deutsch i Journel, 1992; Goovaerts, 1997; Isaaks i Srivastava, 1998*). Główną cechą, która odróżnia zmienną zregionalizowaną od zmiennej losowej, jest to, że zmierzona wartość jest związana z położeniem w pewnym założonym układzie odniesienia.

Zmienna zregionalizowana ma właściwości zarówno zmiennej losowej, jak i zmiennej deterministycznej. Lokalnie, na przykład w obrębie punktu pomiarowego, wartości zmiennej zregionalizowanej mogą być traktowane jako realizacje pewnej zmiennej losowej, którą można opisać pewnym rozkładem prawdopodobieństwa. Istotną cechą zmiennej zregionalizowanej są korelacje przestrzenne, które charakteryzują każdą parę punktów odseparowaną o pewien wektor  $\mathbf{h}$ . Na ogół, wartości zmierzone w punktach pomiarowych położonych blisko siebie są silniej skorelowane ze sobą w porównaniu z wartościami zmierzonymi w punktach bardziej odległych od siebie. Dla pewnej odległości, nazywanej zasięgiem korelacji, korelacje przestrzenne pomiędzy punktami pomiarowymi zanikają (*Goovaerts, 1997; Isaaks i Srivastava, 1998*).

Oprócz metod pozwalających na badanie korelacji przestrzennych, w geostatystyce ważną rolę odgrywają metody estymacji przestrzennej. Metody te umożliwiają szacowanie wartości w niepróbowanych miejscach, na podstawie wartości zmierzonych w sąsiadujących punktach pomiarowych. Jedną z najbardziej znanych geostatystycznych metod interpolacji

przestrzennej jest kriging, określany często mianem BLUE – *Best Linear Unbiased Estimator* (Goovaerts, 1997; Isaaks i Srivastava, 1998). Określenie to pochodzi z języka angielskiego i oznacza najlepszy liniowy nieobciążony estymator. Zaletą krigingu jest to, że średni błąd estymacji jest równy zeru, podczas gdy wariancja błędu estymacji jest minimalizowana.

Istotną rolę w geostatystyce odgrywają metody integracji danych (Goovaerts, 1998; Isaaks i Srivastava, 1998; Han i inni, 2003; Zawadzki, 2003). Techniki te umożliwiają jednoczesne użycie pomiarów kilku rodzajów, w celu bardziej precyzyjnego szacowania rozkładów przestrzennych niż w przypadku metod opartych na pomiarach tylko jednego typu. Zwykle jeden z pomiarów, nazywany zmienną główną, dostarcza bardzo precyzyjnej, ilościowej informacji na temat badanego zjawiska. Przykładowo, w metodzie magnetometrycznej pomiarami takimi mogą być laboratoryjne pomiary zawartości poszczególnych metali ciężkich w glebie. Pozostałe pomiary, określane mianem zmiennych dodatkowych, dostarczają informacji na temat wielkości silnie skorelowanych ze zmienną główną. Przykładem mogą być pomiary wielkości geofizycznych, parametry glebowe oraz wykorzystywana w niniejszej pracy podatność magnetyczna gleby. Najbardziej popularne geostatystyczne metody integracji danych to metody kokrigingu (Deutsch i Journel, 1992; Goovaerts, 1997; Isaaks i Srivastava, 1998).

### 3.1.1 Jednorodność w geostatystyce

W geostatystyce, w przypadku analizowania zmiennych zregionalizowanych, wielokrotnie muszą zostać spełnione pewne założenia, dotyczące jednorodności badanego pola losowego (Goovaerts, 1997; Isaaks i Srivastava, 1998). Wyróżnia się kilka rodzajów jednorodności:

- i. Jeżeli prawo rozkładu zmiennej zregionalizowanej  $Z(\mathbf{x})$  oraz  $Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})$  jest niezmiennicze względem wektora przesunięcia  $\mathbf{h}$ , wtedy zmienna jest jednorodna w węższym sensie, co określa się mianem jednorodności pierwszego rodzaju (ang. *strict stationarity*). W praktyce, ten typ jednorodności jest bardzo rzadko spełniony.
- ii. Zmienna  $Z(\mathbf{x})$  jest jednorodna jeśli średnia lokalna  $E[Z(\mathbf{x})]$  jest stała i nie zależy od położenia  $\mathbf{x}$  w przestrzeni. Dodatkowo, kowariancja pomiędzy wartościami zmierzonymi w dwóch różnych punktach  $Z(\mathbf{x})$  i  $Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})$  zależy tylko od długości wektora  $\mathbf{h}$  dzielącego te punkty. Z jednorodności kowariancji wynika jednorodność wariancji  $Var[Z(\mathbf{x})]$  oraz semiwariancji  $\gamma(\mathbf{h})$ :

$$\text{Var}[Z(\mathbf{x})] = E[Z(\mathbf{x}) - m]^2 = \text{Cov}(0) \quad (1.)$$

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2} E[Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})]^2 = \text{Cov}(0) - \text{Cov}(\mathbf{h}) \quad (2.)$$

W jednorodności drugiego rodzaju (ang. *stationarity of second order*) zakłada się istnienie skończonej kowariancji i wariancji. Wykorzystanie funkcji semiwariancji  $\gamma(\mathbf{h})$  pozwala na założenie tylko jednorodności wariogramu.

- iii. Ostatnim z rodzajów jednorodności jest tzw. hipoteza wewnętrzna (ang. *intrinsic hypothesis*). Zmienna  $Z(\mathbf{x})$  jest jednorodna, jeżeli średnia lokalna  $E[Z(\mathbf{x})]$  istnieje i nie zależy od położenia  $\mathbf{x}$  w przestrzeni. Dodatkowo, dla każdej pary punktów  $Z(\mathbf{x})$  oraz  $Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})$  oddzielonej przez wektor  $\mathbf{h}$  istnieje skończona wariancja  $\text{Var}[Z(\mathbf{x})]$ , która nie zależy od położenia  $\mathbf{x}$ .

W przypadku, gdy w danych pomiarowych jest obserwowany wyraźny trend, zmienna  $Z(\mathbf{x})$  może nie spełniać założeń jednorodności pierwszego i drugiego rodzaju. Możliwe jest wtedy ograniczenie długości wektora  $\mathbf{h}$ , tak aby spełnienie założeń hipotezy wewnętrznej dotyczyło tylko bezpośredniego sąsiedztwa położenia  $\mathbf{x}$ . Ograniczenie długości wektora  $\mathbf{h}$  występuje na przykład w metodzie krigingu, gdy zakłada się pewien obszar poszukiwań, równy najczęściej zasięgowi korelacji zmiennej  $Z(\mathbf{x})$ .

### 3.1.2 Semiwariancja

Semiwariancja (Pannatier, 1996; Isaaks i Srivastava, 1998; Gringarten i Clayton, 2000) jest najczęściej używaną geostatystyczną miarą korelacji przestrzennych. Wartości semiwariancji są wyliczane na podstawie wartości zmierzonych w punktach pomiarowych  $Z(\mathbf{x})$  oraz  $Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})$  w zależności od odległości  $\mathbf{h}$  pomiędzy punktami pomiarowymi.

Semiwariancja jest obliczana jako połowa średniej kwadratu różnic, dla każdej z  $N$  możliwych par punktów odległych o wektor  $\mathbf{h}$ , zgodnie ze wzorem:

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [Z(\mathbf{x}_i) - Z(\mathbf{x}_i + \mathbf{h})]^2 \quad (3.)$$

Najczęściej wartości semiwariancji  $\gamma(\mathbf{h})$  są umieszczane na wykresie jako funkcja odległości  $\mathbf{h}$  dzielącej parę punktów  $Z(\mathbf{x})$  oraz  $Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})$ . Wykres taki nosi nazwę wariogramu eksperymentalnego i prezentuje średnie wartości semiwariancji wyznaczone dla kilku zadanych przedziałów długości wektora  $\mathbf{h}$  (rys. 3.1.). Obliczenia semiwariancji mogą być wykonywane dla określonego kierunku wektora  $\mathbf{h}$ . Wtedy wariogramy są określane mianem anizotropowych. W przypadku, gdy kierunek wektora  $\mathbf{h}$  nie zostanie sprecyzowany,



wariogramy określa się mianem izotropowych. Ze względu na specyfikę danych środowiskowych i bardzo częstą silną prawostronną skośność rozkładów badanej wielkości  $Z(\mathbf{x})$ , obliczenia semiwariancji są często wykonywane na wartościach reszt  $R(\mathbf{x}) = Z(\mathbf{x}) - m(\mathbf{x})$ . Wartość  $m(\mathbf{x})$  oznacza średnią, która może być stała na całym badanym obszarze lub, co zdarza się częściej, stała tylko lokalnie, w sąsiedztwie położenia  $\mathbf{x}$ .

### 3.1.3 Semiwariancja krzyżowa

Semiwariancja krzyżowa jest geostatystyczną miarą korelacji przestrzennych, którą oblicza się w analogiczny sposób jak semiwariancję. Zasadnicza różnica polega na tym, że semiwariancja krzyżowa jest miarą korelacji pomiędzy dwiema zmiennymi  $Z(\mathbf{x})$  i  $U(\mathbf{x})$  (Deutsch i Journel, 1992; Goovaerts, 1997; Isaaks i Srivastava, 1998). Zmienna  $Z(\mathbf{x})$  jest nazywana zmienną główną, natomiast zmienna  $U(\mathbf{x})$  jest nazywana zmienną dodatkową.

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [Z(\mathbf{x}_i) - Z(\mathbf{x}_i + \mathbf{h})] \cdot [U(\mathbf{x}_i) - U(\mathbf{x}_i + \mathbf{h})] \quad (4.)$$

W przypadku obliczania semiwariancji krzyżowej konieczne są zbiory danych obu zmiennych  $Z(\mathbf{x})$  oraz  $U(\mathbf{x})$  o liczności wystarczającej do wyznaczenia dużej ilości par. Często zbyt mała liczba pomiarów jednej ze zmiennych może znacznie utrudniać lub niemal uniemożliwiać wyliczenie wariogramu krzyżowego. W takim przypadku możliwe jest wyliczanie tak zwanych pseudowariogramów krzyżowych (Myers, 1991; Zhang i inni, 1992; Lark, 2000, 2002).

$$\gamma_{ZU}(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [Z(\mathbf{x}_i) - U(\mathbf{x}_i + \mathbf{h})]^2 \quad (5.)$$

Wartości pseudowariogramów krzyżowych są wyznaczane na podstawie par utworzonych z wartości zmiennej  $Z(\mathbf{x})$  oraz  $U(\mathbf{x})$ , odległych o wektor  $\mathbf{h}$ . Dzięki temu pseudowariogram krzyżowy jest wyznaczany na podstawie znacznie większej ilości par w porównaniu z klasycznym wariogramem krzyżowym. Jest jednak wymagane, aby pomiary każdej zmiennej,  $Z(\mathbf{x})$  oraz  $U(\mathbf{x})$ , były wykonywane w różnych punktach pomiarowych. W przypadku, gdy pomiary obu zmiennych  $Z(\mathbf{x})$  oraz  $U(\mathbf{x})$  wykonywano w tych samych punktach pomiarowych wyznaczeni pseudowariogramu krzyżowego nie jest możliwe.

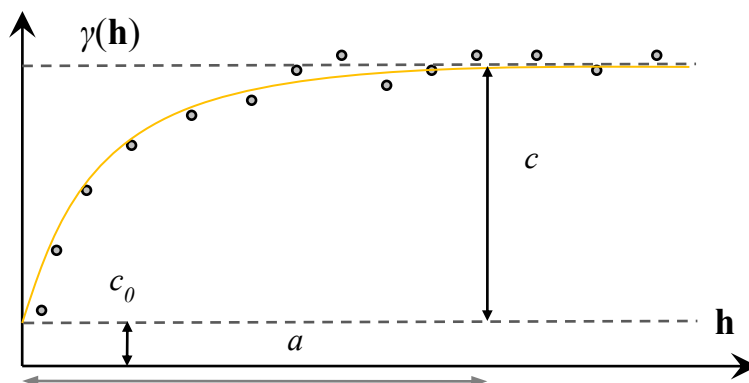
### 3.1.4 Modele wariogramów i wariogramów krzyżowych

Eksperymentalne wariogramy oraz wariogramy krzyżowe reprezentują średnie wartości semiwariancji tylko dla kilku wybranych wartości wektora  $\mathbf{h}$ . W celu wykorzystania pewnych parametrów zmienności przestrzennej badanego zjawiska w metodach takich jak kriging

i kokriging, konieczne jest modelowanie wariogramów eksperymentalnych (McBratney i Webster, 1986; Pannatier, 1996; Goovaerts, 1999; Gringarten i Clayton, 2000). Modele wariogramów charakteryzuje kilka ważnych parametrów (rys. 3.1.).

Istotnym parametrem modelowanego wariogramu jest efekt samorodka  $c_0$  (Deutsch i Journel, 1992; Isaaks i Srivastava, 1998), będący wartością semiwariancji wyznaczonej dla wektora  $\mathbf{h} = 0$ . Wartość efektu samorodka związana jest ze zmiennością przestrzenną dla odległości  $\mathbf{h}$  mniejszych od najmniejszej odległości pomiędzy punktami pomiarowymi. Dodatkowo, wartość efektu samorodka jest związana także z błędami pomiarowymi oraz błędami wynikającymi z użyciem określonej aparatury pomiarowej.

Innym ważnym parametrem modelu wariogramu jest zasięg korelacji  $a$ . Jest to wartość wektora odległości  $\mathbf{h}$ , dla którego wariogram osiąga nasycenie określane mianem progu  $c$ . W przypadku modeli, które osiągają próg  $c$  asymptotycznie, możliwe jest podanie zasięgu praktycznego (ang. *practical range*) oraz zasięgu teoretycznego (ang. *teoretical range*) (Deutsch i Journel, 1992; Isaaks i Srivastava, 1998). Zasięg praktyczny jest wartością wektora  $\mathbf{h}$ , dla którego model wariogramu osiąga 95% wartości progu  $c$ . Zasięg teoretyczny modelu wariogramu jest równy  $1/3$  zasięgu praktycznego w przypadku modeli eksponencjalnych i  $1/3^{1/2}$  w przypadku modelu gaussowskiego (Deutsch i Journel, 1992; Isaaks i Srivastava, 1998).



**Rysunek 3.1. Przykładowy model wariogramu eksperymentalnego i jego parametry: efekt samorodka  $c_0$ , zasięg korelacji  $a$ , próg  $c$**

**Figure 3.1. Exemplary model of experimental variogram and its parameters: nugget effect  $c_0$ , range of correlation  $a$ , sill  $c$**

W przypadku całkowitego braku zmienności przestrzennej, do modelowania wariogramu eksperymentalnego jest wykorzystywany model nazywany czystym efektem samorodka (ang. *pure nugget effect*) (Deutsch i Journel, 1992; Goovaerts, 1997). Dla wektora odległości  $\mathbf{h} = 0$  wartość semiwariancji  $\gamma(\mathbf{h})$  wynosi 0, natomiast dla pozostałych wartości wektora  $\mathbf{h}$  jest stała i wynosi  $c$ .

$$\gamma(\mathbf{h}) = \begin{cases} 0, & \mathbf{h} = 0 \\ c, & \mathbf{h} \neq 0 \end{cases} \quad (6.)$$

Jeżeli badane zjawisko charakteryzuje pewna zmienność przestrzenna, wariogramy eksperymentalne mogą być modelowane przy wykorzystaniu od jednego do kilku spośród kilkunastu dostępnych modeli (*Deutsch i Journel, 1992; Goovaerts, 1997; Isaaks i Srivastava, 1998; Ma i Jones, 2001*), będących dodatkowo określonymi funkcjami wektora  $\mathbf{h}$ .

i. Model sferyczny (ang. *spherical model*):

$$\gamma(\mathbf{h}) = \begin{cases} c_0 + (c - c_0) \cdot \left( \frac{1,5\mathbf{h}}{a} - \frac{0,5\mathbf{h}^3}{a^3} \right), & \mathbf{h} < a \\ c, & \mathbf{h} > a \end{cases} \quad (7.)$$

ii. Model pentasferyczny (ang. *pentaspherical model*):

$$\gamma(\mathbf{h}) = \begin{cases} c_0 + (c - c_0) \cdot \left( \frac{15}{8} \cdot \frac{\mathbf{h}}{a} - \frac{5}{4} \cdot \frac{\mathbf{h}^3}{a^3} + \frac{3}{8} \cdot \frac{\mathbf{h}^5}{a^5} \right), & 0 \leq \mathbf{h} < a \\ c, & a \leq \mathbf{h} \end{cases} \quad (8.)$$

iii. Model eksponencjalny (ang. *exponential model*):

$$\gamma(\mathbf{h}) = \begin{cases} c_0 + (c - c_0) \cdot \left( 1 - \exp\left(\frac{-3\mathbf{h}}{a}\right) \right), & \mathbf{h} \neq 0 \\ 0, & \mathbf{h} = 0 \end{cases} \quad (9.)$$

iv. Model liniowy (ang. *linear model*):

$$\gamma(\mathbf{h}) = \begin{cases} c + b\mathbf{h}, & \mathbf{h} \neq 0 \\ 0, & \mathbf{h} = 0 \end{cases} \quad (10.)$$

gdzie:  $b$  – stały współczynnik.

v. Model sześcienny (ang. *cubic model*):

$$\gamma(\mathbf{h}) = \begin{cases} c_0 + (c - c_0) \cdot \left( 7 \cdot \frac{\mathbf{h}^2}{a^2} - \frac{35}{4} \cdot \frac{\mathbf{h}^3}{a^3} + \frac{7}{2} \cdot \frac{\mathbf{h}^5}{a^5} - \frac{3}{4} \cdot \frac{\mathbf{h}^7}{a^7} \right), & 0 \leq \mathbf{h} < a \\ c, & a \leq \mathbf{h} \end{cases} \quad (11.)$$

vi. Model gaussowski (ang. *Gaussian model*):

$$\gamma(\mathbf{h}) = c_0 + (c - c_0) \cdot \left( 1 - \exp\left(\frac{-3\mathbf{h}^2}{a^2}\right) \right) \quad (12.)$$

vii. Model efektu dziury (ang. *hole-effect model*):

$$\gamma(\mathbf{h}) = c_0 + (c - c_0) \cdot \left( 1 - \frac{\sin\left(4,4934 \frac{\mathbf{h}}{a}\right)}{4,4934 \frac{\mathbf{h}}{a}} \right) \quad (13.)$$

viii. Model potęgowy (ang. *power model*):

$$\gamma(\mathbf{h}) = \begin{cases} c + b\mathbf{h}^\alpha, & \mathbf{h} \neq 0 \\ 0, & \mathbf{h} = 0 \end{cases} \quad (14.)$$

gdzie:  $\alpha$  – stały współczynnik.

Parametry modeli wariogramów mogą być wyznaczone przy wykorzystaniu pewnych automatycznych metod dopasowania, jak na przykład metody najmniejszych kwadratów. Możliwe jest też krokowe wyznaczanie poszczególnych parametrów modelu w sposób interaktywny. W takim przypadku jako miarę dopasowania modelu do wariogramu eksperymentalnego wykorzystuje się współczynnik *IGF* (ang. *Indicative Goodness of Fit*) (*Gringarten i Clayton, 2000*):

$$IGF = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=0}^{n(j)} \frac{h_{\max}(j)}{\sum_{i=0}^{n(j)} P(i)} \cdot \frac{P(i)}{h_{\text{avg}}(i)} \cdot \left( \frac{\gamma_{\text{exp}}(i) - \gamma_{\text{mod}}(i)}{\sigma^2} \right) \quad (15.)$$

gdzie:  $N$  – ilość par,  $n(j)$  – ilość klas dla  $j$ -tej struktury,  $P(i)$  – ilość par dla  $i$ -tej klasy,  $h_{\max}(j)$ ,  $h_{\text{avg}}(j)$  – maksymalne i średnie odległości dla  $j$ -tej struktury,  $\gamma_{\text{exp}}(i)$ ,  $\gamma_{\text{mod}}(i)$  – semiwariancja eksperymentalna i modelowana,  $\sigma^2$  – wariancja.

### 3.1.5 Inne geostatystyczne miary korelacji przestrzennych

Oprócz semiwariancji jest możliwe wykorzystanie innych geostatystycznych miar korelacji przestrzennych (*Deutsch i Journel, 1992; Goovaerts, 1997; Isaaks i Srivastava, 1998*). Zasada wyznaczania tych miar jest analogiczna, jak w przypadku semiwariancji i oparta na parach punktów pomiarowych odległych o wektor  $\mathbf{h}$ . Wykorzystuje się różne zależności funkcyjne pomiędzy wartościami zmierzonymi w punktach pomiarowych  $Z(\mathbf{x})$  oraz  $Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})$ . Najpopularniejsze miary korelacji przestrzennych zostały wymienione poniżej.

i. Kowariogram:

$$C(\mathbf{h}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z(x_i) \cdot Z(x_i + \mathbf{h}) - m_{-h} m_{+h}) \quad (16.)$$

gdzie:  $m_{-h}$ ,  $m_{+h}$  – średnie wartości na końcu i początku wektora  $\mathbf{h}$ .

ii. Korelogram:

$$\rho(\mathbf{h}) = \frac{C(\mathbf{h})}{\sigma_{-h} \cdot \sigma_{+h}} \quad (17.)$$

iii. Semirodogram:

$$\gamma_R(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \sqrt{|Z(\mathbf{x}_i) - Z(\mathbf{x}_i + \mathbf{h})|} \quad (18.)$$

iv. Semimadogram:

$$\gamma_M(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N |Z(\mathbf{x}_i) - Z(\mathbf{x}_i + \mathbf{h})| \quad (19.)$$

v. Semiwariancja wartości logarytmowanych:

$$\gamma_L(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (\ln(Z(\mathbf{x}_i)) - \ln(Z(\mathbf{x}_i + \mathbf{h})))^2 \quad (20.)$$

### 3.1.6 Kriging

W obliczeniach metodą krigingu wartości  $Z_{est}(\mathbf{x})$  są szacowane w niepróbowanych lokalizacjach na podstawie wartości zmierzonych w punktach pomiarowych, pomnożonych przez wagi krigingu:

$$Z_{est}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N w_i \cdot Z(\mathbf{x}_i) \quad (21.)$$

Wartości  $Z(\mathbf{x})$  mierzone w punkcie pomiarowym są wyrażane jako suma średniej  $m(\mathbf{x})$  i reszty  $R(\mathbf{x})$ . Stosując metodę krigingu zakłada się, że średnia wartość  $m(\mathbf{x})$  jest stała na całym badanym obszarze lub też lokalnie zmienna. Równanie krigingu jest wtedy zapisywane w postaci:

$$Z_{est}(\mathbf{x}) - m(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N w_i \cdot R(\mathbf{x}_i) \quad (22.)$$

W zależności od typu krigingu, wagi krigingu  $w_i$  są wyliczane przy wykorzystaniu funkcji semiwariancji bądź kowariancji. Wagi  $w_i$  są dobierane w taki sposób, aby średni błąd estymacji wyrażany jako  $E[Z_{est}(\mathbf{x}_i) - Z(\mathbf{x})]$  był równy 0. Dodatkowo jest minimalizowana wariancja  $Var[Z_{est}(\mathbf{x}_i) - Z(\mathbf{x})]$ . Najbardziej popularnymi typami krigingu są kriging prosty i zwykły. Występuje także wiele innych odmian krigingu, których szczegółowy opis jest dostępny w literaturze (Cressie, 1986; Allard, 1998; Pardo-Iguzquiza i Dowd, 1998; Aunon i Gomez-Hernandez, 2000; Walvoort i de Gruijter, 2001; Emery, 2003).

### 3.1.7 Kriging prosty

W przypadku krigingu prostego (Goovaerts, 1997, 1999; Isaaks i Srivastava, 1998) zakłada się, że średnia  $m(\mathbf{x})$  jest znana i stała na całym badanym obszarze  $m(\mathbf{x}) = m$ . Założenie o stałej średniej  $m$  wystarcza do zapewnienia nieobciążoności estymatora  $Z_{est}(\mathbf{x})$ , ponieważ  $E[Z(\mathbf{x}_i) - m] = 0$ . Z tego względu nie jest wymagane, aby wagi krigingu  $w_i$  sumowały się do jedności. Błąd estymacji jest wyrażany jako różnica pomiędzy wartością

estymowaną  $Z_{est}(\mathbf{x})$  a wartością pomierzoną  $Z(\mathbf{x})$ . Zakładając stałą wartość średniej  $m$ , błąd estymacji można wyrazić jako:

$$Z_{est}(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x}) = (Z_{est}(\mathbf{x}) - m) - (Z(\mathbf{x}) - m) = R_{est}(\mathbf{x}) - R(\mathbf{x}) \quad (23.)$$

Rozpisując wartość zmierzoną w punkcie jako sumę średniej  $m$  z obszaru i wartości reszt  $R(\mathbf{x}_i)$  i  $R(\mathbf{x}_j)$  dla lokalizacji  $i$  oraz  $j$ , wariancję błędu można wyrazić jako:

$$\begin{aligned} \sigma^2(\mathbf{x}) &= E[(Z_{est}(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x}))^2] = Var(R_{est}(\mathbf{x})) + Var(R(\mathbf{x})) - 2 \cdot Cov(R_{est}(\mathbf{x}), R(\mathbf{x})) \\ \sigma^2(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_i \cdot w_j \cdot Cov(R(\mathbf{x}_i), R(\mathbf{x}_j)) - 2 \cdot \sum_{i=1}^N w_i \cdot Cov(R(\mathbf{x}), R(\mathbf{x}_i)) + Cov(0) \end{aligned} \quad (24.)$$

Estymacja krigingu jest określana jako najlepsza, ponieważ wariancja błędu jest minimalizowana. W tym celu są wyliczane pochodne cząstkowe równania opisującego wariancję błędu, ze względu na poszczególne wagi. Następnie, tak wyliczone pochodne są przyrównywane do zera. Układ takich  $k$  równań jest nazywany układem krigingu:

$$\sum_{j=1}^N w_j \cdot Cov(R(\mathbf{x}_i), R(\mathbf{x}_j)) = Cov(R(\mathbf{x}), R(\mathbf{x}_i)), \quad \text{dla } i = 1, \dots, k \quad (25.)$$

Układ krigingu może być zapisany w postaci macierzowej przy użyciu macierzy kowariancji  $\mathbf{K}$  pomiędzy wartościami zmierzonymi w punktach pomiarowych oraz macierzy kowariancji  $\mathbf{C}$  pomiędzy wartościami zmierzonymi i estymowanymi.

$$\begin{aligned} \mathbf{K}\mathbf{w}_i &= \mathbf{C} \\ \mathbf{w}_i &= \mathbf{K}^{-1}\mathbf{C} \end{aligned} \quad (26.)$$

W przypadku układu krigingu prostego są używane wartości kowariancji  $Cov(\mathbf{h})$  zamiast semiwariancji. Wartości kowariancji mogą być wyliczone na podstawie semiwariancji  $\gamma(\mathbf{h})$ :

$$Cov(\mathbf{h}) = Cov(0) - \gamma(\mathbf{h}) \quad (27.)$$

Wykorzystanie macierzy kowariancji umożliwia przyporządkowanie mniejszych wag krigingu do punktów położonych w skupiskach oraz większych do wyizolowanych punktów pomiarowych. Metoda krigingu pozwala na wyliczenie oprócz wartości estymowanych, także wariancji krigingu:

$$\sigma^2(\mathbf{x}) = Cov(0) - \sum_{i=1}^N w_i \cdot Cov(R(\mathbf{x}_i), R(\mathbf{x})) \quad (28.)$$

Wariancja krigingu jest wielkością, która nie zależy od wartości zmierzonych w punktach pomiarowych, ale tylko od rozkładu tych punktów na badanej powierzchni oraz od kowariancji pomiędzy punktami pomiarowymi.

### 3.1.8 Kriging zwykły

W przypadku metody krigingu zwykłego (Goovaerts, 1997, 1999; Isaaks i Srivastava, 1998), w odróżnieniu od krigingu prostego, średnia  $m(\mathbf{x})$  nie jest znana oraz dodatkowo nie jest stała na badanym obszarze. W kringingu zwykłym przyjmuje się założenie, że średnia  $m(\mathbf{x})$  jest stała tylko w najbliższym sąsiedztwie punktu, w którym dokonywano estymacji.

$$\begin{aligned} Z_{est}(\mathbf{x}) - m(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^N w_i \cdot (Z(\mathbf{x}_i) - m(\mathbf{x})) \\ Z_{est}(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^N w_i \cdot Z(\mathbf{x}_i) + m(\mathbf{x}) \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^N w_i\right) \end{aligned} \quad (29.)$$

W związku z tym, że średnia  $m(\mathbf{x})$  nie jest stała na całym badanym obszarze, konieczne jest postawienie warunku, aby wagi krigingu sumowały się do jedności  $\sum_{i=1}^N w_i = 1$ .

Spełnienie tego warunku jest konieczne do zapewnienia nieobciążoności estymatora  $Z_{est}(\mathbf{x})$ . Gdy spełnione jest powyższe założenie i wagi  $w$  sumują się do jedności, wyrażenie

$m(\mathbf{x}) \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^N w_i\right)$  jest równe zero, co wystarcza do zapewnienia nieobciążoności estymatora

$Z_{est}(\mathbf{x})$ . Podobnie jak w przypadku krigingu prostego, wariancja błędu jest minimalizowana. Dodatkowe założenie dotyczące wag krigingu wymaga użycia mnożnika Lagrange'a  $\mu$ . Układ krigingu jest zdefiniowany jako:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N w_i \cdot Cov(R_{est}(\mathbf{x}), R(\mathbf{x})) + \mu(\mathbf{x}) = Cov(R_{est}(\mathbf{x}), R(\mathbf{x})) \\ \sum_{i=1}^N w_i = 1 \end{cases} \quad (30.)$$

Tak jak w przypadku krigingu prostego, w układzie równań krigingu, są używane kowariancje pomiędzy resztami  $R(\mathbf{x})$ . Średnia  $m(\mathbf{x})$  nie jest stała na badanym obszarze, w związku z tym kowariancje pomiędzy wartościami zmierzonymi  $Z(\mathbf{x})$  nie są takie same jak kowariancje pomiędzy resztami  $R(\mathbf{x})$ . Niemniej jednak zakłada się, że semiwariancja wykorzystana do wyliczenia kowariancji pozwala na ograniczenie wpływu trendu w danych pomiarowych i jednocześnie zmniejszenie zmienności średniej  $m(\mathbf{x})$  na badanym obszarze (Goovaerts, 1997). Wariancja krigingu zwykłego jest wyrażona jako:

$$\sigma^2(\mathbf{x}) = Cov(0) - \sum_{i=1}^N w_i \cdot Cov(R(\mathbf{x}_i), R(\mathbf{x})) - \mu(\mathbf{x}) \quad (31.)$$

### 3.1.9 Kriging wskaźnikowy

W przypadku metody krigingu wskaźnikowego (Goovaerts, 1999) dane pomiarowe  $Z(\mathbf{x})$  są transformowane przy wykorzystaniu wartości progowych  $C_{próg}$ . Każdą ze zmierzonych wartości  $Z(\mathbf{x})$  porównuje się z wartością progową  $C_{próg}$  i jeżeli jest większa bądź równa, jest przypisywana jej wartość 1. W przeciwnym przypadku jest przypisywana wartość 0.

$$I(\mathbf{x}_i) = \begin{cases} 0 & \text{gdy } Z(\mathbf{x}_i) < C_{próg} \\ 1 & \text{gdy } Z(\mathbf{x}_i) \geq C_{próg} \end{cases} \quad (32.)$$

Następnie, na podstawie transformowanego zbioru danych wykonuje się odpowiednie wariogramy eksperymentalne, które są potem modelowane. Parametry modeli wariogramów są następnie wykorzystywane w metodzie krigingu, która jest używana do wykonania rozkładów przestrzennych prawdopodobieństwa  $P(\mathbf{x})$ , że wartości badanej zmiennej mogą przekroczyć wartość progową  $C_{próg}$ .

$$P(\mathbf{x}_i) = \sum_{i=1}^N w_i \cdot I(\mathbf{x}_i) \quad (33.)$$

### 3.1.10 Kokriging

Jest to najbardziej znana geostatystyczna metoda integracji danych pomiarowych. Podobnie jak w kringingu, wykorzystuje się liniową kombinację wartości dwóch zmiennych  $Z(\mathbf{x})$  i  $U(\mathbf{x})$ , zmierzonych w punktach pomiarowych oraz wag  $w$  i  $v$ , przyporządkowanych do tych punktów (Goovaerts, 1998; Zawadzki, 2003). W odróżnieniu od kringingu są używane pomiary kilku rodzajów  $Z(\mathbf{x})$  i  $U(\mathbf{x})$ .

$$Z_{est}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N w_i \cdot Z(\mathbf{x}_i) + \sum_{j=1}^M v_j \cdot U(\mathbf{x}_j) \quad (34.)$$

W powyższym równaniu wykorzystana została tylko jedna zmienna dodatkowa  $U(\mathbf{x})$ , aczkolwiek możliwe jest wykorzystanie kilku takich zmiennych. Najlepsze rezultaty osiąga się w przypadku, gdy zmienne  $Z(\mathbf{x})$  i  $U(\mathbf{x})$  są silnie skorelowane, a wartość współczynnika korelacji Pearsona wynosi od 0,40 do 0,80 (Zawadzki, 2003).

Analogicznie jak w przypadku metody kringingu, istnieje wiele odmian kokringingu. Najbardziej znane to kokriging prosty i zwykły. W przypadku kokringingu prostego wartości średnie  $m_Z(\mathbf{x}) = m_Z$  i  $m_U(\mathbf{x}) = m_U$  zmiennych  $Z(\mathbf{x})$  oraz  $U(\mathbf{x})$  są znane i stałe na całym badanym obszarze. Zgodnie z tym, estymator kokringingu prostego może być zapisany jako:



$$\begin{aligned}
Z_{est}(\mathbf{x}) - m_Z &= \sum_{i=1}^N w_i \cdot (Z(\mathbf{x}_i) - m_Z) + \sum_{j=1}^M v_j \cdot (U(\mathbf{x}_j) - m_U) \\
Z_{est}(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^N w_i \cdot Z(\mathbf{x}_i) + m_Z \left(1 - \sum_{i=1}^N w_i\right) + \sum_{j=1}^M v_j \cdot U(\mathbf{x}_i) - \sum_{j=1}^M v_j \cdot m_U
\end{aligned} \tag{35.}$$

W przypadku kokrigingu zwykłego średnie  $m_Z(\mathbf{x})$  oraz  $m_U(\mathbf{x})$  zmiennych  $Z(\mathbf{x})$  i  $U(\mathbf{x})$  są nieznanne i stałe tylko w bezpośrednim sąsiedztwie punktu, w którym jest estymowana wartość  $Z_{est}(\mathbf{x})$ . W celu zapewnienia nieobciążoności wartości estymowanych jest konieczne przyjęcie założeń dotyczących wag kokrigingu. Wagi  $w$  zmiennej głównej  $Z(\mathbf{x})$  muszą się sumować do jedności, natomiast wagi  $v$  zmiennej dodatkowej  $U(\mathbf{x})$  do zera.

$$\sum_{i=1}^N w_i = 1, \quad \sum_{j=1}^M v_j = 0 \tag{36.}$$

Wagi kokrigingu są wyliczane poprzez minimalizację wariancji i rozwiązanie układu równań kokrigingu. W układzie równań kokrigingu jest konieczne wykorzystanie dwóch mnożników Lagrange'a  $\mu_1$  oraz  $\mu_2$ , tak aby zapewnić nieobciążoność estymowanych wartości:

$$\left\{ \begin{aligned}
&\sum_{i=1}^N w_i \cdot Cov(R_Z(\mathbf{x}_\alpha), R_Z(\mathbf{x}_i)) + \sum_{j=1}^M v_j \cdot Cov(R_Z(\mathbf{x}_\alpha), R_U(\mathbf{x}_j)) + \mu_1 = \\
&= Cov(R_Z(\mathbf{x}_\alpha), R(\mathbf{x})), \quad \alpha = 1, \dots, N \\
&\sum_{i=1}^N w_i \cdot Cov(R_U(\mathbf{x}_\beta), R_Z(\mathbf{x}_i)) + \sum_{j=1}^M v_j \cdot Cov(R_U(\mathbf{x}_\beta), R_U(\mathbf{x}_j)) + \mu_2 = \\
&= Cov(R_U(\mathbf{x}_\beta), R(\mathbf{x})), \quad \beta = 1, \dots, M \\
&\sum_{i=1}^N w_i = 1, \quad \sum_{j=1}^M v_j = 0
\end{aligned} \right. \tag{37.}$$

Oprócz kokrigingu prostego i zwykłego istnieje wiele innych odmian kokrigingu, analogicznych do odpowiednich metod krigingu, jak na przykład kokriging wskaźnikowy (Vauclin i inni, 1983; Stein i inni, 1991; Rivoirard, 2001;).

### 3.1.11 Liniowy model koregionalizacji

Kokriging może być wykorzystany tylko wtedy, gdy znany jest model wariogramu zmiennej głównej  $Z(\mathbf{x})$ , modele wariogramów  $l$  zmiennych dodatkowych  $U_t(\mathbf{x})$  ( $t = 1, \dots, l$ ) oraz modele odpowiednich wariogramów krzyżowych. Dodatkowo muszą one spełniać założenia liniowego modelu koregionalizacji (ang. *linear model of co-regionalization*) (De Iaco i inni, 2003; Zawadzki, 2003; Lark i Papritz, 2003; Larocque i inni, 2007). W najprostszym przypadku, gdy jest używana tylko jedna zmienna dodatkowa  $U(\mathbf{x})$ ,

wykonuje się modele wariogramów  $\gamma_Z(\mathbf{h})$  i  $\gamma_U(\mathbf{h})$ , odpowiednio dla zmiennej głównej i dodatkowej, oraz model  $\gamma_{ZU}(\mathbf{h})$  wariogramu krzyżowego:

$$\begin{aligned}\gamma_Z(\mathbf{h}) &= u_0\gamma_0(\mathbf{h}) + u_1\gamma_1(\mathbf{h}) + \dots + u_m\gamma_m(\mathbf{h}) \\ \gamma_U(\mathbf{h}) &= g_0\gamma_0(\mathbf{h}) + g_1\gamma_1(\mathbf{h}) + \dots + g_m\gamma_m(\mathbf{h}) \\ \gamma_{ZU}(\mathbf{h}) &= s_0\gamma_0(\mathbf{h}) + s_1\gamma_1(\mathbf{h}) + \dots + s_m\gamma_m(\mathbf{h})\end{aligned}\quad (38.)$$

Powyższy układ równań musi być określony dodatnio, aby możliwe było zastosowanie kokrigingu. Muszą być spełnione następujące zależności:  $u_0, u_1, \dots, u_m > 0$  i  $g_0, g_1, \dots, g_m > 0$  oraz  $u_i \cdot g_i > s_i^2$  dla  $i = 0, 1, \dots, m$ . W przypadku, gdy integrowana jest większa liczba danych dodatkowych, spełnienie założeń liniowego modelu koregionalizacji staje się trudniejsze. Liczba wariogramów koniecznych do wymodelowania rośnie szybko z liczbą zmiennych dodatkowych. Dla  $l-1$  zmiennych dodatkowych jest konieczne łączne wymodelowanie  $\frac{1}{2} l(l+1)$  wariogramów i wariogramów krzyżowych tak, aby spełniały założenia liniowego modelu koregionalizacji (Goovaerts, 2001; Zawadzki, 2003).

### 3.1.12 Metoda Co\_Est

Metoda *Co\_Est* jest przykładem prostej techniki integracji danych. Pozwala na dokonanie integracji danych w przypadku zbiorów danych o małej liczności (Abbaspour i inni, 1998), dla których to zbiorów integracja danych pomiarowych metodą kokrigingu może być bardzo utrudniona lub też niemożliwa. W metodzie *Co\_Est* można wyróżnić kilka etapów:

- i. W pierwszym etapie jest konieczne znalezienie zależności regresyjnej, łączącej zmienną główną  $Z(\mathbf{x})$  z  $l$  zmiennymi dodatkowymi  $U_t(\mathbf{x})$ ,  $t = 1, \dots, l$ . Zależność taka jest często określana mianem funkcji pedotransferowej (Wosten, 1995; Salchow i inni, 1996). Określenie funkcji pedotransferowej jest możliwe metodami regresji lub też przy wykorzystaniu innych technik, jak na przykład sieci neuronowych.

$$Z(\mathbf{x}) = \beta_0 + \sum_{l=1}^l \beta_l U_l(\mathbf{x}) + \varepsilon \quad (39.)$$

gdzie:  $\beta_0, \beta_k$  – stałe,  $\varepsilon$  – zmienna o średniej zero i wariancji  $\sigma$ .

- ii. Gdy zostanie określona zależność regresyjna pomiędzy zmienną główną  $Z(\mathbf{x})$ , a zmiennymi dodatkowymi  $U(\mathbf{x})$ , można na jej podstawie wyliczyć wartości zmiennej głównej  $Z(\mathbf{x})$  w miejscach, w których były próbowane tylko zmienne dodatkowe  $U(\mathbf{x})$ . W wyniku tego, zostaje znacznie powiększony zbiór danych zmiennej głównej  $Z(\mathbf{x})$ .

- iii. W następnym kroku jest możliwe wykonanie wariogramu na podstawie powiększonego zbioru danych zmiennej głównej  $Z(\mathbf{x})$ , a następnie wykonanie rozkładu przestrzennego metodą krigingu zwykłego lub prostego.

Zaletą metody *Co\_Est* jest to, konieczność modelowania tylko jednego wariogramu dla zmiennej głównej  $Z(\mathbf{x})$ , bez konieczności modelowania wariogramów krzyżowych, jak wymaga się w metodzie kokrigingu. Jest jednak wymagane, aby zmienna główna  $Z(\mathbf{x})$  i zmienne dodatkowe  $U(\mathbf{x})$  były próbkowane w różnych punktach pomiarowych.

### 3.1.13 Błędy estymacji

W celu oceny i wzajemnego porównania rozkładów przestrzennych w pracy wykorzystywano kilka rodzajów błędów estymacji.

- i. Średni błąd estymacji (ang. *mean prediction error, ME*) – jest średnią wartością z różnic pomiędzy wartościami zmierzonymi, a wyestymowanymi. Wartość tego błędu powinna być jak najmniejsza. Wartość błędu jest wyrażana w tych samych jednostkach co estymowane wartości.
- ii. Standaryzowany średni błąd estymacji (ang. *standardized mean prediction error, SME*) – jest to standaryzowana wartość średniego błędu estymacji. Wartość błędu powinna być jak najbliższa zeru. Wartość błędu jest wielkością bezwymiarową.
- iii. Standaryzowany spierwiastkowany średniokwadratowy błąd estymacji (ang. *standardized root mean square prediction error, SRMSE*) jest to standaryzowana wartość pierwiastka, ze średniej wartości kwadratu różnic pomiędzy wartościami zmierzonymi, a wyestymowanymi. Wartość błędu powinna być jak najbliższa jedności. Wartość błędu jest wielkością bezwymiarową.

## 3.2 Pomiary terenowe i laboratoryjne

Na wybranych obszarach pomiarowych wykonano serie pomiarowe, obejmujące objętościową podatność magnetyczną gleby, masową podatność magnetyczną gleby (Magiera, 2004) oraz zawartość poszczególnych metali ciężkich w glebie. Objętościowa podatność magnetyczna była mierzona w terenie, natomiast podatność masowa w laboratorium, na podstawie pobranych próbek glebowych.

Podczas poboru próbek stosowano układ współrzędnych geograficznych WGS84. Ze względu na to, że układ współrzędnych WGS84 nie jest układem metrycznym, do analiz

i obliczeń współrzędne były przeliczane, w zależności od skali pomiarowej, do układów 1992 lub 2000 (*Przewłocki, 2000*).

Pomiary terenowe zostały wykonane przy współpracy dwóch ośrodków naukowych: Instytutu Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk w Zabrze oraz Zakładu Informatyki i Badań Jakości Środowiska Politechniki Warszawskiej. W przypadku niektórych powierzchni pomiarowych zostały wykorzystane archiwalne próbki glebowe, udostępnione przez Państwowy Instytut Geologiczny.

### 3.2.1 *Pomiary zawartości metali ciężkich w glebie*

Dla powierzchni pomiarowej *Lasy Błędownskie*, której opis zawarto w Załączniku nr 1, oznaczenia zawartości metali ciężkich wykonano na podstawie profili glebowych pobranych przez Państwowy Instytut Geologiczny (*Lis, 1992; Lis i Pasieczna, 1995*).

Próbki o masie około 0,5 kg pobierano za pomocą ręcznej sondy o średnicy około 8 cm z głębokości od 0 cm do 20 cm. Próbki gleby zostały wysuszone w temperaturze pokojowej i przesiane przez sito o wielkości oczka równej 1 mm. Następnie próbki glebowe zostały przesiane na mokro przez sito (0,2 mm) i zmineralizowane przy użyciu 1:5 HCl w temperaturze 90°C przez 1 godzinę. W końcowym efekcie otrzymane zostały próbki analityczne o wadze 100 g. Następnie, przy użyciu spektrometrii mas ze wzbudzeniem w plazmie indukcyjnie sprzężonej (ICP-MS), została wyznaczona zawartość poszczególnych metali ciężkich w glebie.

Dla pozostałych powierzchni pomiarowych, wyszczególnionych w Załączniku nr 1, pomiary chemiczne były wykonywane na podstawie pobranych w terenie profili glebowych o długości 30 cm. Z każdego profilu glebowego do analiz wybierano odcinek, dla którego były obserwowane podwyższone wartości podatności magnetycznej, wynikające z zanieczyszczenia antropogenicznego. Następnie, próbka glebowa była przesiewana przez sito o średnicy oczek 1 mm i mineralizowana na gorąco przy wykorzystaniu 2M HNO<sub>3</sub>. Zawartość poszczególnych metali ciężkich w glebie oznaczano metodą absorpcyjnej spektrometrii masowej (ASA).

### 3.2.2 *Pomiary podatności magnetycznej gleby miernikiem MS2D Bartington*

Miernik MS2D Bartington jest częścią systemu pomiarowego Bartington MS2 (*Dearing, 1994*). Miernik MS2D został zaprojektowany specjalnie do wykonywania terenowych pomiarów podatności magnetycznej. Zbudowano go z wytrzymałego tworzywa,

dzięki czemu jest mało podatny na uszkodzenia mechaniczne oraz odporny na działanie niekorzystnych warunków środowiskowych.



**Rysunek 3.2. Miernik MS2D Bartington oraz przykład pomiaru terenowego**

**Figure 3.2. MS2D Bartington device and exemple of field measurement**

Podczas wykonywania pomiarów miernikiem MS2D jest konieczne wybranie jednostek oraz zakresu pomiarowego. Przed wykonaniem pomiaru przyrząd musi zostać także wyzerowany. W tym celu jest wykonywany pomiar z przyrządem trzymany w powietrzu, w odległości przynajmniej 1 m od powierzchni ziemi oraz innych przedmiotów. Po wyzerowaniu jest możliwe wykonywanie pomiarów podatności na powierzchni gleby.

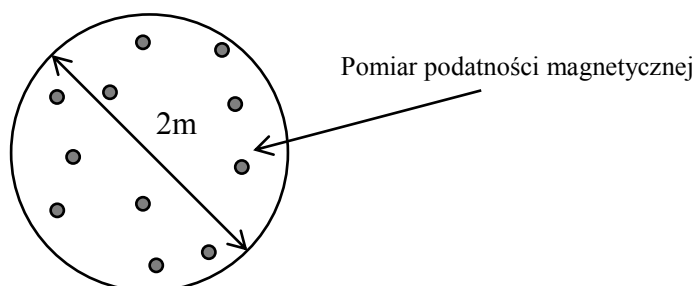
**Tabela 3.1. Specyfikacja miernika MS2D Bartington**

**Table 3.1. Specification of MS2D Bartington device**

<b>Rozdzielczość</b>	2·10 <sup>-6</sup> SI
<b>Częstotliwość pracy</b>	0,985 kHz
<b>Czas pomiaru</b>	0,5 s – czułość 1,0·10 <sup>-6</sup> SI; 5 s – czułość 0,1·10 <sup>-6</sup> SI
<b>Zasięg penetracji</b>	50% sygnału z głębokości 1,5 cm, 90% z 6 cm, 100% z 10 cm
<b>Rozmiary</b>	średnica – 18,5 cm, wysokość – 100 cm
<b>Waga</b>	0,4 kg

Przyrząd pomiarowy MS2D może pracować w dwóch trybach. Pierwszym z nich jest tryb pomiaru pojedynczego, kiedy to w celu wykonania każdego kolejnego pomiaru należy nacisnąć przycisk *Pomiar*. W drugim trybie przyrząd pracuje w sposób ciągły, a podatność magnetyczna jest mierzona bez przerwy. Po przyłożeniu przyrządu do powierzchni gleby jest zapamiętywana maksymalna zmierzona wartość podatności magnetycznej. W pomiarach terenowych, których wyniki wykorzystano w pracy, był używany tylko tryb pomiaru pojedynczego.

Podatność magnetyczna gleby była mierzona w punkcie pomiarowym na jeden z dwóch sposobów. W przypadkach, gdy na badanej powierzchni średnie odległości pomiędzy punktami pomiarowymi były małe (od kilku do kilkunastu metrów), w wybranej lokalizacji punktu pomiarowego wykonywano tylko pojedynczy pomiar podatności magnetycznej. W przypadkach, gdy średnie odległości pomiędzy punktami pomiarowymi były duże (większe od kilkudziesięciu metrów) w wybranej lokalizacji wykonywano od 10 do 15 pojedynczych pomiarów, w kole o promieniu około 2 m, w środku którego umieszczano odbiornik GPS.



**Rysunek 3.3. Procedura pomiaru podatności magnetycznej miernikiem MS2D Bartington**

**Figure 3.3. Procedure of measurement performed with MS2D Bartington device**

Po wykonaniu serii pomiarów była obliczana wartość średnia z kilkunastu pomierzonych wartości i przyjmowana jako wartość podatności magnetycznej w danym punkcie pomiarowym. W niektórych przypadkach, w analizach wykorzystywano wszystkie pomiary bez uśredniania. W dalszej części pracy przypadki tego typu analiz zostały wyraźnie zaznaczone, a wykorzystanie nieuśrednionych danych pomiarowych uzasadnione.

### 3.2.3 *Pomiary podatności magnetycznej gleby miernikiem MS2F Bartington*

Miernik Bartington MS2F jest częścią systemu Bartington MS2, podobnie jak miernik MS2D (Dearing, 1994). Sposób wykonywania pomiaru jest analogiczny jak w przypadku miernika MS2D.

**Tabela 3.2. Specyfikacja miernika MS2F Bartington**

**Table 3.2. Specification of MS2F Bartington device**

<b>Częstotliwość pracy</b>	0,58 kHz
<b>Zasięg penetracji</b>	6 mm od końca i 4,5 mm od ścianek bocznych
<b>Rozmiary</b>	średnica – 35 mm, wysokość – 85 mm
<b>Waga</b>	0,5 kg

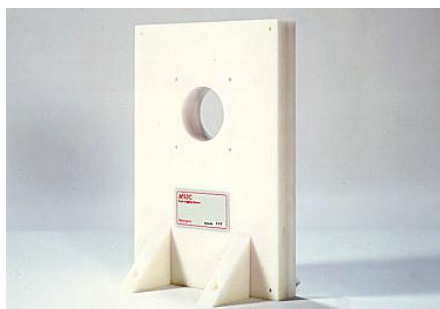


**Rysunek 3.4. Miernik Bartington MS2F**

**Figure 3.4. MS2F Bartington devices**

### 3.2.4 Pomiary podatności magnetycznej gleby miernikiem MS2C Bartington

Miernik MS2C Bartington (Dearing, 1994) był wykorzystywany do laboratoryjnych pomiarów podatności magnetycznej w profilu glebowym. Przed wykonaniem pomiaru przyrząd musiał zostać wyzerowany przez pomiar podatności magnetycznej powietrza. W celu wykonania pomiaru podatności magnetycznej gleby, tuby z profilem glebowym pobranym w terenie były umieszczane na podajniku i przesuwane przez otwór przyrządu. Średnica otworu miernika MS2C może być zmieniana w zakresie od 36 mm do 162 mm, w zależności od rozmiarów pobranych profili glebowych.



**Rysunek 3.5. Miernik MS2C Bartington**

**Figure 3.5. MS2C Bartington device**

Profil glebowy przesuwano z pewnym interwałem, którego zakres był dobierany w zależności od wymaganego stopnia wygładzenia wykresów podatności magnetycznej względem głębokości w profilu glebowym.

**Tabela 3.3. Specyfikacja miernika MS2C Bartington**

**Table 3.3. Specification of MS2C Bartington device**

<b>Rozdzielczość</b>	$2 \cdot 10^{-6}$ SI
<b>Dokładność kalibracji</b>	5%
<b>Czas pomiaru</b>	0,9 s – czułość $1,0 \cdot 10^{-6}$ SI; 9 s – czułość $0,1 \cdot 10^{-6}$ SI
<b>Częstotliwość pracy</b>	0,565 kHz
<b>Rozmiary</b>	29 – 20 – 14,4 cm
<b>Waga</b>	2,0 – 2,5 kg

W przypadku pomiarów wykonywanych za pomocą przyrządu MS2C było konieczne zwrócenie uwagi na możliwość wystąpienia tzw. efektu końcowego. Polega on na tym, że odczyty podatności magnetycznej, wykonywane na końcach pobranego profilu glebowego, mogą być zaniżone, gdyż jest mierzona również podatność magnetyczna powietrza. Na końcowym centymetrze profilu glebowego mierzone wartości podatności magnetycznej mogą być zredukowane nawet o około 50%.

### 3.2.5 Pomiary podatności magnetycznej gleby miernikiem MS2B Bartington

Miernik MS2B Bartington (Dearing, 1994) wykorzystywano do pomiarów masowej podatności magnetycznej gleby. Wykonywano pomiary próbek analitycznych o objętości około 10 cm<sup>3</sup>. Próbki glebowe mogą być mokre, ale w razie potrzeby jest możliwe ich wysuszenie w temperaturze pokojowej 25°C lub w piecu, w temperaturze do 35°C. Jednak w pewnych przypadkach podczas suszenia próbek glebowych może dojść do pewnych zmian mineralogicznych. Wtedy pomiar powinien być wykonywany na próbkach mokrych i porównywany z pomiarem wykonanym na próbce wysuszonej.

**Tabela 3.4. Specyfikacja miernika MS2B Bartington**

**Table 3.4. Specification of MS2B Bartington device**

<b>Rozdzielczość</b>	2·10 <sup>-6</sup> SI
<b>Dokładność kalibracji</b>	1%
<b>Czas pomiaru</b>	1,2 s – czułość 1,0·10 <sup>-6</sup> SI; 12 s – czułość 1,0·10 <sup>-6</sup> SI
<b>Częstotliwość pracy</b>	0,465 kHz i 4,65 kHz
<b>Rozmiary</b>	20 – 11 – 11 cm
<b>Waga</b>	0,8 kg



**Rysunek 3.6. Miernik MS2B Bartington**

**Figure 3.6. MS2B Bartington device**



### 3.2.6 Pomiary podatności magnetycznej gleby miernikiem SM-30

Miernik SM-30 jest małym, łatwym do przenoszenia przyrządem do pomiaru podatności magnetycznej. Pomiar miernikiem SM-30 polegał na przyłożeniu miernika do badanej powierzchni gleby i wykonaniu odczytu podatności magnetycznej.

Tabela 3.5. Specyfikacja miernika SM-30

Table 3.5. Specification of SM-30 device

<b>Rozdzielczość</b>	2·10 <sup>-6</sup> SI
<b>Częstotliwość pracy</b>	9 kHz
<b>Zasięg penetracji</b>	20 mm
<b>Rozmiary</b>	100 – 65 – 25 mm
<b>Waga</b>	0,18 kg



Rysunek 3.7. Miernik SM-30

Figure 3.7. SM-30 device

### 3.2.7 Pomiary podatności magnetycznej gleby miernikiem SM-400

Miernik SM-400 (Petrovsky i inni, 2004) był wykorzystywany do pomiarów terenowych podatności magnetycznej w profilu glebowym. Proces pomiarowy jest bardziej skomplikowany i czasochłonny w porównaniu z pomiarami podatności magnetycznej na powierzchni gleby. W celu wykonania pomiaru, oprócz przyrządu SM-400 jest też potrzebny laptop oraz urządzenie do wykonania otworu w glebie.

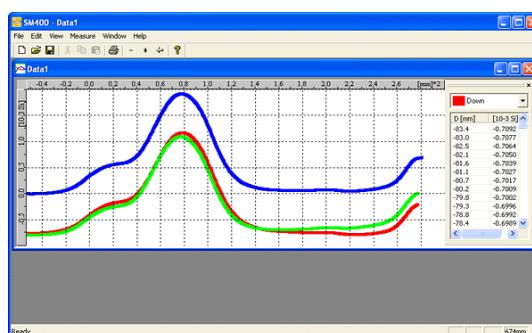


Rysunek 3.8. Pomiar podatności magnetycznej w profilu glebowym miernikiem SM-400 (powierzchnia pomiarowa *Szczyrkowice*)

Figure 3.8. Magnetic susceptibility measurement in soilprofile with SM-400 device (study area *Szczyrkowice*)

SM-400 jest przyrządem zaprojektowanym do wykonywania pomiarów podatności magnetycznej do głębokości około 30 cm. Zwykle pomiar taki towarzyszy pobraniu profilu glebowego, którego długość wynosi także 30 cm. Po wykonaniu otworu w glebie, SM-400 jest umieszczany w otworze i można wykonać pomiar podatności magnetycznej.

W celu zredukowania wpływu temperatury na indukcyjność miernika, pomiar jest wykonywany dwukrotnie. Miernik, umieszczony w plastikowej tubie, przesuwa się w głąb profilu glebowego i następnie, po dotarciu do dna otworu, z powrotem w kierunku powierzchni gleby. Podczas ruchu w obie strony jest wykonywany pomiar ciągły podatności magnetycznej, a dane są przesyłane do komputera. Dodatkowo, w wielu przypadkach można założyć, że temperatura gleby jest stosunkowo stabilna.



**Rysunek 3.9.** Podatność magnetyczna względem głębokości zmierzona miernikiem SM-400, podczas ruchu sensora: w dół, ku górze i średnia z nich - odpowiednio wykresy zielony, czerwony i niebieski

**Figure 3.9.** Result of the measurement performed with SM-400. Green, red and blue plots shows: magnetic susceptibility against the depth, measured when the sensor moves up, down and average

Wynikiem pomiaru są trzy wykresy podatności magnetycznej w profilu glebowym. Pierwszy obrazuje wyniki pomiaru podczas ruchu miernika w głąb profilu glebowego, drugi podczas ruchu powrotnego ku powierzchni gleby, trzeci natomiast jest średnią z dwóch powyższych.

**Tabela 3.6.** Specyfikacja przyrządu SM400

**Table 3.6.** Specification of SM-400 device

<b>Rozdzielczość</b>	1 · 10 <sup>-5</sup> SI
<b>Rozmiar skrzyni transportowej</b>	100 – 60 – 25 mm
<b>Waga ze skrzynią</b>	9,3 kg
<b>Częstotliwość pracy</b>	8 kHz
<b>Czas pomiaru</b>	90 s
<b>Średnica tuby</b>	40 mm
<b>Temperatura pracy</b>	-20°C do 50°C
<b>Zasilanie</b>	12V DC
<b>Czas pracy na baterii</b>	20 h
<b>Komunikacja z komputerem</b>	RS 232

## 4 Sieci pomiarowe w magnetometrii terenowej

Do tej pory metody geostatystyczne były wielokrotnie wykorzystywane do określania sieci pomiarowych (*Dulaney i inni, 1994; Caeiro i inni, 2002; Chappell i inni, 2002*). Jednym z najczęściej używanych geostatystycznych sposobów planowania pomiarów jest analizowanie zmienności przestrzennej badanego zjawiska. Metody geostatystyczne pozwalają na dokładne zbadanie charakteru korelacji przestrzennych oraz na określenie charakterystycznych dla badanego zjawiska parametrów korelacji przestrzennych. Dodatkowo, jest możliwe wykrycie czynników pomiarowych i środowiskowych, które mogą istotnie wpływać na korelacje przestrzenne. Do tej pory wykonywano wiele prac (*Webster i Oliver, 1992; van Groenigen, 2000; Hengl i inni, 2003; Kirwan i inni, 2004; Kupfersberger i inni, 1998; Marchant i Lark, 2007; Zawadzki, 2005, 2006*), w których z powodzeniem wykorzystywano geostatystyczne badania korelacji przestrzennych do planowania pomiarów, związanych z monitoringiem zanieczyszczeń gleb.

Każde ze zjawisk przestrzennych, w tym omawiane w pracy zanieczyszczenie gleb metalami ciężkimi oraz podatność magnetyczna gleby, są charakteryzowane przez korelacje przestrzenne. Zarówno charakter, jak i zasięg korelacji przestrzennych najczęściej zależą od wielu czynników bezpośrednio związanych z badanym zjawiskiem. W przypadku zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi, spowodowanego działalnością przemysłową, ważniejszymi czynnikami wpływającymi na zmienność przestrzenną mogą być: typ gleby, rodzaj wykorzystania terenu, typ lasu.

Niniejsza część pracy jest związana z celem badawczym, dotyczącym określenia sposobu wykorzystania metod geostatystycznych w magnetometrii terenowej do wytyczania sieci pomiarowych. W tym celu zbadano wpływ najbardziej istotnych czynników, które mogą w znaczący sposób warunkować zmienność przestrzenną podatności magnetycznej gleb. Przeanalizowano różnice w korelacjach przestrzennych, charakteryzujących podatność magnetyczną, zmierzoną na terenach porośniętych przez lasy o różnego typu drzewostanie oraz zmierzoną na terenach o różnym typie gleby.

W celu osiągnięcia zakładanego celu badawczego, wykonano badania korelacji przestrzennych podatności magnetycznej, zmierzonej na wielu obszarach pomiarowych rozmieszczonych na terenie GOP. Obszary te miały powierzchnie od kilku metrów kwadratowych do kilkudziesięciu tysięcy kilometrów kwadratowych. Dodatkowo, zostały wykorzystane pomiary podatności magnetycznej wykonywane z różną gęstością. Postępowanie takie pozwoliło na określenie charakterystycznych parametrów korelacji

przestrzennych, w tym najbardziej typowych dla podatności magnetycznej zasięgów korelacji przestrzennych.

Wykorzystując tak wyznaczone zasięgi korelacji przestrzennych podatności magnetycznej, wybrano zbiory danych o odpowiednich średnich odległościach pomiędzy punktami pomiarowymi. Na podstawie wybranych zbiorów danych, wykonano rozkłady przestrzenne podatności magnetycznej i następnie porównano z rozkładami przestrzennymi, które sporządzono uwzględniając inne gęstości pomiarowe. Na tej podstawie możliwe było zweryfikowanie korzyści, jakie może dać wykorzystanie charakterystycznych zasięgów korelacji w planowaniu sieci pomiarowych podatności magnetycznej gleby.

#### **4.1 Badania zmienności przestrzennej podatności magnetycznej**

##### *4.1.1 Wpływ podłoża glebowego na zmienność przestrzenną podatności magnetycznej*

Zmienność przestrzenna podatności magnetycznej gleb wybranego obszaru, została zbadana na podstawie pomiarów wykonanych na sześciu powierzchniach pomiarowych, które wymieniono w tabeli 4.1., a szczegółowy opis zawarto w Załączniku nr 1.

W przypadku największych terytorialnie obszarów, *Województwo Śląskie* oraz *GOP*, pomiary podatności magnetycznej zostały pogrupowane ze względu na gleby:

- i. wytworzone z piasków,
- ii. wytworzone z glin zwałowych,
- iii. wytworzone z pyłów,
- iv. wytworzone z torfów.

Ponad 90% wszystkich punktów pomiarowych podatności magnetycznej było położonych na glebach wytworzonych z piasków lub glin zwałowych. Na glebach powstałych z pyłów i torfów wykonano niewiele pomiarów, co uniemożliwiało wykonanie precyzyjnych wariogramów i zbadanie zmienności przestrzennej podatności magnetycznej. W związku z tym, w dalszych analizach wykorzystano tylko te pomiary podatności magnetycznej, które zostały wykonane na glebach wytworzonych z piasków i glin zwałowych.

W celu uproszczenia zapisu, w dalszej części tekstu oraz na rysunkach, stosowano określenia gleby piaszczyste i gleby gliniaste, odpowiednio dla gleb wytworzonych z piasków i z glin zwałowych.

W przypadku obszaru pomiarowego *Województwo Śląskie* zostały wykorzystane dwa zbiory pomiarów podatności magnetycznej. Pierwszy zbiór, oznaczany jako *Województwo Śląskie A*, obejmował pomiary, wykonane w punktach pomiarowych odległych od siebie

średnio o 12 km. Dla drugiego zbioru danych, oznaczanego jako *Województwo Śląskie B*, średnia odległość pomiędzy punktami pomiarowymi wynosiła 6 km.

**Tabela 4.1. Dane wykorzystane w analizie zmienności przestrzennej podatności magnetycznej**

**Table 4.1. Data sets used in the analysis of spatial variability of magnetic susceptibility**

Obszar pomiarowy	Zbiór danych	Powierzchnia	Średnia odległość pomiędzy punktami pomiarowymi	Liczba pomiarów
<i>Województwo Śląskie</i>	<i>Województwo Śląskie A</i>	23500 km <sup>2</sup>	12 km	185
	<i>Województwo Śląskie B</i>	23500 km <sup>2</sup>	6 km	732
<i>GOP</i>	<i>GOP A</i>	4000 km <sup>2</sup>	4 km	249
	<i>GOP B</i>	2500 km <sup>2</sup>	2 km	589
	<i>Mikołów</i>	210 km <sup>2</sup>	1 km	221
	<i>Makosów</i>	4,5 km <sup>2</sup>	200 m	74
	<i>Rudziniec Las Bukowy</i>	0,05 km <sup>2</sup>	kilka m	309
	<i>Rudziniec Pole Pszenicy</i>	~ 3 m <sup>2</sup>	kilka cm	41

Podobnie w przypadku powierzchni pomiarowej *GOP* wykorzystano dwa zbiory danych pomiarowych podatności magnetycznej gleby. Dla pierwszego zbioru danych, oznaczanego jako *GOP A*, średnia odległość pomiędzy punktami pomiarowymi wynosiła 4 km, a dla drugiego zbioru danych, oznaczanego jako *GOP B*, 2 km.

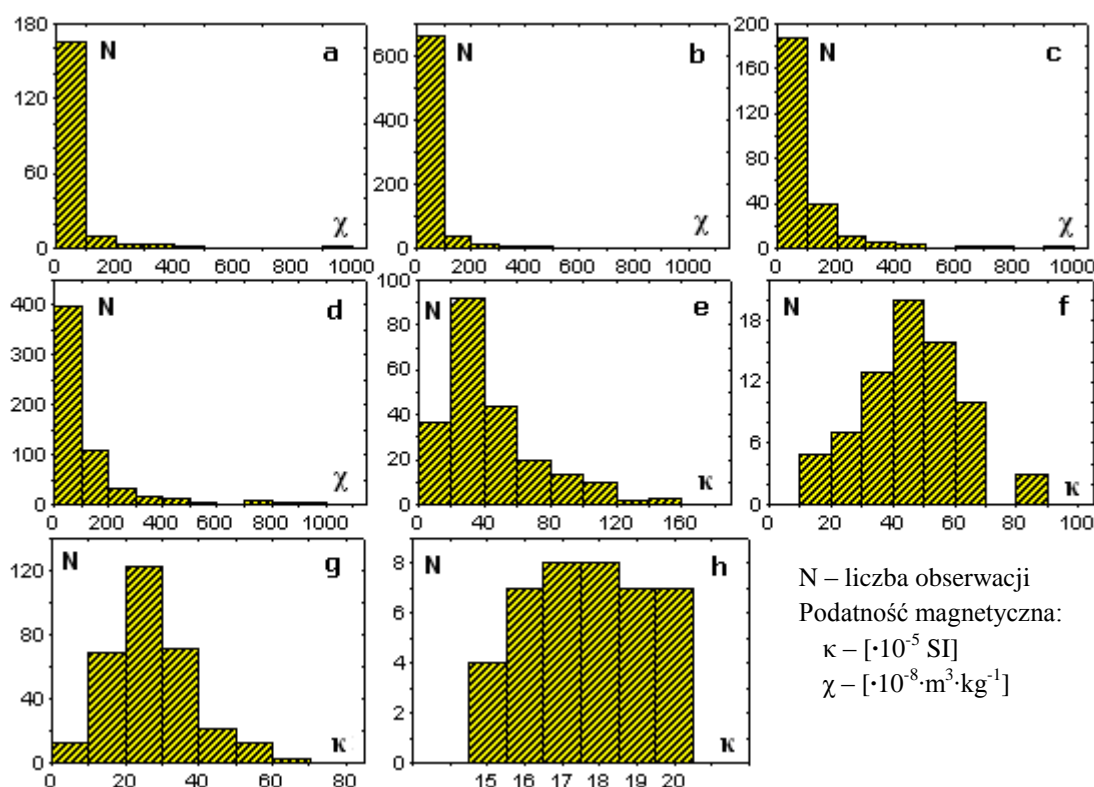
Na obszarach pomiarowych *Województwo Śląskie* oraz *GOP* wykonano pomiary masowej podatności magnetycznej  $\chi$  przy użyciu miernika MS2B Bartington. Na pozostałych obszarach wykonywano wyłącznie pomiary terenowe objętościowej podatności magnetycznej  $\kappa$  miernikiem MS2D Bartington. Pomiary były przeprowadzane zgodnie z metodyką opisaną w rozdziale poświęconym metodom badawczym.

W przypadku obszaru pomiarowego *Rudziniec Las Bukowy* średnie odległości pomiędzy punktami pomiarowymi wynosiły około kilku metrów. W związku z tym, w punkcie pomiarowym był wykonywany tylko jeden pomiar zamiast serii pomiarów w kole o promieniu 2 m.

Na obszarze pomiarowym *Rudziniec Pole Pszenicy* została wykonana seria pomiarów w tylko jednym punkcie pomiarowym, w kole o promieniu około 2 m. Powodem takiego sposobu opróbowania była chęć zbadania zmienności przestrzennej podatności magnetycznej w najmniejszej skali, w obrębie jednego punktu pomiarowego.

Rezultaty pomiarów pokazały, że najwyższe wartości podatności magnetycznej były obserwowane w rejonach silnie zurbanizowanych, co w największym stopniu dotyczyło obszaru pomiarowego *GOP*. W rejonach tych obserwowano znacznie wyższe wartości wariancji mierzonej podatności magnetycznej w porównaniu z obszarami leśnymi.

Było to głównie wynikiem większej zmienności przestrzennej, charakteryzującej opad pyłów oraz dużej ilości źródeł zanieczyszczeń na obszarach zurbanizowanych.



**Rysunek 4.1.** Histogramy masowej  $\chi$  i objętościowej  $\kappa$  podatności magnetycznej dla zbiorów danych: a – Województwo Śląskie A, b – Województwo Śląskie B, c – GOP A, d – GOP B, e – Mikołów, f – Makoszków, g – Rudziniec Las Bukowy, h – Rudziniec Pole Pszenicy

**Figure 4.1.** Histograms of mass  $\chi$  and volume  $\kappa$  magnetic susceptibility for data sets: a – Województwo Śląskie A, b – Województwo Śląskie B, c – GOP A, d – GOP B, e – Mikołów, f – Makoszków, g – Rudziniec Las Bukowy, h – Rudziniec Pole Pszenicy

Najbardziej skośne rozkłady wartości podatności magnetycznej (rys. 4.1.) obserwowano w przypadku największych obszarów: *Województwo Śląskie* oraz *GOP*. Silna prawostronna skośność była spowodowana ekstremalnymi wartościami podatności magnetycznej, które zostały zmierzone na terenach zurbanizowanych. Skośność rozkładów podatności magnetycznej, zmierzonej na mniej rozległych obszarach (*Mikołów*, *Makoszków*, *Rudziniec Las Bukowy*), była wyraźnie mniejsza. Na obszarach tych, znacznie rzadziej obserwowano bardzo wysokie wartości podatności magnetycznej, związane z silnym zanieczyszczeniem antropogenicznym.

Wariogram podatności magnetycznej, dla zbioru danych *Województwo Śląskie A* (rys. 4.2.), został wymodelowany przy wykorzystaniu dwóch struktur zagnieżdżonych, efektu samorodka i modelu sferycznego. Wartość efektu samorodka wynosiła 0,62 i była prawie o 60% wyższa od nasycenia modelu sferycznego, wynoszącego 0,37.

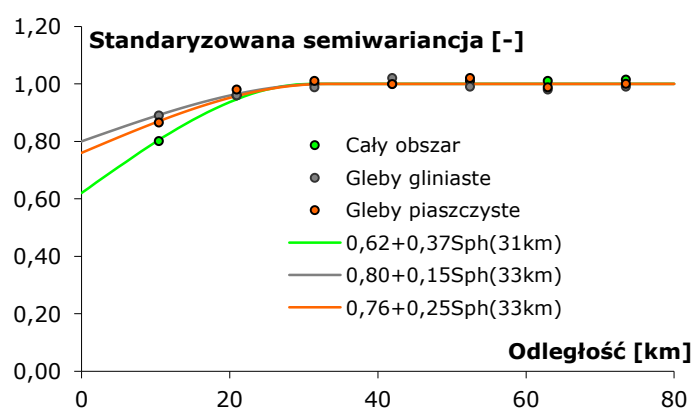
Obserwacje takie potwierdziły, że duża część zmienności przestrzennej podatności magnetycznej była związana z odległościami mniejszymi niż 12 km.

**Tabela 4.2. Statystyki opisowe zbiorów danych podatności magnetycznej. Dla obszarów Województwo Śląskie oraz GOP uwzględniono podział na gleby wytworzone z piasków i glin zwałowych.**

**Table 4.2. Descriptive statistics of magnetic susceptibility data sets. For areas Województwo Śląskie and GOP values were grouped considering soils developed from sands and clays.**

Zbiór danych		Średnia	Mediana	Odchylenie standardowe	Skośność	Minimum	Maksimum
		[ $\cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ]			[-]	[ $\cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ]	
Województwo Śląskie A	Wszystkie	47,7	21,6	95,5	5,43	0,0	903
	Piaszczyste	41,6	15,6	110,4	5,93	0,0	903
	Gliniaste	54,6	28,3	75,5	2,99	2,9	414
Województwo Śląskie B	Wszystkie	45,9	21,0	85,2	5,54	1,0	942
	Piaszczyste	30,8	15,9	62,7	8,97	0,0	903
	Gliniaste	62,0	27,9	101,6	4,21	2,0	942
GOP A	Wszystkie	87,1	44,7	118,6	3,47	0,2	905
	Piaszczyste	49,9	32,2	51,4	2,43	0,3	289
	Gliniaste	104,4	54,6	136,0	2,98	0,2	905
GOP B	Wszystkie	112,6	57,7	154,2	3,05	1,3	971
	Piaszczyste	56,9	35,8	75,4	5,05	1,3	706
	Gliniaste	104,4	54,6	136,0	2,98	0,2	905
		[ $\cdot 10^{-5} \text{ SI}$ ]			[-]	[ $\cdot 10^{-5} \text{ SI}$ ]	
Mikołów		44,1	35,6	28,9	1,41	2,6	149
Makosów		45,3	44,5	15,9	0,16	11,8	84,6
Rudziniec Las Bukowy		27,8	27,0	11,0	0,56	1,0	64,0
Rudziniec Pole Pszenicy		17,7	18,0	1,61	-0,06	15,0	20,0

Zmienność ta jednak, ze względu na sieć pomiarową o zbyt małej gęstości, została zawarta głównie w efekcie samorodka i było niemożliwe bardziej szczegółowe określenie jej charakteru. Zmienność przestrzenna podatności magnetycznej całego obszaru Województwo Śląskie charakteryzowała się zasięgiem korelacji wynoszącym około 31 km.



**Rysunek 4.2. Standaryzowane wariogramy eksperymentalne oraz ich modele dla podatności magnetycznej zmierzonej w serii pomiarowej Województwo Śląskie A**

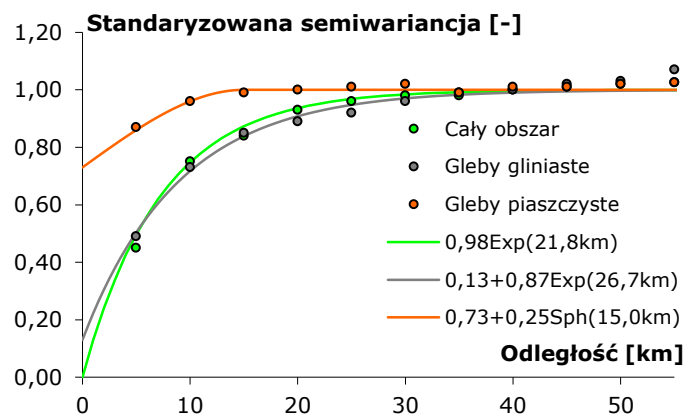
**Figure 4.2. Standardized experimental variograms and its models for magnetic susceptibility measured in series Województwo Śląskie A**

Wykorzystując zbiór danych *Województwo Śląskie A*, zbadano także zmienność przestrzenną podatności magnetycznej, mierzonej na glebach piaszczystych oraz na glebach gliniastych. W każdym z przypadków obserwowano bardzo wysokie wartości efektu samorodka, które wynosiły 0,80 oraz 0,76, odpowiednio dla wariogramu podatności magnetycznej mierzonej na glebach gliniastych i glebach piaszczystych. Wartości te były wyższe niż efekt samorodka wariogramu dla wszystkich pomiarów podatności magnetycznej z obszaru *Województwo Śląskie A* (rys. 4.2.). Spowodowane było to zbyt dużymi odległościami pomiędzy punktami pomiarowymi podatności magnetycznej. Dodatkowo, zarówno punkty pomiarowe położone na glebach piaszczystych, jak i te położone na glebach gliniastych, były rozmieszczone na badanym obszarze w sposób znacznie mniej regularny w porównaniu z wszystkimi punktami pomiarowymi podatności magnetycznej. Zarówno w przypadku podatności magnetycznej mierzonej na glebach piaszczystych, jak i gliniastych obserwowano podobny zasięg korelacji, wynoszący około 33 km.

Model wariogramu dla zbioru danych *Województwo Śląskie B* został wykonany na podstawie pomiarów w punktach odległych od siebie średnio o 6 km. Wariogram podatności magnetycznej charakteryzował się zerowym efektem samorodka. Podobnie niski efekt samorodka, wynoszący 0,13, był obserwowany dla wariogramu podatności magnetycznej mierzonej na glebach gliniastych (rys. 4.3.). Jedyne dla podatności magnetycznej, mierzonej na glebach piaszczystych, efekt samorodka był bardzo wysoki i wynosił 0,73. Dodatkowo, podatność magnetyczną mierzoną na glebach piaszczystych charakteryzował zasięg korelacji wynoszący 15 km, czyli o około 10 km mniejszy niż w przypadku podatności magnetycznej mierzonej na glebach gliniastych. Wyniki takie sugerują, że podatność magnetyczna gleb piaszczystych charakteryzowała się mniejszą ciągłością przestrzenną niż podatność magnetyczna gleb gliniastych.

Dla wszystkich pomiarów podatności magnetycznej ze zbioru *Województwo Śląskie B* był obserwowany zasięg korelacji wynoszący około 22 km (tab. 4.3.). Wykorzystanie zbioru danych *Województwo Śląskie B*, dla którego średnia odległość pomiędzy punktami pomiarowymi była dwukrotnie mniejsza niż w przypadku zbioru *Województwo Śląskie A*, pozwoliło na znacznie lepsze zbadanie zmienności przestrzennej podatności magnetycznej. Obserwowano znaczne zmniejszenie efektu samorodka oraz lepsze dopasowanie modeli do wariogramów eksperymentalnych (tab. 4.3.).

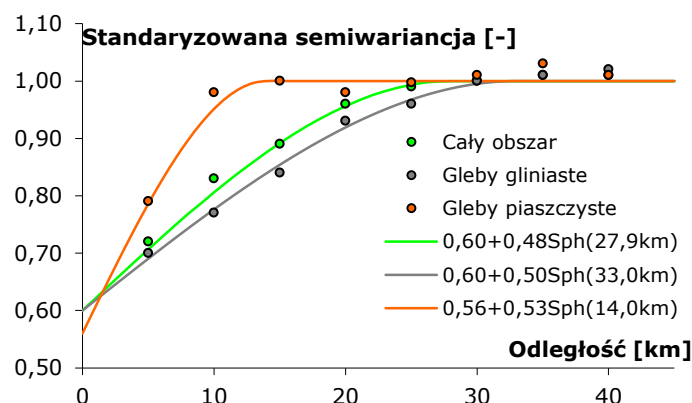




Rysunek 4.3. Standaryzowane wariogramy eksperymentalne oraz ich modele dla podatności magnetycznej zmierzonej w serii pomiarowej *Województwo Śląskie B*

Figure 4.3. Standardized experimental variograms and its models for magnetic susceptibility measured in series *Województwo Śląskie B*

Wariogram podatności magnetycznej z serii pomiarowej *GOP A* charakteryzował wysoki, wynoszący 0,6, efekt samorodka. Dla podatności magnetycznej mierzonej na glebach piaszczystych był obserwowany niemal dwukrotnie mniejszy zakres korelacji (14 km) niż w przypadku podatności magnetycznej mierzonej na glebach gliniastych (33 km). W przypadku podatności magnetycznej gleb gliniastych był obserwowany zasięg korelacji podobny jak dla zbiorów danych *Województwo Śląskie A* i *Województwo Śląskie B*. W przypadku podatności magnetycznej mierzonej na glebach piaszczystych zasięg korelacji obserwowany dla zbioru *GOP A* wynosił około 14 km i był podobny do zasięgu wyznaczonego na podstawie pomiarów z serii *Województwo Śląskie B*.

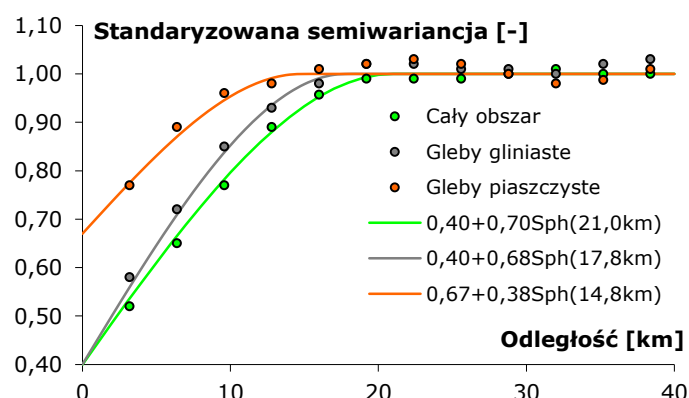


Rysunek 4.4. Standaryzowane wariogramy eksperymentalne oraz ich modele dla podatności magnetycznej zmierzonej w serii pomiarowej *GOP A*

Figure 4.4. Standardized experimental variograms and its models for magnetic susceptibility measured in series *GOP A*

Dla serii pomiarowej *GOP B*, gdzie średnia odległość pomiarowa wynosiła 2 km, było możliwe precyzyjniejsze wymodelowanie wariogramów, charakteryzujących się niższymi wartościami współczynnika IGF. Obserwowano wysokie efekty samorodka oraz podobne

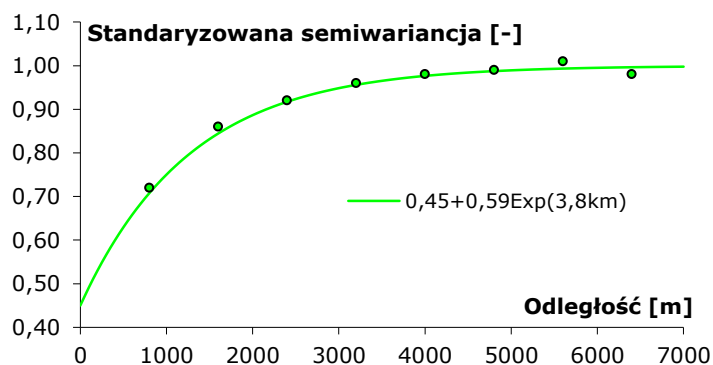
zasięgi korelacji jak dla poprzednio wykonanych wariogramów. Ponownie w przypadku podatności magnetycznej, mierzonej na glebach piaszczystych był obserwowany mniejszy zasięg korelacji w porównaniu z podatnością magnetyczną gleb gliniastych (tab. 4.3.).



**Rysunek 4.5. Standardyzowane wariogramy eksperymentalne oraz ich modele dla podatności magnetycznej zmierzonej w serii pomiarowej *GOP B***

**Figure 4.5. Standardized experimental variograms and its models for magnetic susceptibility measured in series *GOP B***

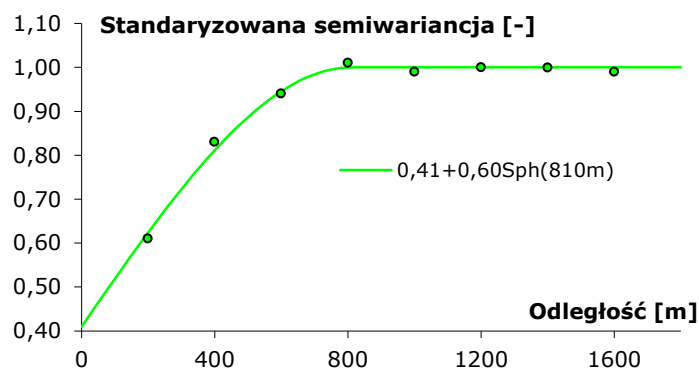
Podatność magnetyczną zmierzoną na obszarze *Mikołów* charakteryzowała dosyć wyraźna ciągłość przestrzenna. Wariogram (rys. 4.6.) został wymodelowany za pomocą dwóch struktur. Pierwszą był efekt samorodka, którego wartość była stosunkowo wysoka i wynosiła 0,45. Drugą strukturą był model eksponencjalny o nasyceniu i zasięgu równym odpowiednio 0,59 i 3,8 km.



**Rysunek 4.6. Standardyzowany wariogram eksperymentalny i jego model dla podatności magnetycznej zmierzonej na obszarze *Mikołów***

**Figure 4.6. Standardized experimental variogram and its model for magnetic susceptibility measured at site *Mikołów***

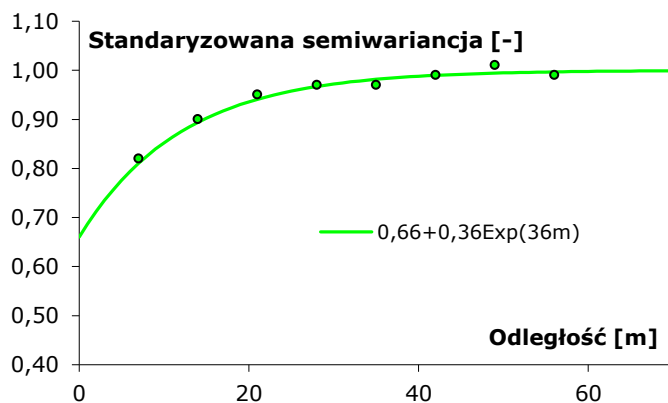
Na obszarze *Makosów* była obserwowana stosunkowo wyraźna i dobra ciągłość przestrzenna podatności magnetycznej (rys. 4.7.). Zasięg korelacji przestrzennych podatności magnetycznej wynosił około 810 m, co mogło być spowodowane przez lokalne warunki terenowe oraz zabudowę.



**Rysunek 4.7. Standaryzowany wariogram eksperymentalny i jego model dla podatności magnetycznej zmierzonej na obszarze *Makosów***

**Figure 4.7. Standardized experimental variogram and its model for magnetic susceptibility measured at site *Makosów***

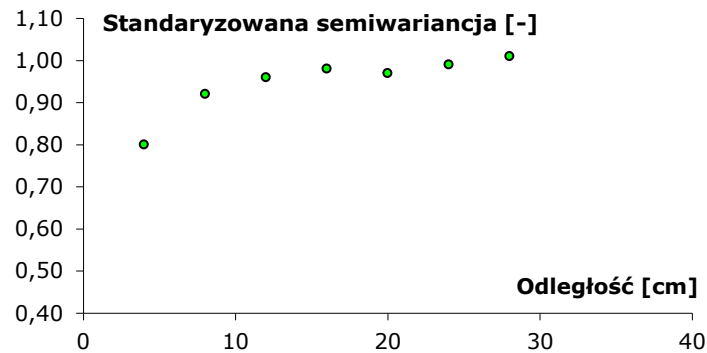
Obszar pomiarowy *Rudziniec Las Bukowy* był zlokalizowany na terenach, na których presja antropogeniczna była wyraźnie mniejsza niż na pozostałych badanych obszarach. Wariogram podatności magnetycznej (rys. 4.8.) został wymodelowany przy wykorzystaniu wysokiego efektu samorodka, wynoszącego 0,66 oraz modelu eksponencjalnego. Model ten charakteryzował się zasięgiem wynoszącym około 36 m, aczkolwiek korelacje przestrzenne były słabe i szybko zanikały wraz z odległością pomiędzy punktami pomiarowymi.



**Rysunek 4.8. Standaryzowany wariogram eksperymentalny oraz jego model dla podatności magnetycznej zmierzonej na obszarze *Rudziniec Las Bukowy***

**Figure 4.8. Standardized experimental variogram and its model for magnetic susceptibility measured at site *Rudziniec Las Bukowy***

Ostatni z wariogramów (rys. 4.9.) został wykonany na podstawie pomiarów przeprowadzonych miernikiem MS2D, zgodnie ze zwykle stosowaną techniką, w kole o promieniu około 2 m. Miało to na celu zbadanie zmienności przestrzennej podatności magnetycznej w obrębie zwykle wykonywanego pomiaru zbiorczego, który później jest uśredniany, a średnia przyjmowana jako wartość podatności w punkcie pomiarowym.



Rysunek 4.9. Standaryzowany wariogram eksperymentalny podatności magnetycznej zmierzonej na obszarze Rudziniec Pole Pszenicy

Figure 4.9. Standardized experimental variogram and its model for magnetic susceptibility measured at site Rudziniec Pole Pszenicy

Na wariogramie była widoczna zmienność przestrzenna, której zasięg korelacji wynosił od około 15 cm do 20 cm. Wartość ta jest bardzo mała i praktycznie równa średnicy elementu miernika MS2D Bartington (18,5 cm), przykładanego do powierzchni gleby podczas wykonywania pomiaru. Wynik taki sugeruje, że podatność magnetyczna mierzona miernikiem MS2D w kole o promieniu 2 m nie charakteryzuje się zasięgiem korelacji istotnym z punktu widzenia metodyki pomiarowej.

Tabela 4.3. Parametry modeli wariogramów zbiorów podatności magnetycznej. Dla obszarów Województwo Śląskie i GOP uwzględniono podział na gleby wytworzone z piasków i glin zwałowych

Table 4.3. Parameters of variograms models for data sets of magnetic susceptibility. For areas Województwo Śląskie and GOP values were grouped by soils developed from sands and clays

		Efekt samorodka [-]	Model	Nasylenie [-]	Zasięg [km]	IGF [ $\cdot 10^{-4}$ ]
Województwo Śląskie A	Wszystkie	0,62	Sferyczny	0,37	31,0	3,9711
	Gliniaste	0,80	Sferyczny	0,15	33,0	17,670
	Piaszczyste	0,76	Sferyczny	0,25	33,0	7,7853
Województwo Śląskie B	Wszystkie	-	Eksponecjalny	0,98	21,8	8,4108
	Gliniaste	0,13	Eksponecjalny	0,87	26,7	14,744
	Piaszczyste	0,73	Sferyczny	0,25	15,0	3,4808
GOP A	Wszystkie	0,60	Sferyczny	0,48	27,9	5,6732
	Gliniaste	0,60	Sferyczny	0,50	33,0	14,971
	Piaszczyste	0,56	Sferyczny	0,53	14,0	38,336
GOP B	Wszystkie	0,40	Sferyczny	0,70	21,0	1,7047
	Gliniaste	0,40	Sferyczny	0,68	17,8	10,061
	Piaszczyste	0,67	Sferyczny	0,38	14,8	18,379
	Mikołów	0,45	Eksponecjalny	0,59	3,8	7,2148
	Makosów	0,41	Sferyczny	0,60	0,81	23,361
	Rudziniec Las Bukowy	0,66	Eksponecjalny	0,36	0,036	4,8089
	Rudziniec Pole Pszenicy	-	-	-	-	-

#### 4.1.2 Wpływ lasów różnego typu na zmienność przestrzenną podatności magnetycznej

W analizie wykorzystano pomiary podatności magnetycznej wykonane miernikiem MS2D na południu i południowym zachodzie Polski, na obszarze *Województwo Śląskie*. Pomiary pogrupowano ze względu na typ lasu w jakim zostały wykonane:

- i. pomiary wykonane w lasach, w których występował tylko drzewostan iglasty (oznaczane symbolem *C*),
- ii. pomiary wykonane w lasach, w których występował tylko drzewostan liściasty (oznaczane symbolem *D*),
- iii. pomiary wykonane w lasach mieszanych, w których występował zarówno drzewostan liściasty, jak i iglasty, bez widocznej przewagi któregoś z nich (oznaczane symbolem *M*),
- iv. pomiary wykonane w lasach z przeważającą ilością drzewostanu iglastego, w którym były domieszki drzew liściastych (oznaczane symbolem *C-aD*),
- v. pomiary wykonane w lasach z przeważającą ilością drzewostanu liściastego, w którym były domieszki drzew iglastych (oznaczane symbolem *D-aC*).



**Rysunek 4.10. Podział procentowy pomiarów podatności magnetycznej ze względu na rodzaj lasu, w którym wykonano pomiar**

**Figure 4.10. Proportion of measurements of magnetic susceptibility performed in particular types of forest**

Wszystkie pomiary miernikiem MS2D zostały wykonane według tej samej metodyki, opisaney w rozdziale poświęconym metodom badawczym. Pomiary wykonywano w odległości minimum 1 m od najbliższego drzewa. Powierzchnia gleby nie była w żaden sposób przygotowywana, z wyjątkiem usunięcia wyższej trawy i gałęzi. Oprócz pomiarów podatności magnetycznej zostały odnotowane wartości takich parametrów jak rodzaj lasu oraz miąższość ściółki.

Średnie wartości podatności magnetycznej mierzonej w lasach liściastych były o około 42% wyższe od wartości mierzonych w lasach iglastych. Bardzo podobnie było w przypadku lasów mieszanych. W lasach liściastych z domieszką drzew iglastych wartości podatności magnetycznej były około 6,8% wyższe niż wartości zmierzone w lasach iglastych

z domieszką drzew liściastych. Wartości kwartyli dolnego (25%) i górnego (75%) były dwukrotnie wyższe w lasach liściastych w porównaniu z lasami iglastymi. W lasach mieszanych taka sytuacja nie była obserwowana. Wartości kwartyli podatności magnetycznej były w przybliżeniu takie same.

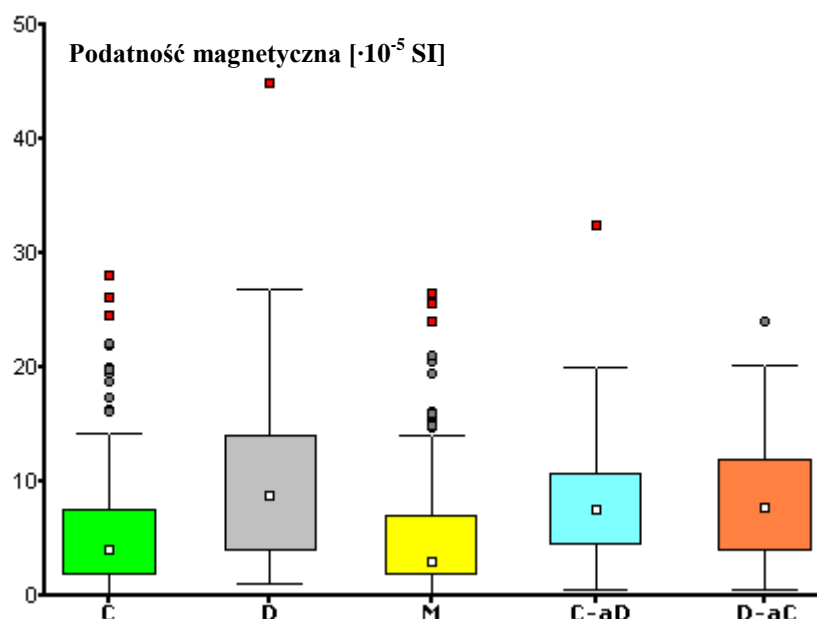
Otrzymane wyniki sugerowały, że wartości podatności magnetycznej mierzone w lasach liściastych i w lasach iglastych nie były charakteryzowane przez takie same rozkłady. Rozkłady podatności magnetycznej mierzonej w każdym typie lasu charakteryzowały się silną prawostronną skośnością. Było to spowodowane wyraźnym zanieczyszczeniem antropogenicznym gleb na badanych obszarach i w rezultacie skutkowało występowaniem licznych wartości ekstremalnych podatności magnetycznej.

W lasach iglastych obserwowano znacznie większą liczbę pomiarów odstających podatności magnetycznej. Mogło to być spowodowane silnie zmienną miąższością poziomu organicznego gleby w lasach iglastych. W niektórych przypadkach zmienność miąższości tego poziomu sięgała 50%. Ponadto, w lasach górskich, gdzie była wykonywana część pomiarów, poziom organiczny miał bardzo małą miąższość. Z tego względu większość magnetycznych cząstek pochodzenia antropogenicznego została zakumulowana na małej głębokości, czego rezultatem były znacznie wyższe wartości podatności magnetycznej mierzonej miernikiem MS2D.

**Tabela 4.4. Statystyki opisowe podatności magnetycznej zmierzonej w lesie: *C* – iglastym, *D* – liściastym, *M* – mieszanym, *C-aD* – iglastym z domieszką drzew liściastych, *D-aC* – liściastym z domieszką drzew iglastych**

**Table 4.4. Descriptive statistics of magnetic susceptibility measured in forest: *C* – coniferous, *D* – deciduous, *M* – mixed, *C-aD* – coniferous with deciduous admixture, *D-aC* – deciduous with coniferous admixture**

Podatność magnetyczna ( $\kappa$ )	Typ lasu				
	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>M</i>	<i>C-aD</i>	<i>D-aC</i>
Liczebność [-]	398	110	237	64	21
Średnia [ $\cdot 10^{-5}$ SI]	5,3	9,5	5,3	8,2	8,8
Mediana [ $\cdot 10^{-5}$ SI]	3,9	8,8	3,0	7,6	7,7
Minimum [ $\cdot 10^{-5}$ SI]	0	1,0	0	0,6	0,5
Maksimum [ $\cdot 10^{-5}$ SI]	28,0	45,0	26,5	32,4	24,1
Kwartył dolny [ $\cdot 10^{-5}$ SI]	2,0	4,0	2,0	4,5	4,0
Kwartył górny [ $\cdot 10^{-5}$ SI]	7,5	14,0	7,0	10,7	11,9
Rozstęp międzykwartyłowy [ $\cdot 10^{-5}$ SI]	5,5	10,0	5,0	6,2	7,9
Odchylenie standardowe [ $\cdot 10^{-5}$ SI]	4,6	6,7	4,9	5,6	6,4
Współczynnik skośności [-]	1,75	1,71	1,70	1,54	0,83



**Rysunek 4.11.** Wykresy pudełkowe podatności magnetycznej gleby zmierzonej w lasach: *C* – iglastych, *D* – liściastych, *M* – mieszanych, *C-aD* – iglastych z domieszką drzew liściastych, *D-aC* – liściastych z domieszką drzew iglastych

**Figure 4.11.** Box-and-whisker plots of magnetic susceptibility measured in forest: *C* – coniferous, *D* – deciduous, *M* – mixed, *C-aD* – coniferous with deciduous admixture, *D-aC* – deciduous with coniferous admixture

Dodatkowo, punkty pomiarowe podatności magnetycznej w lasach iglastych, były zlokalizowane głównie w dużych kompleksach leśnych. Natomiast punkty pomiarowe w lasach liściastych były położone głównie w parkach miejskich lub innych małych lasach, a więc mogły być zlokalizowane na terenach o większej presji antropogenicznej. Wyznaczone nieparametryczne współczynniki korelacji potwierdziły istnienie słabej zależności pomiędzy mierzoną wartością podatności magnetycznej i typem lasu.

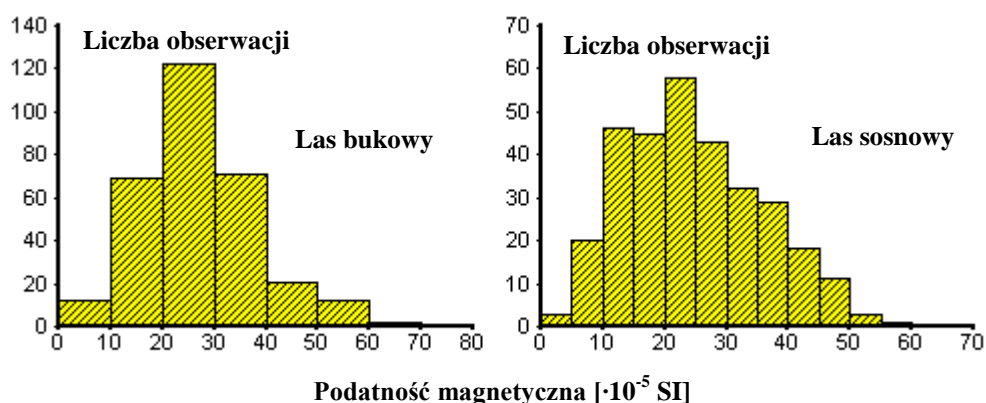
**Tabela 4.5.** Nieparametryczne współczynniki korelacji dla podatności magnetycznej i typu lasu

**Table 4.5.** Nonparametric correlation coefficients between magnetic susceptibility and forest type

	Podatność magnetyczna		
	Współczynnik Gamma	Współczynnik Kendalla	Współczynnik Spearmana
Typ lasu	0,23	0,18	0,23

W celu weryfikacji zaobserwowanych różnic pomiędzy wartościami podatności magnetycznej mierzonej w lasach iglastych i liściastych, analizy zostały powtórzone dla pomiarów wykonanych w skali lokalnej, na obszarach położonych w Rudzińcu w lesie bukowym (*Rudziniec Las Bukowy*) i sosnowym (*Rudziniec Las Sosnowy*). Powierzchnie te były położone w odległości 300 m od siebie i z tego względu presja antropogeniczna oraz inne warunki mogące mieć wpływ na zanieczyszczenie gleb, były takie same.

Zastosowano procedury pomiarowe podatności magnetycznej gleby jak w poprzednich badaniach.



**Rysunek 4.12. Histogramy podatności magnetycznej zmierzonej na powierzchniach pomiarowych Rudziniec Las Bukowy i Rudziniec Las Sosnowy**

**Figure 4.12. Histograms of magnetic susceptibility measured at study areas Rudziniec Las Bukowy and Rudziniec Las Sosnowy**

Zarówno w przypadku rozkładu podatności magnetycznej mierzonej w lesie bukowym, jak i w lesie sosnowym, była obserwowana słaba prawostronna skośność. Świadczyło to o stosunkowo słabej presji antropogenicznej, będącej rezultatem depozycji pyłów przemysłowych i miejskich. Potwierdziło to też dobry dobór powierzchni w Rudzińcu do celów weryfikacji pomiarów regionalnych. Zarówno w lesie bukowym, jak i w sosnowym mierzone wartości podatności magnetycznej mieściły się w tym samym zakresie, od 0 do  $70 \cdot 10^{-5}$  SI.

**Tabela 4.6. Statystyki opisowe podatności magnetycznej (wszystkie wartości i bez punktów odstających) zmierzonej na powierzchniach Rudziniec Las Bukowy oraz Rudziniec Las Sosnowy**

**Table 4.6. Descriptive statistics of magnetic susceptibility measured at study areas Rudziniec Las Bukowy and Rudziniec Las Sosnowy**

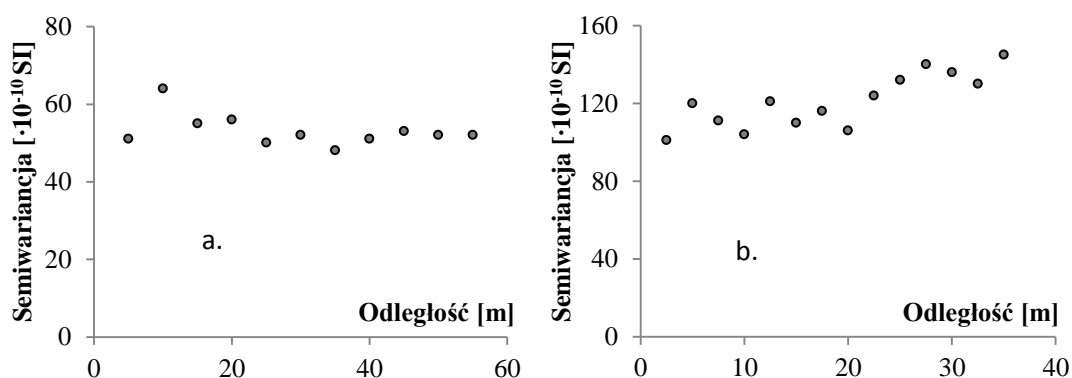
	<i>Rudziniec Las Sosnowy</i>		<i>Rudziniec Las Bukowy</i>	
	Wszystkie	Bez odstających	Wszystkie	Bez odstających
<b>Liczebność [-]</b>	309	308	312	301
<b>Średnia [<math>\cdot 10^{-5}</math>SI]</b>	25,19	25,09	27,55	27,02
<b>Mediana [<math>\cdot 10^{-5}</math>SI]</b>	24,00	23,50	27,00	27,00
<b>Minimum [<math>\cdot 10^{-5}</math>SI]</b>	1,00	1,00	0,00	1,00
<b>Maksimum [<math>\cdot 10^{-5}</math>SI]</b>	58,00	54,00	64,00	52,00
<b>Kwartył dolny [<math>\cdot 10^{-5}</math>SI]</b>	17,00	17,00	20,00	20,00
<b>Kwartył górny [<math>\cdot 10^{-5}</math>SI]</b>	33,00	33,00	33,00	33,00
<b>Rozstęp międzykwartyłowy [<math>\cdot 10^{-5}</math>SI]</b>	16,00	16,00	13,00	13,00
<b>Odchylenie standardowe [<math>\cdot 10^{-5}</math>SI]</b>	11,21	11,07	11,30	9,99
<b>Współczynnik skośności [-]</b>	0,42	0,39	0,44	0,26



Wykonano analizę punktów odstających. Za punkt odstający uznawano wartości, które były odległe o 1,5 rozstępu międzykwartylowego od kwartyła dolnego lub górnego. Wartości podatności magnetycznej zmierzone w lesie sosnowym uznawano za odstające, gdy były większe niż  $57,0 \cdot 10^{-5}$  SI. Zmierzone w lesie bukowym, gdy były mniejsze niż  $0,5 \cdot 10^{-5}$  SI lub większe niż  $52,5 \cdot 10^{-5}$  SI. W przypadku pomiarów wykonanych w lesie sosnowym tylko jedna wartość została uznana za wartość odstającą, natomiast wśród pomiarów z lasu bukowego wartości odstających było 11.

Wykonane testy statystyczne dla poziomu istotności równego 0,05 nie pozwoliły na przyjęcie założenia, że rozkłady wartości podatności magnetycznej zarówno mierzonej w lesie bukowym, jak i w lesie sosnowym, są rozkładami normalnymi. Podobne rezultaty otrzymano dla zbiorów po odrzuceniu wartości odstających. Wyniki testów median oraz ANOVA Kruskal-Wallisa nie pozwoliły, dla poziomu istotności równego 0,05, przyjąć hipotezy, że rozkłady podatności magnetycznej mierzonej w lesie sosnowym i bukowym były takie same.

Wartości podatności magnetycznej zmierzone w lesie bukowym były około 7% wyższe w porównaniu z wartościami podatności magnetycznej zmierzonej w lesie sosnowym. Różnice były znacznie mniejsze niż dla regionalnego zbioru podatności magnetycznej, gdzie różnice te wynosiły około 42%. Mniejsze różnice wynikały z tego, że dla obszarów *Rudziniec Las Bukowy* i *Rudziniec Las Sosnowy* presja antropogeniczna była taka sama, a wpływ innych czynników, mogących wpłynąć na mierzone wartości podatności magnetycznej, był minimalny. Ponadto, na obszarach o niskiej presji antropogenicznej, podatność magnetyczna jest głównie powodowana naturalnymi warunkami glebowymi.



**Rysunek 4.13. Wariogramy podatności magnetycznej zmierzonej na powierzchniach pomiarowych *Rudziniec Las Bukowy* (a.) i *Rudziniec Las Sosnowy* (b.)**

**Figure 4.13. Variograms of magnetic susceptibility measured at study areas *Rudziniec Las Bukowy* (a.) and *Rudziniec Las Sosnowy* (b.)**

W przypadku lasów liściastych dominowały głównie gleby brunatne, wykształcone z glin i ilów, bogate w związki paramagnetyczne. W lasach iglastych dominowały głównie gleby bielcowe, wykształcone z piasków lub gleby inicjalne, wykształcone na diamagnetycznym podłożu, dla których podatność magnetyczna poziomu mineralnego jest bliska zeru. Dodatkowo, drzewa iglaste mają większą zdolność filtracji w porównaniu z drzewami liściastymi, z tego względu różnice w mierzonych wartościach podatności także mogą być mniejsze. Niemniej jednak, otrzymane wyniki potwierdzają istnienie różnic pomiędzy wartościami podatności magnetycznej mierzonej w lasach iglastych i liściastych.

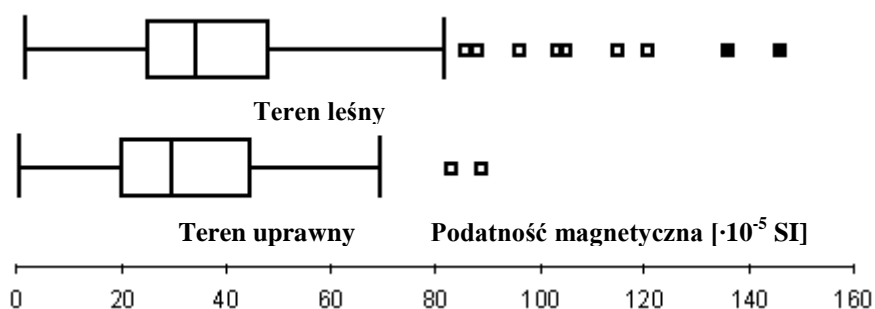
Na wariogramach empirycznych było zauważalne, że podatność magnetyczna mierzona miernikiem MS2D w lasach iglastych charakteryzowała się większym zasięgiem korelacji niż podatność mierzona w lasach liściastych. Jednak różnice te były bardzo nieznaczne i słabo widoczne. Na obu wariogramach obserwowano natomiast bardzo silny i wyraźny efekt periodyczny. Efekt taki może być wynikiem pewnego regularnego występowania drzew w badanych lasach, które miało wpływ na depozycje pyłowe i wielkość akumulacji zanieczyszczeń antropogenicznych w glebie.

#### 4.1.3 Wpływ wykorzystania terenu na zmienność przestrzenną podatności magnetycznej

W badaniach zostały użyte pomiary, wykonane w skali regionalnej na powierzchni *Mikołów* oraz w skali lokalnej na powierzchniach *Rudziniec Las Bukowy* i *Rudziniec Pole Pszenicy* (opis powierzchni pomiarowych zawarto w Załączniku nr 1). Na wszystkich badanych obszarach podatności magnetycznej przeprowadzono miernikiem MS2D. Na powierzchni *Mikołów* punkty pomiarowe zostały podzielone na dwie grupy. Pierwsza grupa obejmowała pomiary wykonane na terenach leśnych, druga natomiast pomiary wykonane na terenach otwartych i uprawnych. W przypadku powierzchni pomiarowych położonych w Rudzińcu, pomiary podatności magnetycznej zostały wykonane na dwóch sąsiadujących ze sobą powierzchniach, jednej położonej w lesie bukowym, a drugiej na polu pszenicy.

W przypadku obszaru pomiarowego *Mikołów* wyższe wartości podatności magnetycznej obserwowano na terenach leśnych niż na polach uprawnych. Jakkolwiek różnice pomiędzy średnimi wartościami podatności magnetycznej nie były znaczne (rys. 4.14.), co mogło wynikać z dużej zmienności depozycji pyłowych w skali regionalnej. W przypadku obszarów pomiarowych położonych w Rudzińcu, presja antropogeniczna na polu pszenicy i w lesie bukowym była na podobnym poziomie. Średnia podatność magnetyczna mierzona

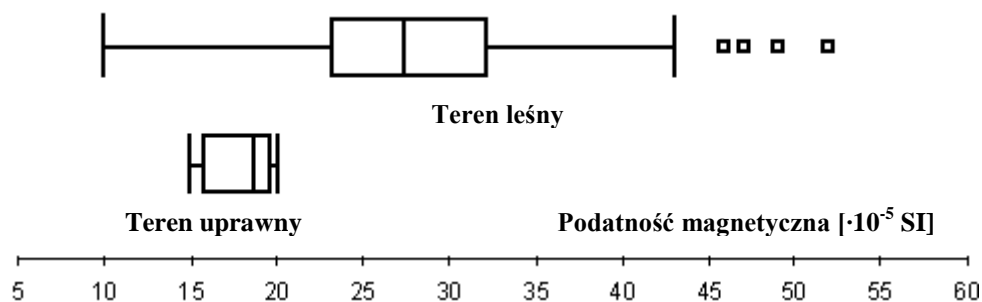
na polu uprawnym była wyraźnie mniejsza (o 40%) niż średnia wartości z obszaru lasu bukowego (rys. 4.15.).



**Rysunek 4.14.** Wykresy pudełkowe podatności magnetycznej zmierzonej na powierzchni *Mikołów*

**Figure 4.14.** Box-and-whisker plots of magnetic susceptibility measured at study area *Mikołów*

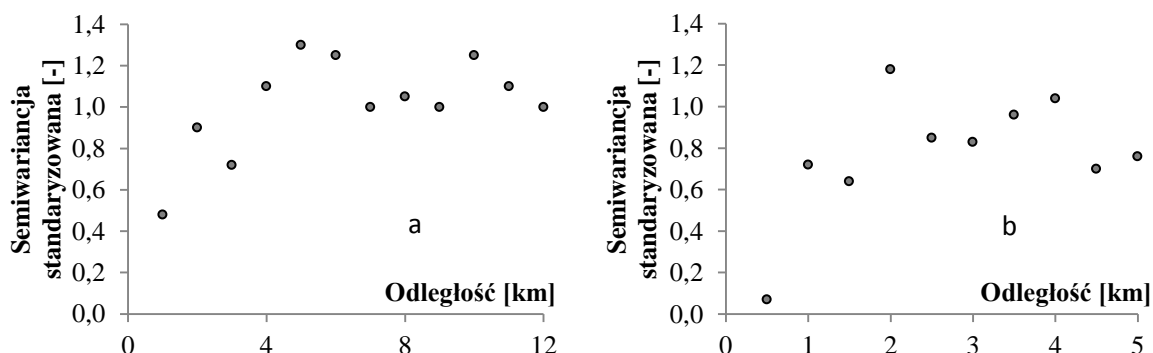
Wartości podatności magnetycznej zmierzone na terenach uprawnych cechowała o wiele mniejsza wariancja, co było obserwowane zarówno w przypadku pomiarów w skali regionalnej, jak i lokalnej. Wykonane testy statystyczne potwierdziły, że wariancje podatności magnetycznej mierzonej w lasach i na polach uprawnych są różne na poziomie istotności równym 0,05. Odchylenie standardowe wartości podatności magnetycznej zmierzonej na terenach leśnych, na obszarze pomiarowym *Mikołów*, wynosiło  $28,3 \cdot 10^{-5}$  SI i było około 65% wyższe niż odchylenie standardowe podatności magnetycznej zmierzonej na terenach otwartych i terenach uprawnych ( $18,5 \cdot 10^{-5}$  SI). Podatność magnetyczna zmierzona w skali lokalnej na obszarach w *Rudzińcu* cechowała się znacznie mniejszymi odchyleniami standardowymi. Dla lasu bukowego wartość odchylenia wynosiła  $7,7 \cdot 10^{-5}$  SI, natomiast dla pola pszenicy  $1,6 \cdot 10^{-5}$  SI. Obserwacje takie potwierdzają, że w skali regionalnej podatność magnetyczna charakteryzuje się większą zmiennością niż w przypadku skali lokalnej. Było to efektem mniejszej zmienności depozycji pyłowych oraz mniejszej presji antropogenicznej w skali lokalnej, na obszarach w pomiarowych *Rudziniec Las Bukowy* i *Rudziniec Pole Pszenicy*. Większa zmienność wartości podatności magnetycznej obserwowana na terenach leśnych w porównaniu do pól uprawnych, wynikała głównie z różnego rodzaju działań rolniczych prowadzących do wymieszania i tym samym, do ujednocnienia górnych poziomów glebowych (Magiera i inni, 2006).



Rysunek 4.15. Wykresy pudełkowe podatności magnetycznej zmierzonej na powierzchniach *Rudziniec Las Bukowy* i *Rudziniec Pole Pszenicy*

Figure 4.15. Box-and-whisker plots of magnetic susceptibility measured at study areas *Rudziniec Las Bukowy* and *Rudziniec Pole Pszenicy*

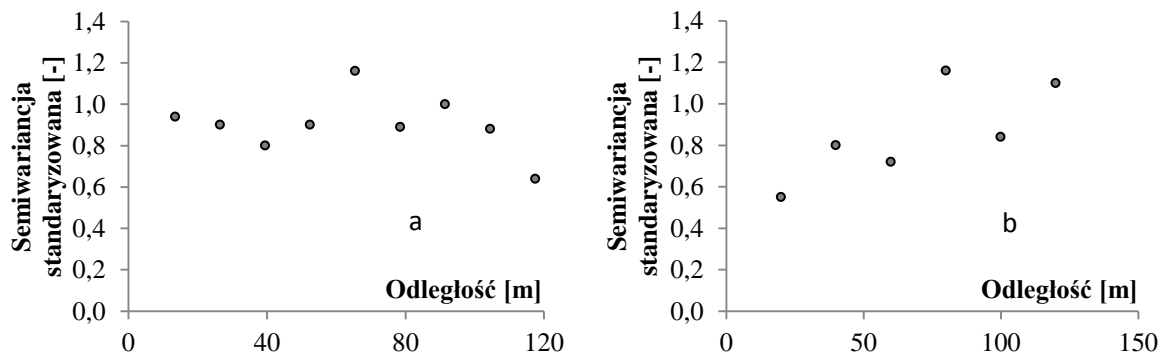
Następnie zostały przeprowadzone analizy wariogramów podatności magnetycznej zmierzonej na polach uprawnych i na terenach leśnych, w skali regionalnej i lokalnej. Rezultaty dla obszaru *Mikołów* (rys. 4.16.) pokazały, że podatność magnetyczną zmierzoną na terenach leśnych charakteryzowała około dwukrotnie większa ciągłość przestrzenna w porównaniu z podatnością mierzoną na terenach uprawnych.



Rysunek 4.16. Standaryzowane wariogramy podatności magnetycznej zmierzonej na powierzchni *Mikołów*, na terenach leśnych (a.) oraz na terenach otwartych i uprawnych (b.)

Figure 4.16. Standardized variograms of magnetic susceptibility measured at study area *Mikołów*, in forest (a.) and in arable areas (b.)

Wariogramy wyznaczone dla podatności mierzonej w skali lokalnej, na powierzchniach pomiarowych w Rudzińcu, cechowały się znacznie wyższym efektem samorodka w porównaniu z wariogramami wykonanymi dla skali regionalnej. W przypadku wariogramów podatności magnetycznej mierzonej na terenach leśnych obserwowano wyraźny efekt periodyczny.



Rysunek 4.17. Standaryzowane wariogramy podatności magnetycznej mierzonej na powierzchniach *Rudziniec Las Bukowy* (a.) i *Rudziniec Pole Pszenicy* (b.)

Figure 4.17. Standardized variograms of magnetic susceptibility measured at study areas *Rudziniec Las Bukowy* (a.) and *Rudziniec Pole Pszenicy* (b.)

Mógł on być wynikiem pewnego schematycznego rozmieszczenia drzew w lesie, co mogło warunkować pewną schematyczność opadu pyłów na powierzchnię gleby. W przypadku pól uprawnych efekt taki nie był obserwowany, zgodnie z przewidywaniami, gdyż systematyczna uprawa gleb przyczynia się do wymieszania zawartości cząstek magnetycznych pochodzenia antropogenicznego w górnych poziomach glebowych. Jednocześnie wpłynęło to na zmniejszenie zmienności podatności magnetycznej.

#### 4.1.4 Wpływ utworów dolomitowych na zmienność przestrzenną podatności magnetycznej

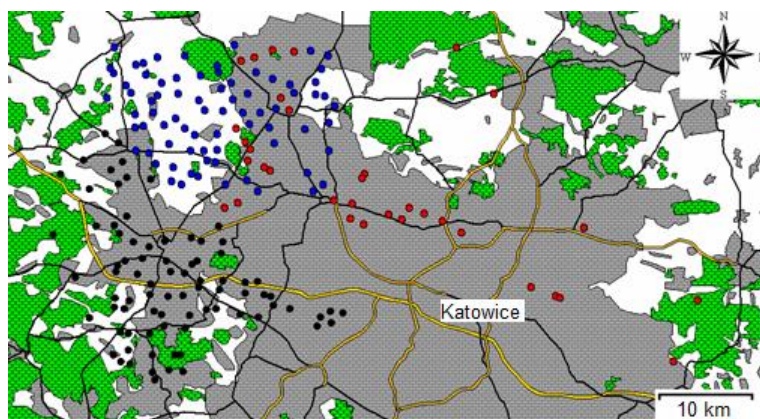
Podczas pomiarów i badań podatności magnetycznej gleb w rejonie Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego był obserwowany wpływ występowania utworów dolomitowych, a w szczególności dolomitów kruszconośnych, na zależność korelacyjną pomiędzy podatnością magnetyczną gleby i zawartością poszczególnych metali ciężkich w glebie. W celu dokładniejszego zbadania tego zjawiska, zostały wykonane trzy serie pomiarowe podatności magnetycznej na powierzchni *GOP*. Pierwsza seria, oznaczana symbolem *DoI*, obejmowała pomiary na obszarach, na których nie występowały żadne utwory dolomitowe. Pomiary zostały wykonane w okolicach Gliwic, Pyskowic, Zabrze, Bytomia i Tarnowskich Gór. Punkty pomiarowe serii *DoI* zlokalizowane były na utworach, takich jak: ropy piaszczyste i margliste, piaski, żwiry i łupki ilaste z gipsem i anhydrytem warstw skawińskich, wielickich i grabowieckich, ropy i piaski z syderytami, miejscami z węglem brunatnym warstw kędzierzyńskich (*Lis i Pasieczna, 1995*). Punkty pomiarowe tej serii były skupione głównie w części południowo-zachodniej badanego obszaru *GOP* (rys. 4.18.).

Druga seria pomiarowa, oznaczana symbolem *Dol*, obejmowała pomiary wykonane na terenach charakteryzujących się występowaniem różnego typu utworów dolomitowych. Punkty pomiarowe serii pomiarowej *Dol* zostały zlokalizowane na wapieniach, marglach i dolomitach warstw błotnickich i gogolińskich, łupkach, dolomitach, wapieniach

i piaskowcach warstw rybnieńskich, boruszowickich i miedarskich, dolomitach, marglach i wapieniach z ewaporytami, dolomitach warstw jemielnickich, dolomitach marglistych miejscami z ewaporytami warstw tarnowickich, łowcach, marglach z ewaporytami, wapieniach i marglach warstw górażdzańskich, terebratulowych i karchowickich (Lis i Pasieczna, 1995). Punkty tej serii były położone głównie w części północno-zachodniej badanego obszaru.

Ostatnia z serii pomiarowych, oznaczana symbolem  $Dol^+$ , obejmowała tylko te pomiary, które zostały wykonane na terenach gdzie występowały dolomity kruszconośne (Lis i Pasieczna, 1995). Punkty pomiarowe serii  $Dol^+$  były położone na dolomitach epigenicznych i kruszconośnych, w poprzek badanego obszaru, z północnego-zachodu na południowy-wschód (rys. 4.18.).

Pozostałe parametry wpływające na podatność magnetyczną gleby, takie jak: stopień zanieczyszczenia, rodzaj zagospodarowania terenu, rodzaj roślinności były praktycznie takie same dla każdej z trzech serii pomiarowych.



**Rysunek 4.18. Punkty pomiarowe podatności magnetycznej położone na terenach: bez utworów dolomitowych (punkty czarne), z różnymi utworami dolomitowymi (punkty niebieskie), z dolomitami kruszconośnymi (punkty czerwone)**

**Figure 4.18. Sample points of magnetic susceptibility located at areas: without dolomites (black points), with different types of dolomites (blue points), with ore-bearing dolomites (red points)**

Średnie odległości pomiędzy punktami pomiarowymi wynosiły około 2 km, przy czym najmniej regularnie były rozmieszczone punkty serii  $Dol^+$ , zlokalizowane na dolomitach epigenicznych i kruszconośnych, co było warunkowane głównie nieregularnością występowania tych utworów geologicznych. Łącznie wykonano 204 pomiary, obejmujące wyznaczenie masowej podatności magnetycznej  $\chi$  gleby oraz zawartości wybranych metali ciężkich w glebie. W serii pomiarowej  $Dol^+$  wykonane zostały 82 pomiary, w serii  $Dol$  wykonano 84 pomiary oraz 34 pomiary w serii  $Dol^+$ .

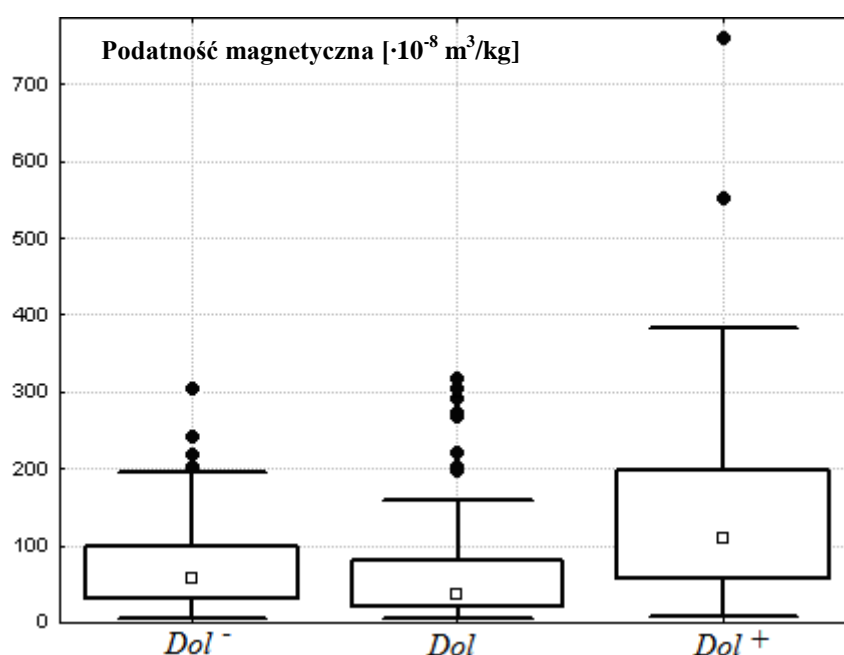
Dla każdej z serii pomiarowych obserwowano silnie prawostronnie skośny rozkład wartości podatności magnetycznej, przy czym najsilniej skośny był rozkład podatności

magnetycznej zmierzonej na dolomitach kruszczonośnych. W przypadku tych pomiarów obserwowane były także wyraźnie wyższe wartości podatności magnetycznej, które zawierały się w przedziale od 7,8 do  $762,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  (tab. 4.7.) oraz liczne wartości ekstremalne podatności magnetycznej, których liczba była większa niż w przypadku pomiarów wykonanych na obszarach, na których dolomity kruszczonośne nie występowały.

**Tabela 4.7. Statystyki opisowe podatności magnetycznej gleby zmierzonej na obszarach: bez dolomitów  $Dol^-$ , z różnymi utworami dolomitowymi  $Dol$  oraz z dolomitami kruszczonośnymi  $Dol^+$**

**Table 4.7. Descriptive statistics of magnetic susceptibility measured at areas: without dolomites  $Dol^-$ , with different types of dolomites  $Dol$ , with ore-bearing dolomites  $Dol^+$**

	Podatność magnetyczna gleby		
	$Dol^-$	$Dol$	$Dol^+$
Średnia [ $\cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ]	71,4	64,3	156,4
Mediana [ $\cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ]	56,6	36,5	109,6
Minimum [ $\cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ]	4,5	5,5	7,8
Maksimum [ $\cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ]	310,7	316,8	762,0
Kwartyl dolny [ $\cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ]	32,6	21,4	57,0
Kwartyl górny [ $\cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ]	98,7	82,0	198,1
Rozstęp międzykwartyłowy [ $\cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ]	66,1	60,6	141,1
Odchylenie stand. [ $\cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ]	57,7	68,5	161,6
Wsp. Skośności [-]	1,77	2,09	2,26



**Rysunek 4.19. Wykresy pudełkowe podatności magnetycznej zmierzonej na obszarach: bez utworów dolomitowych  $Dol^-$ , z różnymi utworami dolomitowymi  $Dol$  oraz z występującymi dolomitami kruszczonośnymi  $Dol^+$**

**Figure 4.19. Box-and-whisker plots of magnetic susceptibility measured at areas: without dolomites  $Dol^-$ , with different types of dolomites  $Dol$ , with ore-bearing dolomites  $Dol^+$**

W przypadku pomiarów wykonanych na obszarach, na których utwory dolomitowe nie występowały były obserwowane wyraźne korelacje pomiędzy podatnością magnetyczną,

a zawartością takich metali, jak As, Cd, Cu, Ni, Pb i Zn. Wartości współczynników korelacji Pearsona wahały się w zakresie od 0,40 do 0,75. Dla pozostałych metali ciężkich, takich jak Co, Cr, Fe, Mn, wartości współczynników były niższe i wynosiły od 0,24 do 0,39.

**Tabela 4.8. Współczynniki korelacji Pearsona pomiędzy podatnością magnetyczną i zawartością poszczególnych metali ciężkich, zmierzona na obszarach: bez utworów dolomitowych *Dol*, z różnymi utworami dolomitowymi *Dol* oraz z występującymi dolomitami kruszcośnymi *Dol*<sup>+</sup>**

**Table 4.8. Pearson correlation coefficients between magnetic susceptibility and concentration of heavy metals measured at areas: without dolomites *Dol*, with different types of dolomites *Dol*, with ore-bearing dolomites *Dol*<sup>+</sup>**

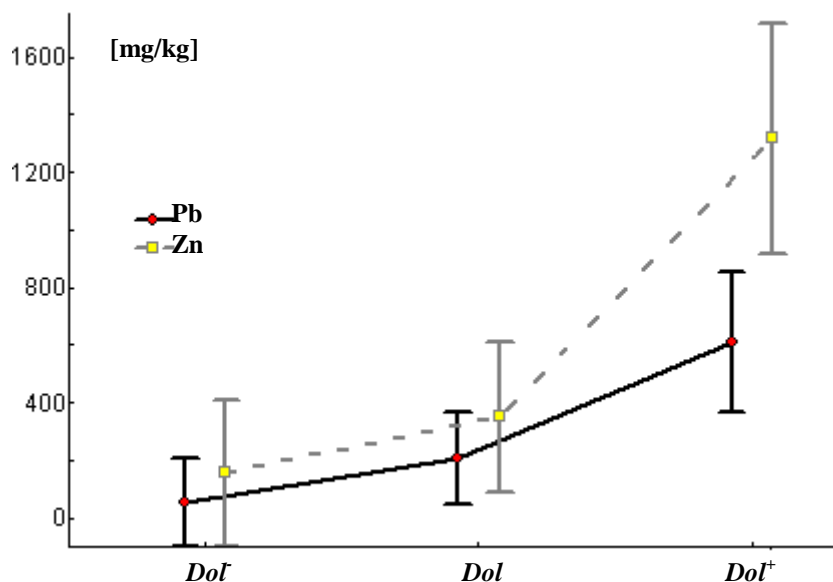
	<i>Dol</i>	<i>Dol</i>	<i>Dol</i> <sup>+</sup>
<b>Arsen</b>	0,40	0,69	0,24
<b>Kadm</b>	0,58	0,50	0,14
<b>Kobalt</b>	0,24	0,43	0,43
<b>Chrom</b>	0,36	0,44	0,14
<b>Miedź</b>	0,56	0,18	0,51
<b>Żelazo</b>	0,30	0,50	0,53
<b>Mangan</b>	0,39	0,26	0,07
<b>Nikiel</b>	0,43	0,53	0,63
<b>Olów</b>	0,75	0,40	0,14
<b>Cynk</b>	0,62	0,55	0,22

W przypadku pomiarów wykonanych na obszarach, na których występowały dolomity kruszcośne współczynniki korelacji pomiędzy wartościami podatności magnetycznej i zawartością metali ciężkich miały wyraźnie niskie wartości. Dotyczyło to zwłaszcza takich metali ciężkich, jak As, Cd, Cr, Mn, Pb i Zn, dla których wartości współczynników korelacji Pearsona nie przekraczały 0,24. Dodatkowo, wykonany test istotności potwierdził statystyczną nieistotność współczynników korelacji dla tych metali. W przypadku Cu, nie zostały zaobserwowane znaczne różnice wartości współczynnika korelacji pomiędzy pomiarami wykonanymi na obszarach, gdzie utwory dolomitowe nie występowały i na obszarach, gdzie występowały dolomity kruszcośne. Natomiast, dla Co, Fe i Ni, wyznaczone współczynniki wskazywały na silniejszą korelację z podatnością magnetyczną w przypadku pomiarów zlokalizowanych na dolomitach kruszcośnych.

Obserwowane nieregularności zmian korelacji pomiędzy podatnością magnetyczną i zawartością poszczególnych metali ciężkich mogą wskazywać na nieliniowy charakter tych zależności, głównie dla As, Cd, Zn i Pb. Może to utrudniać określenie poziomu zanieczyszczenia gleb i wyznaczanie obszarów potencjalnie zanieczyszczonych metalami ciężkimi w przypadku obszarów, na których występują dolomity kruszcośne.



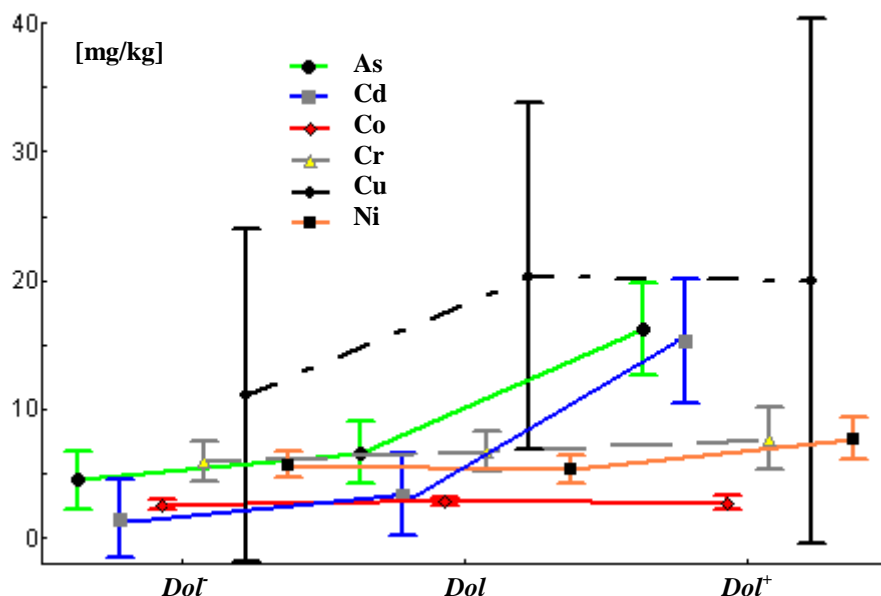
Na obszarze, na którym występowały dolomity kruszconośne, obserwowano różny stopień wzrostu średniej zawartości w glebie głównie takich metali, jak As, Cd, Zn i Pb. W przypadku pozostałych metali, takich jak Co, Cr, Cu, Ni, nie obserwowano zmian ich średniej zawartości w glebie, w porównaniu do pozostałych obszarów.



**Rysunek 4.20. Średnie zawartości Pb i Zn w glebie zmierzone na obszarach pomiarowych: bez dolomitów  $Dol^-$ , z różnymi utworami dolomitowymi  $Dol$  oraz z występującymi dolomitami kruszconośnymi  $Dol^+$**

**Figure 4.20. Average concentration of Pb and Zn measured at areas: without dolomites  $Dol^-$ , with different types of dolomites  $Dol$ , with ore-bearing dolomites  $Dol^+$**

Średnia zawartość As i Cd w glebie na obszarze, na którym utwory dolomitowe nie występowały, była około 3 do 4 razy mniejsza w porównaniu z zawartością obszarów, gdzie występowały dolomity kruszconośne. W przypadku Zn i Pb różnice zawartości w glebie na tych obszarach były jeszcze większe i wynosiły od około 5 do 7 razy. Obserwacje takie mogą wskazywać na nieregularną zależność pomiędzy zawartością tych metali w glebie, a podatnością magnetyczną w przypadku pomiarów wykonywanych na terenach z dolomitami kruszconośnymi. Podobne nieregularności były obserwowane również w przypadku analizy korelacji pomiędzy zawartością metali w glebie i podatnością magnetyczną.



Rysunek 4.21. Średnie zawartości As, Cd, Co, Cr, Cu i Ni zmierzone na obszarach pomiarowych: bez utworów dolomitowych  $Dol^-$ , z różnymi utworami dolomitowymi  $Dol$  oraz z występującymi dolomitami kruszonośnymi  $Dol^+$

Figure 4.21. Average concentration of As, Cd, Co, Cr, Cu and Ni measured at areas: without dolomites  $Dol^-$ , with different types of dolomites  $Dol$ , with ore-bearing dolomites  $Dol^+$

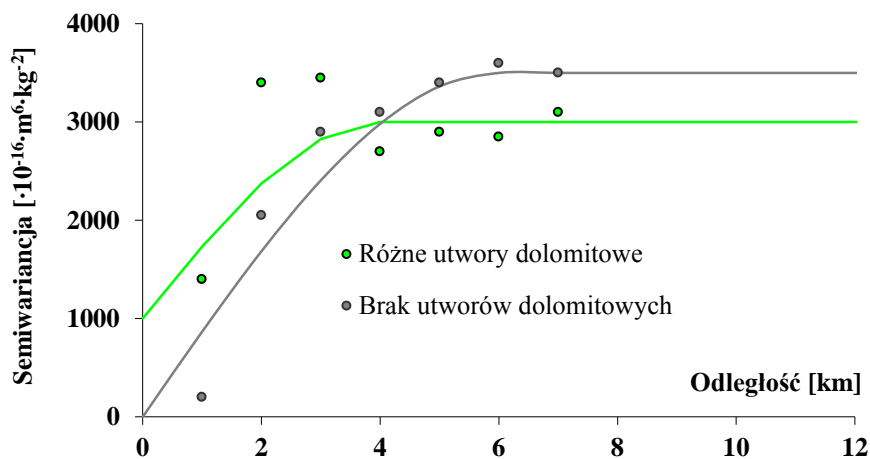
Podczas analiz zaobserwowano istotne statystycznie różnice pomiędzy rozkładami podatności magnetycznej i zawartości metali ciężkich, które zmierzono w trzech seriach pomiarowych,  $Dol^-$ ,  $Dol$ ,  $Dol^+$ . Wykonane testy potwierdziły, że jedynie rozkłady zawartości Co, Cr i Ni w glebie zmierzone na dolomitach kruszonośnych i na obszarach, na których utwory dolomitowe nie występowały, można było uznać za jednakowe.

Tabela 4.9. Wyniki testów Kruskala-Wallisa oraz median dla rozkładów podatności magnetycznej i zawartości metali ciężkich w glebie, zmierzonych na obszarach: bez utworów dolomitowych  $Dol^-$  i z różnymi utworami dolomitowymi  $Dol$

Table 4.9. Results of Kruskal-Wallis and median tests for distributions of magnetic susceptibility and concentration of heavy metals in soil measured at areas: without dolomites  $Dol^-$  and with different types of dolomites  $Dol$

	Test Kruskala-Wallisa		Test median
Podatność magnetyczna gleby	H <sub>0</sub> odrzucona		H <sub>0</sub> odrzucona
Arsen	H <sub>0</sub> odrzucona		H <sub>0</sub> odrzucona
Kadm	H <sub>0</sub> odrzucona		H <sub>0</sub> odrzucona
Kobalt	brak podstaw do odrzucenia H <sub>0</sub>	brak podstaw do odrzucenia H <sub>0</sub>	
Chrom	brak podstaw do odrzucenia H <sub>0</sub>	brak podstaw do odrzucenia H <sub>0</sub>	
Miedź	H <sub>0</sub> odrzucona		H <sub>0</sub> odrzucona
Żelazo	H <sub>0</sub> odrzucona		H <sub>0</sub> odrzucona
Mangan	H <sub>0</sub> odrzucona		H <sub>0</sub> odrzucona
Nikiel	brak podstaw do odrzucenia H <sub>0</sub>	brak podstaw do odrzucenia H <sub>0</sub>	
Ołów	H <sub>0</sub> odrzucona		H <sub>0</sub> odrzucona
Cynk	H <sub>0</sub> odrzucona		H <sub>0</sub> odrzucona

Wyniki analizy wariogramów pokazały, że podatność magnetyczną zmierzoną na obszarach, gdzie występowały utwory dolomitowe oraz gdzie utwory te nie występowały, charakteryzował podobny zasięg korelacji przestrzennych.



Rysunek 4.22. Wariogramy podatności magnetycznej zmierzonej na obszarach: bez dolomitów *Dol* oraz z różnymi utworami dolomitowymi *Dol*

Figure 4.22. Variograms of magnetic susceptibility measured at areas: without dolomites *Dol* and with different types of dolomites *Dol*

Zasięg korelacji podatności magnetycznej zmierzonej na obszarach, gdzie utwory dolomitowe nie występowały, wynosił około 6 km. Wariogram eksperymentalny podatności magnetycznej charakteryzował się brakiem efektu samorodka. Na wariogramie był obserwowany wyraźny i stosunkowo szybki spadek korelacji przestrzennych wraz z odległością. Dodatkowo, wariogram charakteryzował się regularnym przebiegiem dla małych odległości, wynoszących mniej niż 4 km. Obserwacje takie sugerowały, że podatność magnetyczną zmierzoną na obszarach, gdzie utwory dolomitowe nie występowały, charakteryzowała wyraźna i łatwa do określenia ciągłość przestrzenna.

Podatności magnetyczną zmierzoną na obszarach, na których występowały utwory dolomitowe, charakteryzował zasięg korelacji wynoszący około 5 km. Jednakże, na zasięg korelacji przestrzennych wpływ miał głównie pierwszy punkt wariogramu eksperymentalnego, który najczęściej jest obciążony największą niepewnością. Wariogram eksperymentalny miał wyraźny efekt samorodka wynoszący  $1000 \cdot 10^{-16} \text{ m}^6 \cdot \text{kg}^{-2}$ . Ponadto, wariogram eksperymentalny charakteryzował się nieregularnym przebiegiem, co wskazywało na mało wyraźną ciągłość przestrzenną, zwłaszcza dla małych odległości wynoszących poniżej 4 km. Obserwacje takie mogą sugerować, że ciągłość przestrzenna podatności magnetycznej mierzonej na obszarach, gdzie występują utwory dolomitowe jest gorsza niż w przypadku obszarów, gdzie utwory takie nie występują.

## 4.2 Dobór sieci pomiarowych w magnetometrii terenowej

### 4.2.1 Charakterystyczne cechy zmienności przestrzennej podatności magnetycznej

Wyniki badań zmienności przestrzennej podatności magnetycznej pozwoliły na określenie kilku charakterystycznych zasięgów korelacji przestrzennych. Dodatkowo, przeprowadzone analizy umożliwiły wykrycie kilku charakterystycznych cech zmienności przestrzennej podatności magnetycznej, mierzonej na terenie o różnym sposobie zagospodarowania, porośniętym przez lasy o różnego typu drzewostanie lub objętym występowaniem utworów dolomitowych. Poniżej zostały zestawione najważniejsze wnioski wyciągnięte podczas analizy zmienności przestrzennej podatności magnetycznej, które wykorzystano do określania wytycznych wyznaczania sieci pomiarowych podatności magnetycznej gleb.

- i. Na najbardziej rozległych obszarach pomiarowych obserwowano skale przestrzenne podatności magnetycznej wynoszące około 30 km, 12 km i 5 km, które mogą być powiązane ze zmiennością w skali regionalnej.
- ii. Dla mniejszych obszarów pomiarowych obserwowano zasięgi korelacji wynoszące kilkaset i kilkadziesiąt metrów, które związane są ze zmiennością podatności magnetycznej gleb w skali lokalnej.
- iii. Podatność magnetyczna mierzona na glebach wytworzonych z piasków charakteryzowała niemal dwukrotnie mniejsza ciągłość przestrzenna, w porównaniu z podatnością mierzoną na glebach wytworzonych z glin zwałowych.
- iv. Podatność magnetyczna mierzona na obszarach, na których występują utwory dolomitowe, charakteryzowała się gorszą ciągłością przestrzenną, w porównaniu z podatnością obszarów, na których utwory dolomitowe nie występowały.
- v. Na obszarach leśnych, zarówno w lasach iglastych, jak i liściastych, na wariogramach podatności magnetycznej był obserwowany bardzo wyraźny efekt periodyczny.
- vi. Podatność magnetyczna mierzona na polach uprawnych charakteryzowała się mniejszą ciągłością przestrzenną w porównaniu z podatnością magnetyczną mierzoną na terenach leśnych.

Stosowanie sieci pomiarowych o zbyt dużej gęstości wiąże się ze znacznym zwiększeniem kosztów pomiarów oraz wydłuża czas przeprowadzenia kampanii pomiarowej. Jednocześnie nie wzrasta w znaczny sposób precyzja wykonywanych rozkładów przestrzennych. Stosowanie sieci pomiarowych o zbyt małej gęstości uniemożliwia dokładne zbadanie zmienności przestrzennej, wymodelowanie wariogramów i w konsekwencji

nie jest możliwe wykorzystanie geostatystycznych metod estymacji, takich jak kriging i kokriging. Rezultaty badań prowadzonych do tej pory sugerują, że średnia odległość pomiędzy punktami pomiarowymi powinna być dobierana w taki sposób, aby umożliwić zbadanie zmienności przestrzennej w tej skali, w której później będą wykonywane rozkłady przestrzenne. Średnia odległość pomiędzy punktami pomiarowymi powinna wynosić od 30% do 50% charakterystycznego zasięgu korelacji przestrzennych (Zawadzki, 2005). Wobec tego, otrzymane zasięgi korelacji przestrzennych, charakteryzujące podatność magnetyczną gleb mogą być pomocne w planowaniu pomiarów na terenie Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego.

#### *4.2.2 Dobór średniej odległości pomiędzy punktami pomiarowymi podatności magnetycznej*

W celu porównania efektywności schematów pomiarowych o różnej gęstości pomiarowej zostały wykonane rozkłady przestrzenne na obszarze pomiarowym *GOP*, o wymiarach około 35 km i 70 km (opis powierzchni pomiarowej w Załączniku nr 1). Bazując na wynikach analiz zmienności przestrzennej, przyjęto, że charakterystyczny dla tej powierzchni pomiarowej zasięg korelacji podatności magnetycznej wynosi około 12 km. Optymalna odległość pomiędzy punktami pomiarowymi powinna więc wynosić od około 30% do 50% tego 12-kilometrowego zasięgu korelacji, czyli od około 3,6 km do 6 km.

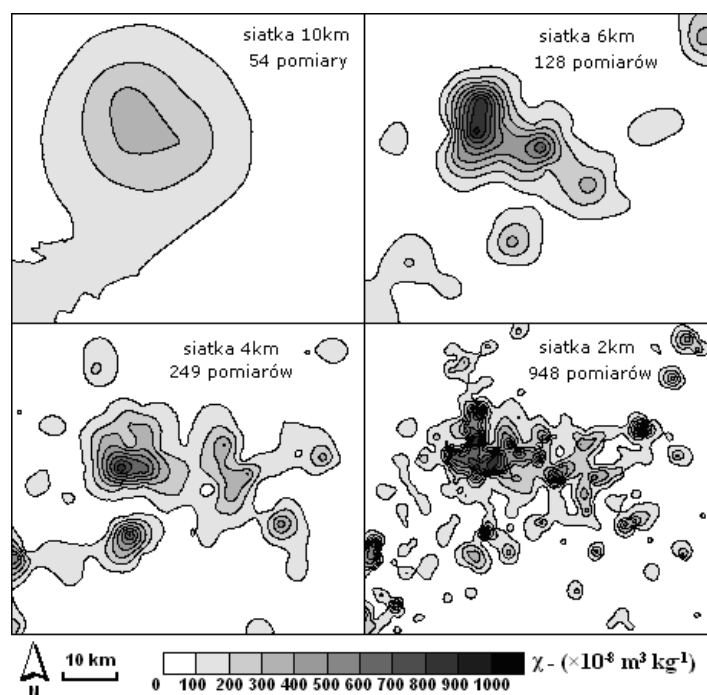
W celu zobrazowania tego zagadnienia, wykonano cztery rozkłady przestrzenne podatności magnetycznej na powierzchni *GOP*, wykorzystując cztery zbiory danych pomiarowych.

- i. Sieć 54 punktów, ze średnią odległością pomiędzy punktami pomiarowymi, wynoszącą 10 km, co stanowiło około 83% charakterystycznego zasięgu korelacji. Zgodnie z wynikami badań, była to sieć pomiarowa o zbyt małej gęstości.
- ii. Sieć 128 punktów, ze średnią odległością pomiędzy punktami pomiarowymi wynoszącą 5 km, co stanowiło około 42% charakterystycznego zasięgu korelacji. Zgodnie z wynikami badań, była to sieć pomiarowa, której gęstość pomiarowa mieściła się w zakresie optymalnych wartości.
- iii. Sieć 249 punktów, ze średnią odległością pomiędzy punktami pomiarowymi wynoszącą 4 km, co stanowiło około 33% charakterystycznego zasięgu korelacji. Zgodnie z wynikami badań, była to sieć pomiarowa, której gęstość pomiarowa mieściła się w zakresie optymalnych wartości.

- iv. Sieć 948 punktów, ze średnią odległością pomiędzy punktami pomiarowymi wynoszącą 2 km, co stanowiło około 17% charakterystycznego zasięgu korelacji. Zgodnie z wynikami badań, była to sieć pomiarowa o zbyt dużej gęstości.

Wszystkie rozkłady (rys. 4.23.) zostały wykonane metodą krigingu zwykłego, z wykorzystaniem modeli wariogramów wykonanych podczas badania zmienności przestrzennej podatności magnetycznej.

Jest widoczne, że sieć pomiarowa, dla której średnia odległość pomiędzy punktami pomiarowymi wynosiła 10 km, była niewystarczająca do wykrycia obszaru potencjalnie zanieczyszczonego aglomeracji katowickiej. W przypadku schematów pomiarowych o większej gęstości, wynoszącej 6 km i 4 km, obserwowano poprawę szczegółowości rozkładów przestrzennych, aczkolwiek znacznie wzrastała liczba pomiarów, z 50 do odpowiednio 128 i 249. Rozkład przestrzenny, wykonany przy wykorzystaniu pomiarów oddalonych od siebie średnio o 2 km, był najbardziej szczegółowy, jednak liczba pomiarów wzrastała do 948.



**Rysunek 4.23. Rozkłady przestrzenne podatności magnetycznej na obszarze GOP, wykonane na podstawie sieci pomiarowych o różnej gęstości**

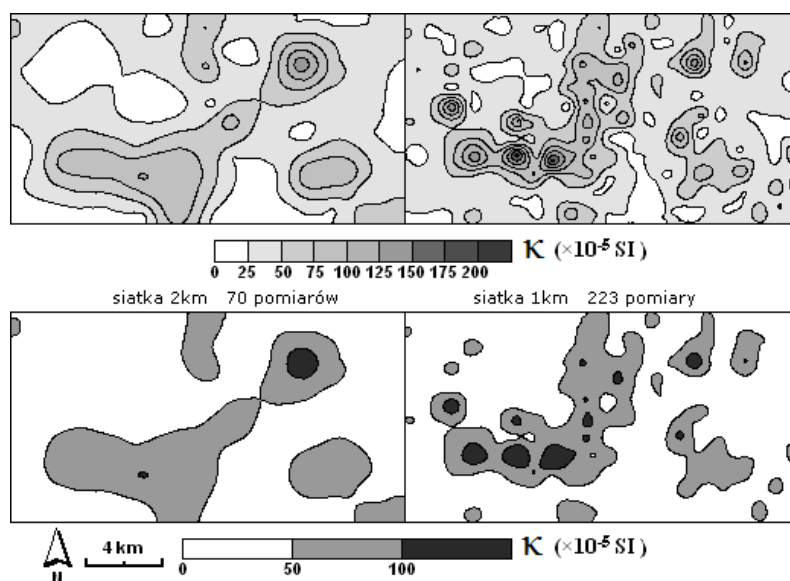
**Figure 4.23. Spatial distributions of magnetic susceptibility at area GOP, calculated using sampling grids of different density**

Drugi przykład obrazujący wykorzystanie charakterystycznych zasięgów korelacji do określania gęstości sieci pomiarowej, został pokazany na rozkładach przestrzennych podatności magnetycznej dla obszaru *Mikołów* (rys. 4.24.). Obszar ten miał kształt prostokąta o wymiarach około 20 km na 12 km. W związku z tym, charakterystyczny dla tego obszaru

zakres korelacji przestrzennych podatności magnetycznej wynosił około 6 km, a optymalne odległości pomiędzy punktami pomiarowymi od 1,8 km (30% z 6 km) do 3,0 km (50% z 6 km). Do wykonania rozkładów przestrzennych podatności magnetycznej zostały wykorzystane dwa zbiory danych.

- i. Sieć 70 punktów, ze średnią odległością pomiędzy pomiarami wynoszącą 2 km, co stanowiło około 33% charakterystycznego zasięgu korelacji. Zgodnie z wynikami badań, była to sieć pomiarowa, której gęstość pomiarowa mieściła się w zakresie optymalnej wartości.
- ii. Sieć 223 punktów, ze średnią odległością pomiędzy pomiarami wynoszącą 1 km, co stanowiło około 17% charakterystycznego zasięgu korelacji. Zgodnie z wynikami badań, była to sieć pomiarowa o zbyt dużej gęstości.

Rozkłady przestrzenne zostały wykonane także z podziałem wartości podatności magnetycznej na klasy wartości od 0 do  $50 \cdot 10^{-5}$  SI oraz od  $50 \cdot 10^{-5}$  SI do  $100 \cdot 10^{-5}$  SI. Na podstawie dotychczasowych wyników badań, podatność magnetyczna równa  $50 \cdot 10^{-5}$  SI jest uważana za wartość wskazującą na potencjalne zanieczyszczenie metalami ciężkimi (Magiera, 2004).



**Rysunek 4.24. Rozkłady przestrzenne podatności magnetycznej na powierzchni pomiarowej Mikołów, wykonane na podstawie sieci pomiarowych o różnej gęstości**

**Figure 4.24. Spatial distributions of magnetic susceptibility at area Mikołów, calculated using sampling grids of different density**

W tym przypadku, został również zaobserwowany wzrost szczegółowości rozkładu przestrzennego wraz ze wzrostem gęstości pomiarowej. Jednak wraz z dwukrotnym zmniejszeniem odległości pomiędzy punktami pomiarowymi liczba pomiarów wzrastała trzykrotnie, z 70 do 223 pomiarów. Niemniej jednak, do określenia obszaru potencjalnie

zanieczyszczonego wystarczyłaby sieć ze średnią odległością pomiędzy pomiarami, wynoszącą 2 km.

### 4.3 Podsumowanie

Jak pokazały rezultaty badań, podczas planowania pomiarów magnetometrycznych należy uwzględnić różnice w ciągłości przestrzennej podatności magnetycznej, wynikające z różnego typu gleby, różnic pomiędzy terenami leśnymi i uprawnymi oraz obecności utworów dolomitowych.

Podatność magnetyczna gleb zmierzona na obszarach objętych występowaniem dolomitów kruszconośnych była istotnie wyższa od zmierzonej na pozostałych obszarach. Wpływ na to może mieć naturalna wysoka zawartość związków podwyższających podatność magnetyczną w dolomitach kruszconośnych. Wyniki analizy wariogramów pokazały, że podatność magnetyczna mierzona na obszarach, gdzie występują utwory dolomitowe, charakteryzuje się gorszą ciągłością przestrzenną. Z tego względu, w miarę możliwości, powinno się unikać wykonywania pomiarów podatności magnetycznej na takich obszarach.

W przypadku obszarów, które obejmują zarówno tereny leśne, pozamiejskie, jak i silnie zurbanizowane, może być korzystne stosowanie różnych gęstości pomiarowych. Na obszarach o silnej presji antropogenicznej pomiary podatności magnetycznej mogą być wykonane z większą gęstością, natomiast na obszarach leśnych średnia odległość pomiędzy pomiarami może być zwiększona. Pozwala to na precyzyjne wykonanie rozkładów przestrzennych i jednocześnie zmniejszenie liczby koniecznych do wykonania pomiarów terenowych. Średnia odległość pomiędzy pomiarami powinna być dobierana w zależności od skali badań, tak aby była równa około 30% - 50% charakterystycznego zakresu korelacji. Umożliwia to wykonanie dokładnego wariogramu, zbadanie zmienności przestrzennej i pełne wykorzystanie zalet metod geostatystycznych.

Wartości podatności magnetycznej mierzonej w lasach cechuje większy zasięg korelacji w porównaniu z podatnością magnetyczną mierzoną na polach uprawnych. Z drugiej strony, bardziej zmienne środowisko leśne, warunkuje większą zmienność podatności magnetycznej w lasach w małej skali. W związku z tym, podczas wykonywania pomiarów w dużej skali, powinno się unikać umieszczania punktów pomiarowych podatności magnetycznej na polach uprawnych. Bardziej celowe wydaje się wykonywanie pomiarów na obszarach leśnych, a następnie szacowanie rozkładów przestrzennych na całym badanym obszarze.



W przypadku pomiarów podatności magnetycznej miernikiem MS2D Bartington, zwykle w jednym punkcie pomiarowym wykonuje się kilkanaście pomiarów w promieniu 2 m. Następnie jest wyliczana średnia i przyjmowana jako wartość podatności magnetycznej w punkcie pomiarowym. Wyniki badań zmienności przestrzennej podatności magnetycznej, zwłaszcza w skali lokalnej, pokazały jednak, że bardziej celowe jest nie uśredniać wartości podatności magnetycznej. Zaobserwowano bowiem, że w przypadku wykorzystania danych pomiarowych nieuśrednionych znacznie łatwiej jest wykonać dokładny wariogram, niż używając danych uśrednionych.

## 5 Wstęp do integracji danych w magnetometrii terenowej

Pomiary magnetometryczne, wykonywane w terenie, są pomiarami szybkimi i bardzo wygodnymi, jednak z drugiej strony są wrażliwe na szereg czynników pomiarowych, które w dużym stopniu mogą wpływać na mierzone wartości podatności magnetycznej. W związku z powyższym, niektóre czynniki pomiarowe, mogą w istotny sposób wpływać także na jakość integracji danych magnetometrycznych i chemicznych. Wynika to głównie z pogorszenia lub zafałszowania zależności przestrzennych pomiędzy integrowanymi wielkościami. W konsekwencji, w pewnych sytuacjach, może być niemal niemożliwe wykonanie geostatystycznej integracji danych.

Przeprowadzone analizy miały na celu głównie zbadanie wpływu stopnia rozwoju poszczególnych poziomów i podpoziomów glebowych, zwłaszcza najwyższego położonego podpoziomu ściółki Ol, na mierzone wartości podatności magnetycznej. Miąższość podpoziomu Ol może być silnie zmienna na badanym obszarze. Dla niektórych badanych obszarów zmienność miąższości poziomu ściółki sięgała 50%. Ponadto, w lasach górskich, gdzie była wykonywana część pomiarów, poziom organiczny miał bardzo małą miąższość. Z tego względu, większość magnetycznych cząstek pochodzenia antropogenicznego była zakumulowana na małej głębokości, czego rezultatem były znacznie wyższe wartości mierzonej podatności magnetycznej.

Miernik MS2D Bartington ma zasięg penetracji wynoszący około 10 cm, ale jego zdolność do mierzenia podatności magnetycznej maleje bardzo szybko w miarę zagłębiania się w profilu glebowym. Około 50% całkowitego sygnału jest zbierane z głębokości do około 1,5 cm, natomiast 90% sygnału z głębokości do około 6 cm. W konsekwencji, wartości mierzone tym miernikiem mogą w dużym stopniu zależeć od miąższości podpoziomu Ol w miejscu wykonywania pomiaru. Ponadto, wraz ze wzrostem miąższości podpoziomów organicznych fermentacyjnego Of i humusowego Oh, rośnie rozproszenie cząstek magnetycznych pochodzenia antropogenicznego. W rezultacie wartości podatności magnetycznej mierzone w punktach o takiej samej presji antropogenicznej, ale o znacznie różniącej się miąższości poziomu organicznego gleby mogą się bardzo różnić.

### 5.1 Korelacje pomiędzy podatnością magnetyczną różnych poziomów glebowych

W badaniach wykorzystano pomiary wykonane w skali lokalnej, na powierzchni pomiarowej *Szczykowice*. W czterech punktach pomiarowych przeprowadzono pomiary podatności magnetycznej miernikami MS2D Bartington, MS2F Bartington oraz SM-30.

Pomiary były wykonywane na czterech kolejno usuwanych podpoziomach glebowych, zaczynając od powierzchni gleby:

- i. na podpoziomie organicznym ściółki Ol,
- ii. na podpoziomie organicznym fermentacyjnym Of,
- iii. na podpoziomie organicznym humusowym Oh,
- iv. na podpoziomie próchnicznym humusowym Ah.

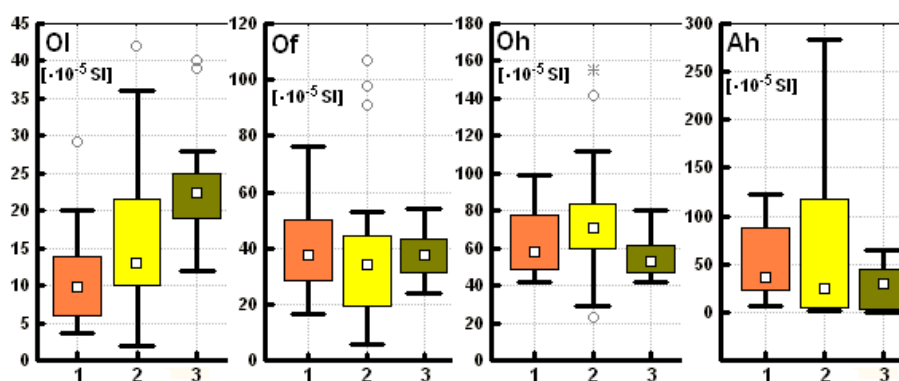
W dwóch, spośród czterech punktów pomiarowych, wszystkie opisane wyżej podpoziomy glebowe były dobrze wykształcone i możliwe do wyróżnienia. W szczególności miąższość podpoziomu Oh wynosiła przynajmniej 1 cm, co pozwalało na pomiar podatności na tym poziomie glebowym. W dwóch pozostałych punktach pomiarowych podpoziom Oh był słabo rozwinięty i z tego powodu pomiar był wykonywany łącznie z podpoziomów Oh i Of, co oznaczono symbolem Of/Oh. W dalszej części pracy, analizy zostały wykonane oddzielnie dla podatności mierzonej w punktach, gdzie gleba miała dobrze wykształcony podpoziom Oh i oddzielnie dla punktów, gdzie jego miąższość nie przekraczała 1 cm.

**Tabela 5.1. Statystyki opisowe podatności magnetycznej zmierzonej miernikami SM 30, MS2F, MS2D na różnych podpoziomach glebowych na powierzchni *Szczejkowice***

**Table 5.1. Descriptive statistics of magnetic susceptibility measured with SM 30, MS2F, MS2D devices at particular soil sub-horizons at area *Szczejkowice***

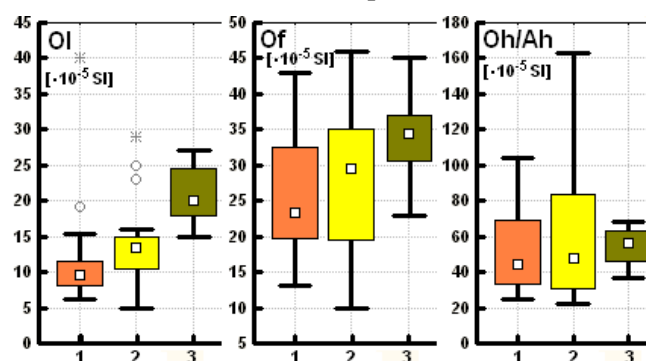
		N	Średnia	Mediana	Min	Max	Kwartył 25%	Kwartył 75%	Odchylenie standardowe
		[-]	[·10 <sup>-5</sup> SI]						
<b>Gleby z dobrze wykształconym podpoziomem Oh</b>									
<b>Ol</b>	<b>SM 30</b>	20	10,84	9,85	3,70	29,30	5,95	13,90	6,21
	<b>MS2F</b>	20	16,25	13,00	2,00	42,00	10,00	21,50	10,18
	<b>MS2D</b>	20	23,75	22,50	12,00	40,00	19,00	25,00	7,77
<b>Of</b>	<b>SM 30</b>	20	39,80	37,80	16,40	76,20	28,60	50,30	15,48
	<b>MS2F</b>	20	39,95	34,00	6,00	107,00	19,50	44,50	27,98
	<b>MS2D</b>	20	38,50	37,50	24,00	54,00	31,50	43,50	8,71
<b>Oh</b>	<b>SM 30</b>	20	63,11	57,95	41,80	98,80	48,60	77,45	18,25
	<b>MS2F</b>	20	76,15	71,00	23,00	155,00	60,00	83,50	31,99
	<b>MS2D</b>	20	55,80	53,00	42,00	80,00	47,00	61,50	11,20
<b>Ah</b>	<b>SM 30</b>	19	48,02	35,90	7,00	122,00	23,00	88,00	35,33
	<b>MS2F</b>	20	67,25	25,00	2,00	284,00	5,50	118,00	83,06
	<b>MS2D</b>	20	25,85	30,00	0,00	65,00	4,00	44,00	23,15
<b>Gleby z słabo wykształconym podpoziomem Oh</b>									
<b>Ol</b>	<b>SM 30</b>	20	11,65	9,70	6,20	40,00	8,05	11,60	7,33
	<b>MS2F</b>	20	14,10	13,50	5,00	29,00	10,50	15,00	5,81
	<b>MS2D</b>	20	21,15	20,00	15,00	27,00	18,00	24,50	3,91
<b>Of/Oh</b>	<b>SM 30</b>	20	25,40	23,40	13,20	42,90	19,65	32,45	8,43
	<b>MS2F</b>	20	28,20	29,50	10,00	46,00	19,50	35,00	10,27
	<b>MS2D</b>	20	34,00	34,50	23,00	45,00	30,50	37,00	5,19
<b>Ah</b>	<b>SM 30</b>	20	53,34	44,30	24,90	104,00	33,40	69,10	24,94
	<b>MS2F</b>	20	54,05	56,00	37,00	68,00	46,50	63,00	10,12
	<b>MS2D</b>	20	63,90	47,50	22,00	163,00	30,50	83,50	39,56

Dla gleb z dobrze wykształconym podpoziomem Oh maksymalne wartości podatności magnetycznej były obserwowane w podpoziomiu Oh. W przypadku gleb, gdzie poziom Oh nie był dobrze wykształcony, maksymalne wartości podatności magnetycznej były zlokalizowane w podpoziomiu Ah. Największy wzrost podatności magnetycznej był obserwowany w podpoziomiu Of, ponieważ że wyżej położony podpoziom Ol ma silne właściwości diamagnetyczne i na ogół charakteryzuje się niskimi wartościami podatności magnetycznej. Było to widoczne (rys. 5.1. i rys. 5.2.) szczególnie w przypadku pomiarów podatności magnetycznej wykonanych miernikiem SM-30, którego zasięg penetracji, wynoszący 2 cm, pozwalał na pomiar podatności magnetycznej tylko najwyżej położonego poziomu glebowego.



Rysunek 5.1. Wykresy pudełkowe podatności magnetycznej zmierzonej miernikami SM-30 – 1, MS2F - 2 oraz MS2D – 3, na glebach z dobrze wykształconym podpoziomem Oh, na powierzchni pomiarowej *Szczekowice*

Figure 5.1. Box-and-whisker plots of magnetic susceptibility measured with SM-30 – 1, MS2F - 2 and MS2D – 3 devices, at soils with well-developed Oh sub-horizon, at area *Szczekowice*



Rysunek 5.2. Wykresy pudełkowe dla podatności magnetycznej zmierzonej miernikami SM-30 – 1, MS2F - 2 oraz MS2D - 3 na glebach ze słabo wykształconym poziomem Oh na powierzchni pomiarowej *Szczekowice*

Figure 5.2. Box-and-whisker plots of magnetic susceptibility measured with SM-30 – 1, MS2F - 2 and MS2D – 3 devices, at soils without well-developed Oh sub-horizon, at area *Szczekowice*

W przypadku pomiarów wykonanych miernikiem SM-30, były obserwowane dodatnie korelacje pomiędzy podatnością magnetyczną mierzoną na podpoziomiu Ol i podatnością mierzoną na podpoziomiu Of. W przypadku wartości podatności magnetycznej mierzonych

na głębiej położonych podpoziomach Oh i Ah, korelacje były ujemne (tab. 5.2.). Oznacza to, że wartości podatności magnetycznej wzrastały wraz z głębokością w podpoziomach Ol i Of, następnie osiągały wartość maksymalną w podpoziomie Oh i malały w podpoziomie Ah.

W przypadku pomiarów wykonanych miernikami MS2F i MS2D, były obserwowane tylko dodatnie korelacje pomiędzy wartościami podatności magnetycznej, mierzonej na kolejnych podpoziomach glebowych. Najsilniejsze korelacje obserwowano pomiędzy podatnością magnetyczną mierzoną na podpoziomach Of oraz Ah. Dodatkowo, podatność magnetyczna, mierzona miernikiem MS2D na podpoziomie Of, była silniej skorelowana z wartościami mierzonymi na podpoziomach Oh i Ah niż do podatność mierzona miernikiem MS2D na podpoziomie Ol. Uwzględniając fakt, że większość metali ciężkich jest akumulowana w podpoziomach Of, Oh i Ah, podatność magnetyczna mierzona miernikiem MS2D po usunięciu poziomu Ol będzie silniej skorelowana z zanieczyszczeniem antropogenicznym.

**Tabela 5.2. Współczynniki korelacji Pearsona pomiędzy podatnością magnetyczną zmierzoną na różnych podpoziomach miernikami MS2D, MS2F oraz SM 30**

**Table 5.2. Pearson correlation coefficients between magnetic susceptibility measured at particular soil sub-horizons with MS2D, MS2F and SM 30 devices**

<b>Gleby z dobrze wykształconym podpoziomem Oh</b>				
		<b>Ol</b>	<b>Of</b>	<b>Oh</b>
<b>Of</b>	<b>MS2D</b>	0,08 p=0,733		
	<b>MS2F</b>	0,43 p=0,060		
	<b>SM-30</b>	0,39 p=0,096		
<b>Oh</b>	<b>MS2D</b>	0,14 p=0,546	0,17 p=0,484	
	<b>MS2F</b>	0,17 p=0,464	0,07 p=0,761	
	<b>SM-30</b>	-0,06 p=0,798	-0,03 p=0,916	
<b>Ah</b>	<b>MS2D</b>	0,51 p=0,021	0,60 p=0,005	0,37 p=0,103
	<b>MS2F</b>	0,59 p=0,006	0,45 p=0,045	0,14 p=0,542
	<b>SM-30</b>	-0,06 p=0,818	-0,03 p=0,896	-0,45 p=0,050
<b>Gleby z słabo wykształconym podpoziomem Oh</b>				
		<b>Ol</b>	<b>Of/Oh</b>	
<b>Of/Oh</b>	<b>MS2D</b>	0,08 p=0,747		
	<b>MS2F</b>	0,38 p=0,098		
	<b>SM-30</b>	-0,04 p=0,878		
<b>Ah</b>	<b>MS2D</b>	-0,09 p=0,720	-0,15 p=0,517	
	<b>MS2F</b>	-0,06 p=0,796	-0,37 p=0,107	
	<b>SM-30</b>	0,35 p=0,134	0,11 p=0,642	

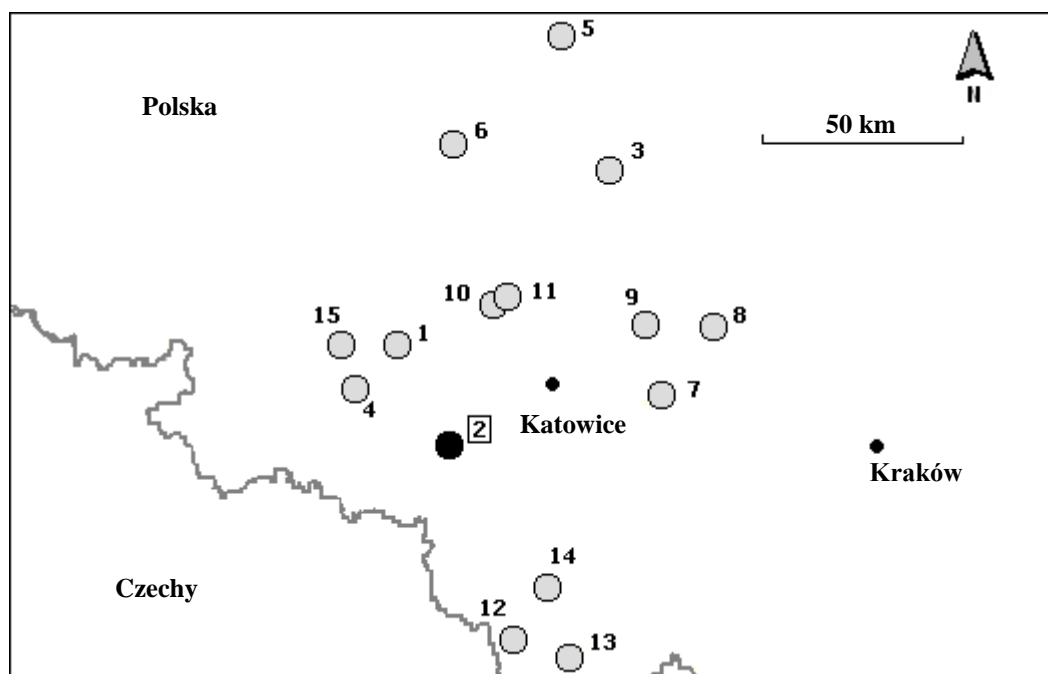
Wartości podatności magnetycznej, mierzone na różnych podpoziomach glebowych w punktach pomiarowych, tam gdzie gleby miały słabo wykształcony podpoziom Oh, były słabo skorelowane ze sobą. Obserwacje takie mogły być związane z małą miąższością poziomu organicznego w tych punktach pomiarowych.

## 5.2 Miąższość poziomu organicznego gleby a podatność magnetyczna mierzona miernikiem MS2D

W celu zbadania wpływu miąższości poziomu organicznego na mierzone wartości podatności magnetycznej miernikiem MS2D i jakość integracji danych magnetometrycznych, wykorzystano pomiary wykonane w 15 punktach pomiarowych, zlokalizowanych na powierzchni pomiarowej *Województwo Śląskie* (rys. 5.3.). W każdym z 15 punktów pomiarowych zostały wykonane serie pomiarów:

- i. podatności magnetycznej bez usuwania podpoziomu organicznego ściółki O<sub>l</sub>, w dalszej części oznaczane jako  $\kappa_{O_{l+}}$ ,
- ii. podatności magnetycznej po usunięciu podpoziomu organicznego ściółki O<sub>l</sub>, w dalszej części oznaczane jako  $\kappa_{O_{l-}}$ .

Pomiary wykonywano jedynie w lasach iglastych ze względu na to, że w lasach liściastych ściółka składała się głównie z opadłych liści. Średnia miąższość ściółki w lasach iglastych wynosiła około 3 cm i była niemal dwukrotnie większa niż w lasach liściastych, gdzie wynosiła 1,7 cm. Maksymalne wartości miąższości ściółki leśnej także znacznie się różniły. W lasach iglastych maksymalna miąższość ściółki wynosiła 8 cm, natomiast w lasach liściastych 5 cm.



Rysunek 5.3. Punkty pomiarowe podatności magnetycznej gleby na powierzchni *Województwo Śląskie*. Na czarno oznaczono powierzchnię *Szczekowice*, wykorzystaną do szczegółowych analiz

Figure 5.3. Sample points of magnetic susceptibility at area *Województwo Śląskie*.  
The area *Szczekowice*, used for detailed analyses, was marked in black

Współczynnik korelacji Pearsona, pomiędzy mierzonymi wartościami podatności magnetycznej a miąższością podpoziomu organicznego ściółki Ol, wynosił -0,19 i był statystycznie istotny na poziomie ufności 0,05. Wynik taki potwierdził istnienie ujemnej korelacji pomiędzy miąższością podpoziomu organicznego Ol a wartościami mierzonymi miernikiem MS2D.

Rezultaty pomiarów pokazały, że w każdym z 15 punktów pomiarowych, po usunięciu podpoziomu Ol, były mierzone wyższe wartości podatności magnetycznej (tab. 5.3.). Obserwacje takie spowodowane były tym, że 10-centymetrowy zasięg penetracji miernika MS2D pozwalał pomierzyć sygnał z głębiej położonych poziomów glebowych, w których w największym stopniu są kumulowane zanieczyszczenia pochodzenia antropogenicznego, w tym metale ciężkie. Wykonany test na równość średnich, potwierdził na poziomie istotności 0,05, że różnice pomiędzy wartościami średnimi podatności magnetycznej mierzonymi przed i po usunięciu podpoziomu Ol są statystycznie istotne (tab. 5.3.).

**Tabela 5.3. Statystyki opisowe podatności magnetycznej zmierzonej przed i po (w nawiasach) usunięciu podpoziomu organicznego ściółki Ol, na powierzchni Województwo Śląskie**

**Table 5.3. Descriptive statistics of magnetic susceptibility measured before and after (in parentheses) the removal of Ol sub-horizon, at area Województwo Śląskie**

Punkt pomiarowy	Średnia	Mediana	Minimum	Maksimum	Odchylenie standardowe	Współczynnik skośności
			[·10 <sup>-5</sup> SI]		[·10 <sup>-10</sup> SI]	[-]
1	19,8 (25,9)	16,0 (25,0)	10,0 (12,0)	47,0 (36,0)	9,0 (6,8)	1,78 (-0,34)
2	5,8 (12,8)	5,0 (12,0)	5,0 (9,0)	7,0 (18,0)	0,7 (3,1)	0,60 (-0,50)
3	26,3 (28,8)	27,0 (27,5)	16,0 (26,0)	45,0 (37,0)	7,9 (4,2)	1,14 (2,04)
4	19,1 (44,0)	19,0 (44,0)	15,0 (31,0)	28,0 (39,0)	4,2 (2,4)	1,93 (-1,48)
5	7,0 (8,9)	7,0 (8,0)	4,0 (7,0)	10,0 (15,0)	2,2 (2,8)	0,00 (2,32)
6	5,5 (8,5)	5,5 (8,5)	5,0 (6,0)	6,0 (11,0)	0,7 (2,4)	0,00 (0,00)
7	23,5 (47,2)	25,0 (48,5)	15,0 (43,0)	33,0 (51,0)	6,7 (3,4)	0,08 (-0,59)
8	17,3 (36,8)	16,0 (37,0)	13,0 (30,0)	23,0 (41,0)	4,4 (3,9)	0,46 (-1,07)
9	59,2 (68,8)	62,0 (67,0)	42,0 (55,0)	69,0 (88,0)	10,1 (12,4)	-0,81 (0,90)
10	50,3 (127,7)	52,0 (125,5)	35,0 (16,0)	67,0 (146,0)	11,9 (9,9)	0,21 (1,40)
11	25,3 (46,8)	24,0 (44,0)	20,0 (28,0)	33,0 (68,0)	5,7 (16,9)	1,01 (0,26)
12	42,6 (65,0)	43 (67,5)	27,0 (51,0)	64,0 (76,0)	8,7 (9,7)	0,73 (-0,58)
13	18,0 (34,0)	17,0 (35,5)	12,0 (31,0)	36,0 (37,0)	7,3 (2,4)	0,40 (-1,04)
14	15,0 (25,0)	15 (25,5)	11,0 (23,0)	18,0 (27,0)	2,2 (1,7)	-0,47 (-0,75)
15	37,5 (69,6)	37,0 (70,0)	21,9 (38,9)	61,2 (105,2)	13,3 (20)	1,40 (1,20)

Średnie wartości współczynników skośności dla rozkładów podatności magnetycznej, mierzonej po usunięciu podpoziomu Ol i bez jego usuwania, wynosiły odpowiednio 0,38 i 0,64. Skośność rozkładu była wyraźnie mniejsza dla podatności magnetycznej mierzonej po usunięciu podpoziomu Ol, aczkolwiek różnice te były statystycznie nieistotne. Dodatkowo, rozkłady podatności mierzonej po usunięciu podpoziomu Ol, charakteryzowały

się często skośnością lewostronną. Oznaczało to, że wartości nietypowe wiązały się głównie z niskimi wartościami podatności magnetycznej, które były powodowane dużą miąższością podpoziomu organicznego ściółki. W rezultacie może to prowadzić do pewnych niedoszacowań potencjalnego zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi.

Rezultaty testów wariancji pokazały (tab. 5.4.), że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o równości wariancji wartości podatności magnetycznej, mierzonej przed i po usunięciu podpoziomu Ol. Wyniki takie sugerują, że usunięcie ściółki leśnej przed wykonaniem pomiaru miernikiem MS2D nie powinno niekorzystnie wpłynąć na wariancję pomiarową.

**Tabela 5.4. Rezultaty testów średnich i wariancji dla podatności magnetycznej  $\kappa_{Ol+}$  zmierzonej przed i  $\kappa_{Ol-}$  po usunięciu podpoziomu organicznego ściółki Ol, na powierzchni *Województwo Śląskie***

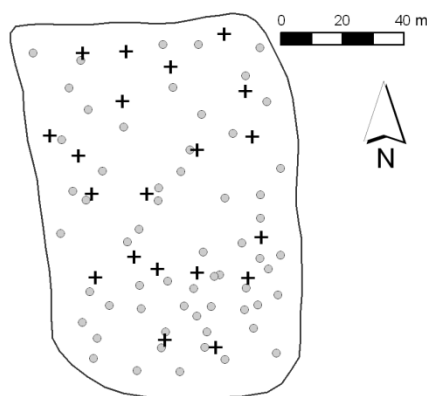
**Table 5.4. Results of mean and variance tests for magnetic susceptibility  $\kappa_{Ol+}$  measured before and  $\kappa_{Ol-}$  measured after the removal of Ol sub-horizon, at area *Województwo Śląskie***

Punkt pomiarowy	Wartość średnia		Wariancja		p-wartość	Test równości wariancji, hipoteza alternatywna:	
	$\kappa_{Ol+}$ [·10 <sup>-5</sup> SI]	$\kappa_{Ol-}$	$\kappa_{Ol+}$ [·10 <sup>-10</sup> SI]	$\kappa_{Ol-}$		$\text{Var}(\kappa_{Ol+}) > \text{Var}(\kappa_{Ol-})$	$\text{Var}(\kappa_{Ol-}) > \text{Var}(\kappa_{Ol+})$
1	19,8	25,9	80,5	46,9	0,458	H <sub>0</sub> przyjęta	H <sub>0</sub> przyjęta
2	5,8	12,8	0,5	9,4	0,000	H <sub>0</sub> przyjęta	H <sub>0</sub> odrzucona
3	26,3	28,8	61,8	17,4	0,467	H <sub>0</sub> przyjęta	H <sub>0</sub> przyjęta
4	19,1	44,0	17,5	6,0	0,000	H <sub>0</sub> przyjęta	H <sub>0</sub> przyjęta
5	7,0	8,9	4,7	7,8	0,188	H <sub>0</sub> przyjęta	H <sub>0</sub> przyjęta
6	5,5	8,5	0,5	5,7	0,173	H <sub>0</sub> przyjęta	H <sub>0</sub> przyjęta
7	23,5	47,1	44,5	11,4	0,000	H <sub>0</sub> przyjęta	H <sub>0</sub> przyjęta
8	17,3	36,8	19,1	15,4	0,000	H <sub>0</sub> przyjęta	H <sub>0</sub> przyjęta
9	59,2	68,8	102,0	154,7	0,131	H <sub>0</sub> przyjęta	H <sub>0</sub> przyjęta
10	50,3	127,7	141,2	97,9	0,000	H <sub>0</sub> przyjęta	H <sub>0</sub> przyjęta
11	25,3	46,8	32,9	287,2	0,047	H <sub>0</sub> przyjęta	H <sub>0</sub> przyjęta
12	42,6	65,0	74,9	93,9	0,000	H <sub>0</sub> przyjęta	H <sub>0</sub> przyjęta
13	18,0	34,0	54,0	5,8	0,000	H <sub>0</sub> odrzucona	H <sub>0</sub> przyjęta
14	15,0	25,0	4,9	2,9	0,000	H <sub>0</sub> przyjęta	H <sub>0</sub> przyjęta
15	37,5	69,6	175,9	401,8	0,002	H <sub>0</sub> przyjęta	H <sub>0</sub> przyjęta

### 5.3 Weryfikacja wyników

Następnie, w celu zweryfikowania wyników pomiarów podatności wykonanych w skali regionalnej na powierzchni *Województwo Śląskie*, zostały wykonane pomiary w skali lokalnej na obszarze *Szczykowice* (rys. 5.4).





**Rysunek 5.4. Sieć 60 pomiarów wykonanych miernikiem MS2D oraz 20 pomiarów chemicznych, podatności masowej, podatności magnetycznej, na powierzchni *Szczekowice*, oznaczone odpowiednio punktami i krzyżami**

**Figure 5.4. Sampling grid of magnetic susceptibility and chemical measurements and magnetic susceptibility in soil profile, at area *Szczekowice*, denoted by points and crosses respectively**

W 20 odpowiednio wybranych punktach pomiarowych wykonano pomiary:

- i. zawartości metali ciężkich w glebie,
- ii. masowej podatności magnetycznej,
- iii. podatności magnetycznej w profilu glebowym przy użyciu miernika SM-400,
- iv. podatności magnetycznej objętościowej miernikiem MS2D.

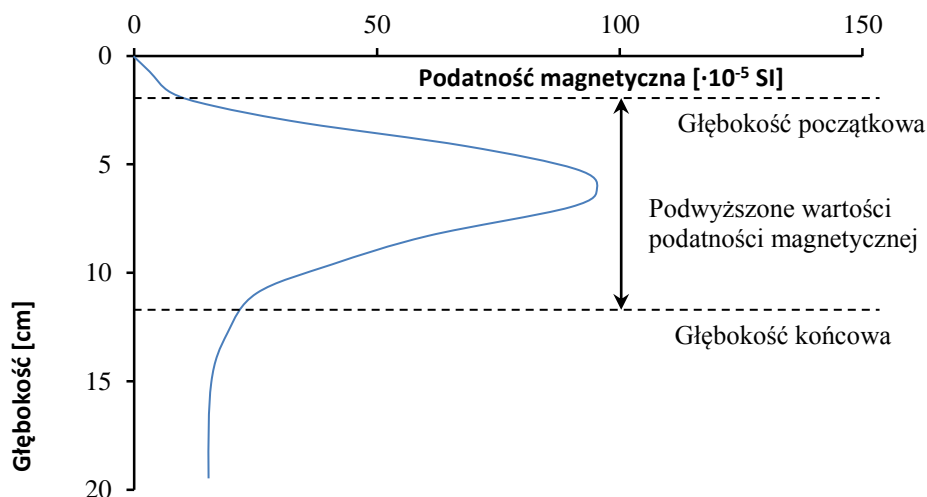
W każdym z 20 punktów pomiary miernikiem MS2D przeprowadzano dwukrotnie. Najpierw wykonany zostały pomiary przed usunięciem podpoziomu ściółki O<sub>1</sub>, a następnie po usunięciu tego podpoziomu. W każdym przypadku w punkcie pomiarowym wykonano od 10 do 15 pojedynczych pomiarów miernikiem MS2D, które następnie uśredniono.

Dodatkowo, na całym badanym obszarze wykonano pomiary podatności magnetycznej miernikiem MS2D przed usunięciem podpoziomu ściółki O<sub>1</sub> w 60 innych punktach pomiarowych (rys. 5.4.).

Pomiary podatności magnetycznej w profilu glebowym zostały wykorzystane do określenia takich parametrów, jak (rys. 5.5.):

- i. początkowa głębokość w profilu glebowym  $d_p$ , na której był obserwowany silny wzrost wartości podatności magnetycznej spowodowany zanieczyszczeniem antropogenicznym,
- ii. końcowa głębokość w profilu glebowym  $d_k$ , na której było obserwowane ustalenie się wartości podatności magnetycznej,
- iii. miąższość warstwy gleby  $m_{p-k}$ , dla której były obserwowane podwyższone wartości podatności magnetycznej, spowodowane zanieczyszczeniem antropogenicznym.

Powyższe parametry były ściśle powiązane z rozwojem profilu glebowego i stopniem zanieczyszczenia antropogenicznego. Miąższość podpoziomu O1 była w przybliżeniu równa odległości od powierzchni gleby do  $d_p$ , natomiast miąższość poziomów, w których zakumulowane są metale ciężkie, była w przybliżeniu równa odległości pomiędzy  $d_k$  i  $d_p$ , czyli miąższości warstwy  $m_{p-k}$ .



**Rysunek 5.5.** Głębokość początkową  $d_p$ , głębokość końcową  $d_k$  oraz miąższość warstwy  $m_{p-k}$ , gdzie obserwowano podwyższone wartości podatności magnetycznej w profilu glebowym

**Figure 5.5.** Initial depth  $d_p$ , end depth  $d_k$ , and thickness of the layer  $m_{p-k}$  where the heightened values of magnetic susceptibility were observed in soil profile

Zawartość Fe, Mn, Zn, Pb, Cd, Cu, Cr, Ni, Co w glebie została wyznaczona na podstawie próbek glebowych, które wycięto z tej części profilu glebowego, w której było obserwowane wzmocnienie sygnału magnetycznego  $m_{p-k}$ .

Na badanym obszarze, zawartość Cd, Co i Ni w glebie była bardzo niska, w niektórych miejscach nawet poniżej zakresu pomiarowego. Zawartość pozostałych metali ciężkich była wyższa, jednak nie przekraczała wartości dopuszczalnych. Jedynie zawartość Pb w glebie przekraczała maksymalny dopuszczalny poziom 100 mg/kg (*Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002*).

Wartości podatności zmierzone przed usunięciem podpoziomu O1 były niskie, a średnie  $\kappa_{O1+}$  z całego badanego obszaru wynosiło  $25,35 \cdot 10^{-5}$  SI. Wartości podatności  $\kappa_{O1-}$  zmierzone po usunięciu ściółki były około 40% wyższe i przekraczały znacznie poziom  $50 \cdot 10^{-5}$  SI (tab. 5.5.), który jest według dotychczasowych badań (*Magiera, 2004*) uważany za odpowiadający potencjalnemu zanieczyszczeniu metalami ciężkimi. W przypadku  $\kappa_{O1+}$  były obserwowane małe, a czasami nawet ujemne współczynniki korelacji z zawartością poszczególnych metali ciężkich w glebie. Natomiast w przypadku  $\kappa_{O1-}$ , korelacje były wyraźnie wyższe i najczęściej dodatnie (tab. 5.6.). Jedynie w przypadku zawartości Cd i Ni

obserwowano ujemne wartości współczynników korelacji, ponieważ stężenia tych metali były bliskie zeru na całym badanym obszarze.

**Tabela 5.5. Statystyki opisowe podatności magnetycznej  $\kappa_{Ol+}$  mierzonej przed i  $\kappa_{Ol-}$  mierzonej po usunięciu podpoziomu Ol, podatności masowej  $\chi$  i zawartości metali ciężkich w glebie**

**Table 5.5. Descriptive statistics of magnetic susceptibility measured before  $\kappa_{Ol+}$  and after  $\kappa_{Ol-}$  removal of Ol sub-horizon,  $\chi$  mass magnetic susceptibility and concentration of heavy metals in soil**

		Średnia	Mediana	Min.	Maksimum	Kwartyl		Odchylenie standardowe
						25%	75%	
$\kappa_{Ol+}$	[ $\cdot 10^{-5}$ SI]	25,35	24,30	12,30	45,90	22,55	28,10	6,12
$\kappa_{Ol-}$		57,55	59,64	14,32	89,96	49,03	68,03	17,58
$\chi$	[ $m^3 \cdot kg^{-1}$ ]	169,34	153,60	49,90	284,70	128,20	225,50	65,94
$d_p$	[mm]	29	30	10	80	20	30	16
$m_{p-k}$		59	55	50	90	50	63	12
<b>Żelazo</b>		1928,43	1798,00	75,60	3400,00	1513,00	2500,50	755,10
<b>Mangan</b>		14,70	12,00	7,20	38,80	8,50	16,80	8,82
<b>Cynk</b>		18,81	13,80	4,00	58,00	9,50	23,00	14,62
<b>Ołów</b>		73,04	70,00	17,00	154,00	45,00	92,00	36,91
<b>Kadm</b>	[ $mg \cdot kg^{-1}$ ]	0,06	0,02	0,02	0,38	0,02	0,02	0,10
<b>Miedź</b>		8,42	7,60	2,60	14,80	6,20	11,50	3,53
<b>Chrom</b>		6,40	6,20	2,60	10,00	5,00	8,20	2,04
<b>Nikiel</b>		1,71	1,70	0,20	4,00	1,00	2,30	0,95
<b>Kobalt</b>		0,35	0,20	0,00	1,20	0,00	0,60	0,39

Wartości masowej podatności magnetycznej  $\chi$  były silnie skorelowane z zawartością metali ciężkich w glebie. Obserwowane współczynniki korelacji Pearsona wynosiły od 0,50 do ponad 0,90 dla większości metali ciężkich. Słabsze korelacje były obserwowane tylko pomiędzy  $\chi$  i zawartością Cd i Ni w glebie, ze względu na niską zawartość tych metali ciężkich w glebie. Biorąc pod uwagę, że pomiary podatności masowej są dokładniejsze od pomiarów terenowych wykonywanych miernikiem MS2D, można było przyjąć, że wartości  $\kappa_{Ol+}$  nie odzwierciedlały prawidłowo potencjalnego zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi.

**Tabela 5.6. Współczynniki korelacji Pearsona pomiędzy podatnością magnetyczną  $\kappa_{Ol+}$  mierzona przed i  $\kappa_{Ol-}$  po usunięciu podpoziomu Ol, podatnością masową  $\chi$  i zawartością poszczególnych metali ciężkich w glebie; zaznaczone współczynniki są statystycznie istotne dla  $\alpha = 0,05$**

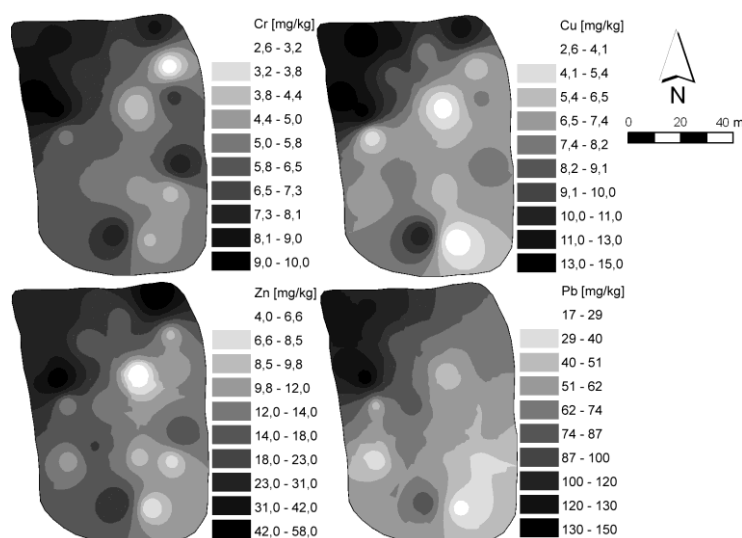
**Table 5.6. Pearson correlation coefficients between magnetic susceptibility  $\kappa_{Ol+}$  measured before and  $\kappa_{Ol-}$  after the removal of Ol sub-horizon,  $\chi$  mass magnetic susceptibility and concentration of heavy metals in soil; marked coefficients are statistically significant for  $\alpha = 0,05$**

	$\chi$	$d_p$	$m_{p-k}$	Fe	Mn	Zn	Pb	Cd	Cu	Cr	Ni	Co
$\chi$	-	-	-	0,82	<b>0,57</b>	<b>0,72</b>	<b>0,88</b>	0,29	<b>0,94</b>	<b>0,92</b>	0,33	<b>0,66</b>
$\kappa_{Ol+}$	-0,31	-0,08	-0,33	-0,14	0,05	-0,27	<b>-0,47</b>	-0,23	-0,33	-0,18	0,01	-0,09
$\kappa_{Ol-}$	<b>0,66</b>	<b>0,12</b>	<b>0,54</b>	<b>0,61</b>	-0,09	0,07	<b>0,60</b>	-0,16	<b>0,56</b>	<b>0,51</b>	-0,28	0,24

W przypadku  $\kappa_{Ol+}$  były obserwowane ujemne korelacje z wartościami  $d_p$  i  $d_k$ . Oznacza to, że wraz ze wzrostem miąższości poziomów, w których są akumulowane metale ciężkie,

były mierzone mniejsze wartości podatności magnetycznej. Obserwacje takie wynikały z faktu, że miernik MS2D nie był w stanie objąć zasięgiem penetracji wszystkich poziomów glebowych, zwłaszcza tych, w których w największym stopniu były zakumulowane zanieczyszczenia antropogeniczne.

W przypadku, gdy pomiary podatności magnetycznej były wykonywane po usunięciu podpoziomu O1, była obserwowana wyraźna dodatnia korelacja pomiędzy wartościami  $\kappa_{O1}$  a wartościami  $d_p$  oraz  $m_{p-k}$ . Oznacza to, że im większa była miąższość poziomu  $m_{p-k}$ , w którym obserwowano wzmocnienie sygnału magnetycznego, tym większe wartości podatności magnetycznej były mierzone miernikiem MS2D. Obserwacja taka potwierdziła, że usunięcie ściółki pozwoliło na zmierzenie podatności magnetycznej, która w lepszym stopniu odzwierciedlała zawartość zanieczyszczeń antropogenicznych i tym samym metali ciężkich.



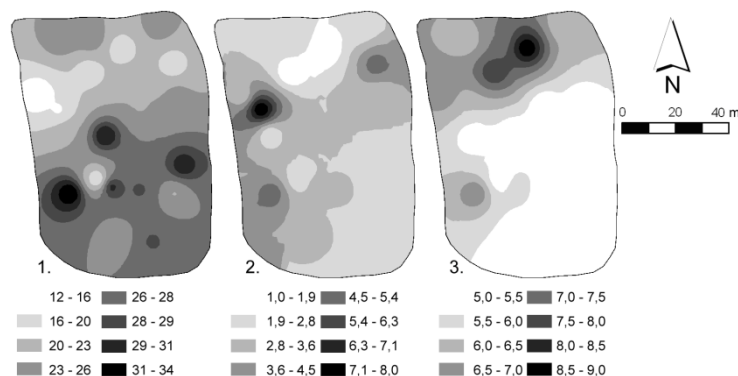
**Rysunek 5.6. Rozkłady przestrzenne zawartości Cr, Cu, Zn i Pb w glebie na powierzchni pomiarowej Szczekowice**

**Figure 5.6. Spatial distributions of Cr, Cu, Zn and Pb concentration in soil at area Szczekowice**

Największe stężenia metali ciężkich były obserwowane w części północno-zachodniej badanego obszaru (rys. 5.6), natomiast najniższe w części południowej i południowo-wschodniej. Różnice pomiędzy maksymalną i minimalną zawartością poszczególnych metali ciężkich na tych fragmentach badanego obszaru były nawet dziesięciokrotne. Jednak tylko w przypadku zawartości Pb w glebie przekroczony został dopuszczalny poziom równy 100 mg/kg.

Na rozkładzie przestrzennym  $\kappa_{O1+}$  było widoczne, że fragment badanego obszaru, gdzie obserwowano podwyższone wartości podatności magnetycznej, nie pokrywał się zupełnie z obszarem zanieczyszczonym metalami ciężkimi (rys. 5.6. i 5.7.). Najwyższe wartości

podatności magnetycznej były obserwowane w miejscach, gdzie  $d_p$  i  $m_{p-k}$  miały wartości najniższe, wynoszące odpowiednio do 2 cm i do 5 cm. Z tego względu miernik MS2D był w stanie objąć swoim zasięgiem penetracji wszystkie poziomy glebowe, w których były zakumulowane zanieczyszczenia antropogeniczne i tym samym zmierzyć najwyższe wartości podatności magnetycznej, wahające się od 30 do około  $70 \cdot 10^{-5}$  SI.



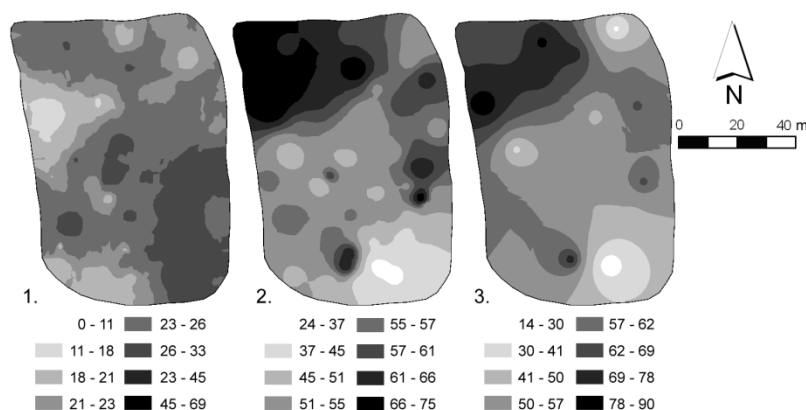
**Rysunek 5.7. Rozkłady przestrzenne: (1.) podatności magnetycznej  $\kappa_{Ol+}$  mierzonej bez usuwania ściółki [ $\cdot 10^{-5}$  SI], (2.) głębokości  $d_p$ , na której obserwowany był silny wzrost podatności magnetycznej [cm], (3.) szerokości warstwy  $m_{p-k}$ , gdzie obserwowane było wzmocnienie sygnału magnetycznego [cm], wyznaczone na podstawie 20 punktów pomiarowych, na powierzchni pomiarowej *Szczekowice***

**Figure 5.7. Spatial distributions of: (1.) magnetic susceptibility  $\kappa_{Ol+}$  measured without the removal of litter [ $\cdot 10^{-5}$  SI], (2.) depth  $d_p$  where the strong increase of magnetic susceptibility was observed [cm], (3.) thickness of the layer  $m_{p-k}$  where the heightened values of magnetic susceptibility were observed [cm], calculated using 20 sample points at area *Szczekowice***

W części północno-zachodniej badanego obszaru obserwowano najwyższe wartości początkowej głębokości  $d_p$  w profilu glebowym, na której był obserwowany silny wzrost wartości podatności magnetycznej, spowodowany zanieczyszczeniem antropogenicznym. Maksymalne wartości  $d_p$  dochodziły do 8 cm. Oznaczało to, że poziomy glebowe, w których zakumulowały się zanieczyszczenia antropogeniczne, były odsunięte o nawet 8 cm od powierzchni gleby, do której przykładano miernik MS2D podczas wykonywania pomiaru. W takich przypadkach, 10 centymetrowy zasięg penetracji miernika MS2D pozwalał zmierzyć podatność magnetyczną z maksymalnie 2 cm poziomów glebowych, w których były zakumulowane zanieczyszczenia antropogeniczne. Dodatkowo jest istotne, że 90% sygnału mierzonego przez miernik MS2D pochodzi z głębokości do 6 cm, a więc podatność magnetyczna mierzona w tej części badanego obszaru nie odzwierciedlała stopnia zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi. W konsekwencji tego, mierzone wartości podatności były niskie i wynosiły od 0 do  $15 \cdot 10^{-5}$  SI.

Ponadto, w części północno-zachodniej badanego obszaru były obserwowane także najwyższe wartości miąższości warstwy gleby  $m_{p-k}$ , dochodzące nawet do 9 cm. W związku z tym, pomiar wykonywany miernikiem MS2D przed usunięciem podpoziomu O1, który w tej

części badanego obszaru miał miąższość dochodzącą do 8 cm, był praktycznie bezcelowy. Aby pomiar podatności magnetycznej mógł odzwierciedlać potencjalne zanieczyszczenie gleby metalami ciężkimi, zasięg penetracji miernika MS2D musiałby wynosić przynajmniej 17 cm, co stanowi sumę maksymalnych wartości  $d_p = 8$  cm oraz  $m_{p-k} = 9$  cm. Obserwacje takie sugerują, że celowe może być zdjęcie ściółki przed wykonaniem pomiaru miernikiem MS2D. Istotny w tym przypadku jest także rodzaj ściółki, występujący w miejscu pomiaru. Zwykle podpoziom organiczny ściółki jest zbudowany głównie z opadłych liści i igliwia. Jednak często część powierzchni gleby jest porośnięta przez mchy i porosty, które mają bardzo dużą zdolność akumulowania metali ciężkich. W konsekwencji usunięcie ich przed wykonaniem pomiaru mogłoby zaniżyć mierzone wartości podatności magnetycznej. Rozwiązaniem problemu może być unikanie wykonywania pomiarów podatności magnetycznej miernikiem MS2D w takich miejscach.



**Rysunek 5.8. Rozkłady przestrzenne: (1.) podatności magnetycznej mierzonej w 60 punktach pomiarowych bez usuwania ściółki  $\kappa_{Ol+}$  [ $\cdot 10^{-5}$  SI], (2.) przeliczonej podatności magnetycznej mierzonej w 60 punktach pomiarowych bez usuwania ściółki  $\kappa_{Ol+}$  [ $\cdot 10^{-5}$  SI], (3.) podatności magnetycznej mierzonej w 20 punktach pomiarowych po usunięciu ściółki  $\kappa_{Ol-}$  [ $\cdot 10^{-5}$  SI], na powierzchni pomiarowej *Szczekowice***

**Figure 5.8. Spatial distributions of: (1.) magnetic susceptibility  $\kappa_{Ol+}$  measured at 60 points without the removal of litter [ $\cdot 10^{-5}$  SI], (2.) recalculated magnetic susceptibility  $\kappa_{Ol+}$  measured at 60 points without the removal of litter [ $\cdot 10^{-5}$  SI], (3.) magnetic susceptibility  $\kappa_{Ol-}$  measured at 20 points after the removal of litter [ $\cdot 10^{-5}$  SI], at area *Szczekowice***

W dalszej części analiz zostały wykorzystane pomiary podatności magnetycznej wykonane w 60 dodatkowych punktach pomiarowych, bez usuwania podpoziomu organicznego ściółki Ol. Tak pomierzone wartości podatności magnetycznej zostały przeliczone. Poprawka została wyznaczona na podstawie rozkładów przestrzennych podatności magnetycznej, które wyznaczono na podstawie 20 punktów pomiarowych, wykorzystanych w pierwszej części badań. Wartość poprawki powstała po odjęciu od wartości podatności magnetycznej  $\kappa_{Ol-}$ , mierzonej po usunięciu podpoziomu Ol, wartości podatności magnetycznej  $\kappa_{Ol+}$ , zmierzonej przed usunięciem tego podpoziomu.

Wyznaczono rozkład przestrzenny, będący różnicą rozkładów wartości  $\kappa_{O1-}$  i  $\kappa_{O1+}$  wykonanych przy wykorzystaniu 20 punktów pomiarowych. Następnie do każdego z 60 punktów pomiarowych została dodana odpowiednia poprawka, wynikająca z rozkładu różnicowego. Rozkład przestrzenny wykonany na podstawie tak przeliczonych wartości podatności magnetycznej, prezentował dużo lepszą zgodność z rozkładem zawartości metali ciężkich w glebie (rys. 5.8.) w porównaniu z rozkładem przestrzennym podatności magnetycznej mierzonej bez usuwania podpoziomu ściółki. Wartości podatności przekraczające  $50 \cdot 10^{-5}$  SI obserwowane były w części północno-zachodniej badanego obszaru (rys. 5.8.). W tej części badanego obszaru obserwowano podwyższone zawartości Cr, Cu i Zn w glebie oraz wartości Pb, przekraczające dopuszczalną wartość 100 mg/kg.

#### 5.4 Podsumowanie

Rezultaty badań pokazały, że wartości podatności magnetycznej mierzone miernikiem MS2D były ujemnie skorelowane z miąższością podpoziomu organicznego gleby O1. Dodatkowo, na obszarze pomiarowym *Szczyrkowice* średnie wartości podatności magnetycznej mierzonej po usunięciu ściółki, były około 40% wyższe niż wartości podatności mierzone bez usuwania tego poziomu glebowego. Obserwacje takie sugerują, że podpoziom O1 o dużej miąższości może wyraźnie zaniżyć wartości podatności magnetycznej, mierzone miernikiem MS2D. Dodatkowo, miąższość podpoziomu O1 może być silnie zmienna na badanym obszarze, co może także istotnie wpłynąć na mierzone wartości podatności magnetycznej i utrudnić interpretację wyników pomiarowych.

W przypadku, gdy podpoziom organiczny gleby O1 nie był usuwany przed pomiarem, zasięg penetracji miernika MS2D, wynoszący 10 cm, był często zbyt mały, aby zmierzyć sygnał magnetyczny pochodzący od cząstek magnetycznych, zakumulowanych w położonych głębiej podpoziomach: organicznym fermentacyjnym Of i organicznym humusowym Oh, gdzie zakumulowane są największe ilości metali ciężkich. Potwierdzała to także obserwacja, że wartości podatności magnetycznej, mierzonej po usunięciu podpoziomu O1, były bardziej skorelowane z wartościami podatności magnetycznej niższych podpoziomów Of i Oh w porównaniu z pomiarami wykonanymi bez usuwania podpoziomu O1.

Rezultaty badań pokazały, że miąższość podpoziomów, w których w największym stopniu akumulowane są metale ciężkie (Of i Oh), ma także istotny wpływ na wartości podatności magnetycznej, mierzone miernikiem MS2D. Na badanej powierzchni pomiarowej *Szczyrkowice* miąższość tych poziomów wynosiła od 5 cm do 9 cm, co stanowiło znaczną

część 10-centymetrowego zasięgu penetracji miernika MS2D i uniemożliwiało w niektórych przypadkach pomierzenie całkowitego sygnału magnetycznego, spowodowanego zanieczyszczeniem antropogenicznym. Efekt ten był jednak wyraźnie mniejszy niż wpływ podpoziomu O1 o dużej miąższości, ze względu na to, że 90% sygnału mierzonego MS2D pochodzi z pierwszych 6 cm gleby.

Analiza wariancji pomiarów, wykonanych miernikiem MS2D przed i po usunięciu podpoziomu O1 wykazała, że usunięcie podpoziomu organicznego nie powoduje wzrostu wariancji pomiarowej. Nie wzrastała także liczba pomiarów nietypowych i ekstremalnych.



## 6 Określenie najodpowiedniejszych miar do integracji pomiarów magnetometrycznych

Oprócz pomiarów podatności magnetycznej wykonywanych na powierzchni gleby, jest także możliwe wykonanie pomiarów w profilu glebowym (*Petrovsky i inni, 2004*). Wynikiem takiego pomiaru jest wykres podatności magnetycznej, w zależności od głębokości w profilu glebowym. Dotychczas, rezultaty pomiarów powierzchniowych i tych wykonywanych w profilu glebowym były najczęściej analizowane oddzielnie, bez wykorzystania geostatystycznych metod integracji danych.

Przed przystąpieniem do integracji pomiarów, wykonywanych miernikami MS2D Bartington i SM-400, było konieczne określenie najbardziej odpowiednich miar, wyznaczanych na podstawie rozkładów podatności magnetycznej w zależności od głębokości w profilu glebowym. Do analiz zostało wyznaczone kilka miar magnetometrycznych.

- i. Pole powierzchni, oznaczane symbolem  $A_{\kappa 10}$ , pod krzywą podatności magnetycznej w profilu glebowym, liczone od powierzchni gleby do głębokości 10 cm.
- ii. Pole powierzchni, oznaczane symbolem  $A_{\kappa}$ , liczone od powierzchni gleby do głębokości, na której wartości podatności magnetycznej były już niemal stałe i zmieniały się nieznacznie z głębokością.
- iii. Maksymalna wartość podatności magnetycznej w profilu glebowym, oznaczana symbolem  $\kappa_{max}$ .
- iv. Wartości podatności magnetycznej na głębokości równej 3 cm, oznaczana symbolem  $\kappa_{3cm}$ .
- v. Wartości podatności magnetycznej na głębokości równej 5 cm, oznaczana symbolem  $\kappa_{5cm}$ .

### 6.1 Korelacje pomiędzy miarami magnetometrycznymi a podatnością magnetyczną mierzoną miernikiem MS2D

Następnie, zbadano korelacje pomiędzy wartościami podatności magnetycznej  $\kappa_{0l}$ , mierzonej po usunięciu podpoziomu O1, na powierzchni gleby miernikiem MS2D a wyznaczonymi miarami magnetometrycznymi  $A_{\kappa 10}$ ,  $A_{\kappa}$ ,  $\kappa_{max}$ ,  $\kappa_{3cm}$ ,  $\kappa_{5cm}$ . W tym celu zostały wykorzystane pomiary podatności magnetycznej, wykonane na powierzchni pomiarowej *Szczejkowice*. Na całej badanej powierzchni *Szczejkowice* maksymalne wartości podatności magnetycznej w profilu glebowym były obserwowane na głębokości od około 3 cm do 5 cm. Natomiast rozkłady podatności magnetycznej w profilu glebowym miały przebieg

charakterystyczny dla zanieczyszczenia antropogenicznego. Nie obserwowano rozkładów, w których dominował wpływ naturalnych czynników glebowych.

Na początku, wykorzystując klasyczny współczynnik korelacji Pearsona oraz krzywą regresji, zbadano zależność pomiędzy miarami wyznaczonymi na podstawie pomiarów w profilu glebowym a podatnością mierzona na powierzchni gleby (tab. 6.1.). Dla każdego z współczynników korelacji został wykonany test istotności na poziomie  $\alpha = 0,05$ .

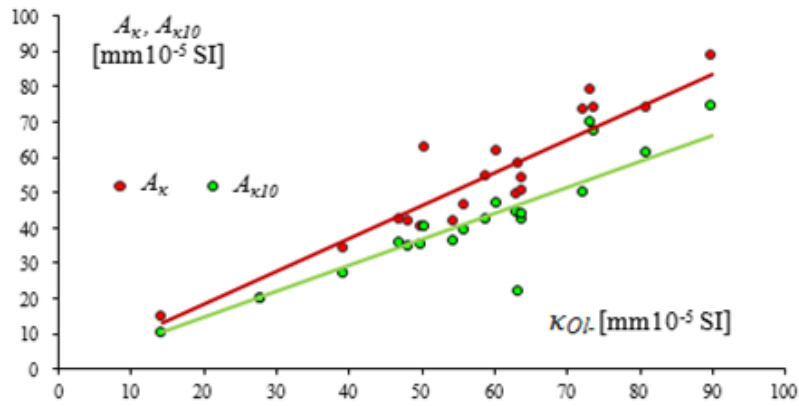
Podatność magnetyczna mierzona na powierzchni gleby była wyraźnie skorelowana z podatnością maksymalną  $\kappa_{max}$  w profilu glebowym oraz tą obserwowaną na głębokości 5 cm  $\kappa_{5cm}$ . Korelacje pomiędzy  $\kappa_{3cm}$  a podatnością magnetyczną mierzona na powierzchni były wyraźnie słabsze i statystycznie nieistotne. Wynikało to z faktu, że na głębokości 3 cm w wielu punktach pomiarowych jeszcze nie były obserwowane podwyższone wartości podatności magnetycznej, spowodowane zanieczyszczeniem antropogenicznym. Dodatkowo, na powierzchni pomiarowej *Szczejkowice* miąższość podpoziomu organicznego ściółki, zbudowanego głównie z substancji o charakterze diamagnetycznym, dochodziła nawet do 8 cm.

**Tabela 6.1. Współczynniki korelacji Pearsona pomiędzy podatnością magnetyczną mierzona na powierzchni gleby a miarami wyznaczonymi na podstawie pomiarów podatności magnetycznej w profilu glebowym. Zaznaczone współczynniki są statystycznie istotne dla  $\alpha = 0,05$**

**Table 6.1. Pearson correlation coefficients between magnetic susceptibility measured on the soil surface and measures calculated using measurements of magnetic susceptibility in soil profile. Marked coefficients are statistically significant for  $\alpha = 0,05$**

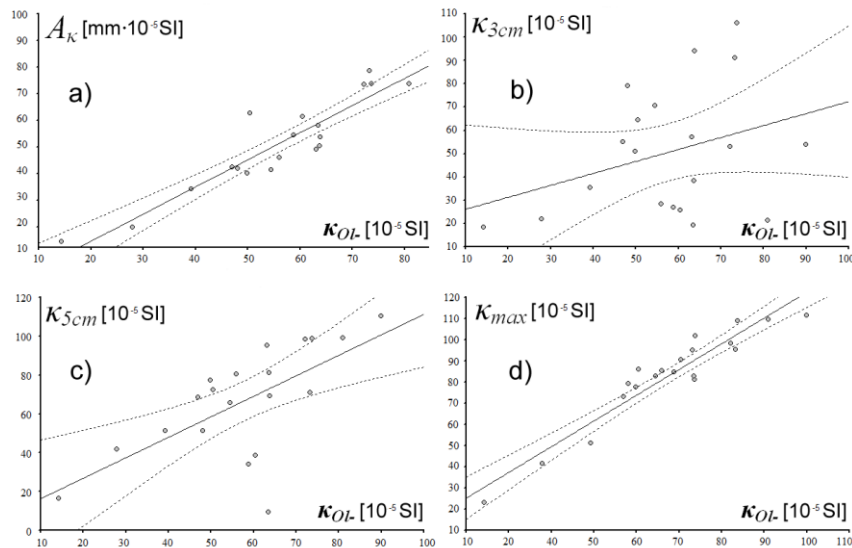
	Podatność magnetyczna na powierzchni gleby
Pole powierzchni $A_{\kappa 10}$	<b>0,89</b>
Pole powierzchni $A_{\kappa}$	<b>0,94</b>
Podatność magnetyczna na głębokości 3 cm $\kappa_{3cm}$	0,33
Podatność magnetyczna na głębokości 5 cm $\kappa_{5cm}$	<b>0,66</b>
Maksymalna podatność magnetyczna w profilu glebowym $\kappa_{max}$	<b>0,95</b>

Głębokość penetracji miernika MS2D może sięgać do 10 cm w profilu glebowym, niemniej jednak pole powierzchni  $A_{\kappa 10}$ , liczone do głębokości 10 cm, wykazało mniejszą korelację z podatnością magnetyczną, mierzona na powierzchni gleby, w porównaniu z polem  $A_{\kappa}$ , liczonym do miejsca ustabilizowania się podatności magnetycznej. Było to spowodowane, że głębokość, na której ustalała się krzywa podatności magnetycznej, wahała się w zakresie od kilku do kilkunastu centymetrów. Wyniki takie świadczą o tym, że bardziej celowe jest integrowanie pomiarów powierzchniowych z  $A_{\kappa}$ , liczonym do miejsca ustabilizowania się krzywej, a nie do głębokości 10 cm, jak mógłby sugerować zasięg penetracji miernika MS2D.



Rysunek 6.1. Krzywe regresji pomiędzy podatnością magnetyczną  $\kappa_{OL}$  mierzoną na powierzchni gleby i polem powierzchni  $A_{\kappa}$  liczonym do głębokości ustabilizowania się krzywej podatności magnetycznej w profilu glebowym oraz polem powierzchni  $A_{\kappa10}$  liczonym do głębokości 10 cm

Figure 6.1. Regression lines between magnetic susceptibility  $\kappa_{OL}$  measured on the soil surface and area  $A_{\kappa}$  calculated to the depth where the curve of magnetic susceptibility stabilizes in soil profile and area  $A_{\kappa10}$  calculated to the depth of 10 cm



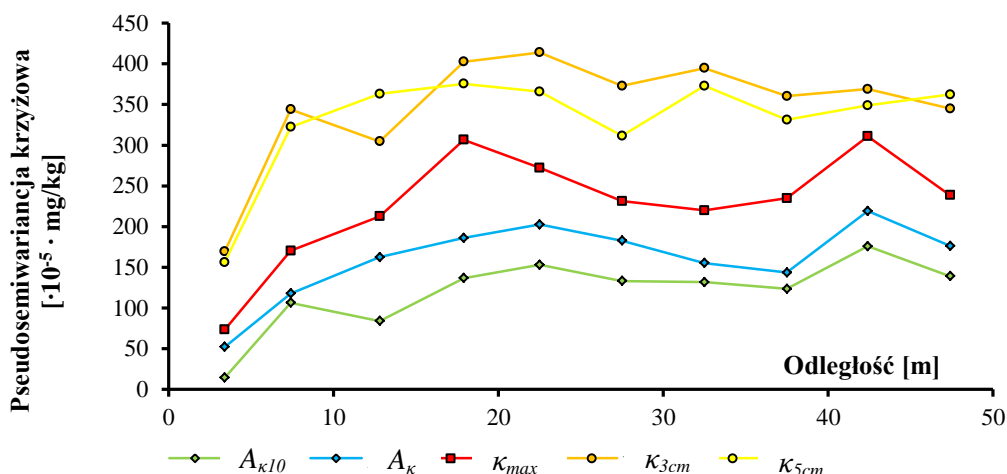
Rysunek 6.2. Krzywe regresji pomiędzy podatnością magnetyczną  $\kappa_{OL}$  mierzoną na powierzchni i: a) polem powierzchni  $A_{\kappa}$  liczonym do głębokości ustabilizowania się krzywej, b) podatnością magnetyczną na głębokości 3 cm  $\kappa_{3cm}$ , c) podatnością magnetyczną na głębokości 5 cm  $\kappa_{5cm}$ , d) maksymalną podatnością magnetyczną w profilu glebowym  $\kappa_{max}$

Figure 6.2. Regression lines between magnetic susceptibility  $\kappa_{OL}$  measured on the soil surface and: a) area  $A_{\kappa}$  calculated to the depth where curve stabilizes, b) magnetic susceptibility at the depth of 3 cm  $\kappa_{3cm}$ , c) magnetic susceptibility at the depth of 5 cm  $\kappa_{5cm}$ , d) maximum magnetic susceptibility in soil profile  $\kappa_{max}$

## 6.2 Krzyżowe korelacje przestrzenne pomiędzy miarami magnetometrycznymi a podatnością magnetyczną mierzoną miernikiem MS2D

W przypadku zastosowania geostatystycznych metod integracji danych, takich jak kokriging, jest szczególnie istotne, aby integrowane pomiary charakteryzowały się łatwymi do zbadania i wymodelowania krzyżowymi korelacjami przestrzennymi. W związku z tym,

dodatkowo zostały zbadane krzyżowe korelacje przestrzenne, pomiędzy podatnością magnetyczną mierzoną na powierzchni gleby i miarami magnetometrycznymi  $A_{\kappa 10}$ ,  $A_{\kappa}$ ,  $\kappa_{max}$ ,  $\kappa_{3cm}$ ,  $\kappa_{5cm}$ , wyznaczonymi na podstawie pomiarów wykonywanych w profilu glebowym. Badania wykonano na podstawie pomiarów przeprowadzonych na powierzchni pomiarowej *Szczyrkowice*. Ze względu na ograniczoną liczbę pomiarów wykonywanych w profilu glebowym, zostały wyznaczone pseudowariogramy krzyżowe.



**Rysunek 6.3. Eksperymentalne pseudowariogramy krzyżowe pomiędzy podatnością magnetyczną mierzoną na powierzchni gleby i: polem powierzchni  $A_{\kappa 10}$  i  $A_{\kappa}$  liczonym odpowiednio do głębokości 10 cm i głębokości ustabilizowania się krzywej podatności magnetycznej w profilu glebowym, podatnością magnetyczną  $\kappa_{3cm}$  i  $\kappa_{5cm}$  na głębokości odpowiednio 3 cm i 5 cm oraz maksymalną podatnością magnetyczną  $\kappa_{max}$  w profilu glebowym**

**Figure 6.3. Experimental pseudo cross-variograms between magnetic susceptibility measured on the soil surface and: area  $A_{\kappa 10}$  and  $A_{\kappa}$  calculated to the depth of 10 cm and where the curve stabilizes, respectively, magnetic susceptibility  $\kappa_{3cm}$  and  $\kappa_{5cm}$  at depth of 3 cm and 5 cm, respectively and maximum magnetic susceptibility  $\kappa_{max}$  in soil profile**

Na wykonanych pseudowariogramach krzyżowych dla każdej z miar  $A_{\kappa 10}$ ,  $A_{\kappa}$ ,  $\kappa_{max}$ ,  $\kappa_{3cm}$ ,  $\kappa_{5cm}$ , obserwowano podobny, wynoszący około 20 m, zasięg korelacji. Jednakże, zauważono znaczne różnice w przypadku wartości progu. Najkorzystniejsze jest wykorzystanie tych miar, dla których wariogramy krzyżowe charakteryzowały się najniższymi wartościami progu. Jak wynika bowiem z literatury (*Isaak i Srivastava, 1998*), wraz ze wzrostem wartości progu rośnie także wariancja kokrigingu.

Najwyższe wartości progu były obserwowane w przypadku pseudowariogramów krzyżowych pomiędzy podatnością magnetyczną mierzoną na powierzchni gleby a podatnością magnetyczną na głębokości 3 cm i 5 cm. Duże wartości semiwariancji spowodowane były bardzo dużą zmiennością wartości  $\kappa_{3cm}$  i  $\kappa_{5cm}$ . Było to związane z tym, że na głębokości od 3 cm do 5 cm na badanym obszarze *Szczyrkowice* występował tylko podpoziom organiczny ściółki, a podpoziomy, w których były zakumulowane metale ciężkie, leżały na większych głębokościach.

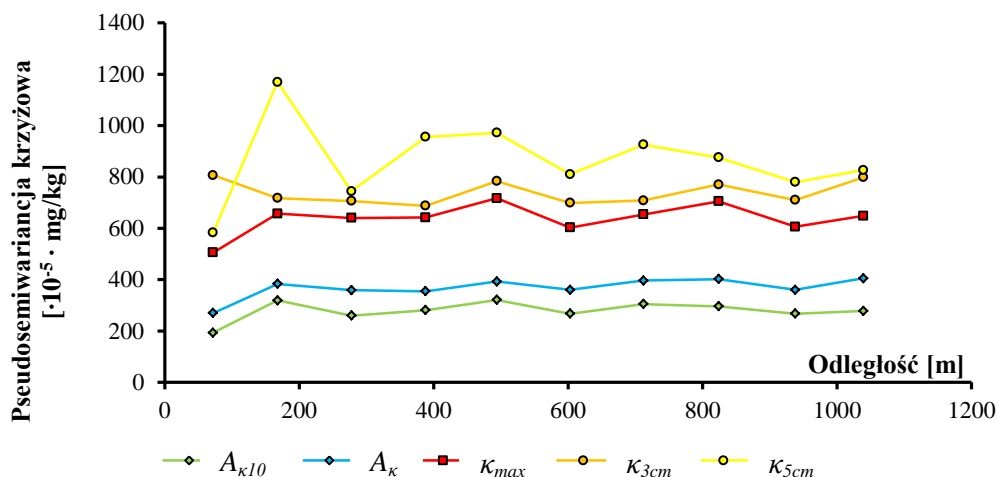
W przypadku pseudowariogramu krzyżowego pomiędzy wartością podatności magnetycznej mierzonej na powierzchni gleby a podatnością maksymalną  $\kappa_{max}$  w profilu glebowym, były obserwowane niższe wartości progów w porównaniu z pseudowariogramami dla miar  $\kappa_{3cm}$  i  $\kappa_{5cm}$ .

Pseudowariogramy krzyżowe dla pól powierzchni  $A_{\kappa 10}$  oraz  $A_{\kappa}$  pod krzywą podatności w profilu glebowym miały bardzo podobny przebieg, wartości efektu samorodka i progów. W przypadku pola powierzchni  $A_{\kappa 10}$ , liczonego do głębokości 10 cm, były obserwowane nieco niższe wartości pseudosemiwariancji krzyżowej w porównaniu z pseudowariogramem dla pola powierzchni  $A_{\kappa}$ . Obserwacje takie wynikały z tego, że pole  $A_{\kappa}$  liczone do głębokości przekraczającej 10 cm, przez co był obejmowany większy zakres poziomów glebowych, w których były zakumulowane metale ciężkie.

### **6.3 Krzyżowe korelacje przestrzenne pomiędzy miarami magnetometrycznymi a zawartością metali ciężkich w glebie**

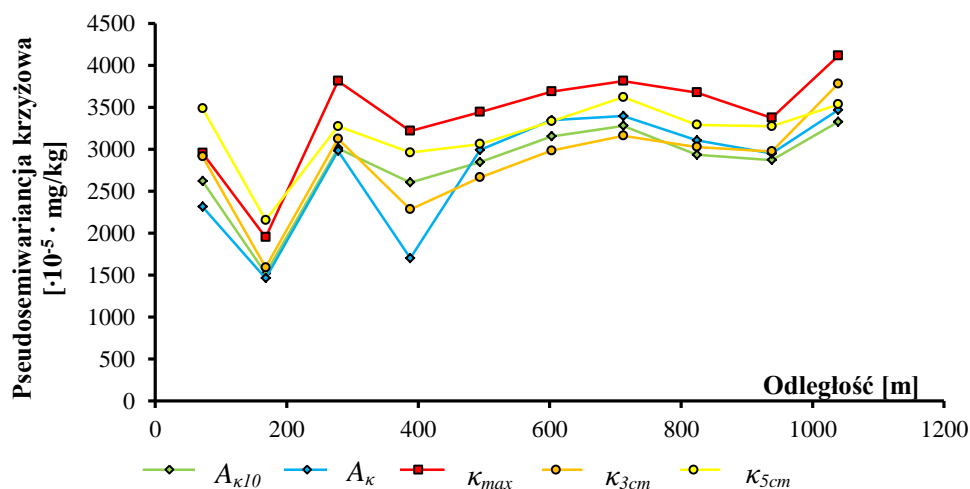
Dodatkowo, zostały zbadane korelacje krzyżowe pomiędzy wyznaczonymi miarami  $A_{\kappa 10}$ ,  $A_{\kappa}$ ,  $\kappa_{max}$ ,  $\kappa_{3cm}$ ,  $\kappa_{5cm}$  a zawartością poszczególnych metali ciężkich w glebie. Badania te wykonano na podstawie pomiarów na powierzchni pomiarowej *Lasy Błędowskie*. Wyznaczono pseudowariogramy krzyżowe dla takich metali ciężkich jak Cu, Pb i Zn.

Na pseudowariogramach krzyżowych pomiędzy wyznaczonymi miarami  $A_{\kappa 10}$ ,  $A_{\kappa}$ ,  $\kappa_{max}$ ,  $\kappa_{3cm}$ ,  $\kappa_{5cm}$  i zawartością Cu w glebie (rys 6.4.) obserwowano słabe korelacje przestrzenne, które mogły być spowodowane niską mierzoną zawartością Cu (w zakresie od 1 mg/kg do 15 mg/kg) związaną bardziej z naturalną zawartością tego metalu w glebie niż z zanieczyszczeniem antropogenicznym. Sporządzone pseudowariogramy różniły się wyraźnie wartościami progów. W przypadku pseudowariogramów dla  $\kappa_{max}$ ,  $\kappa_{3cm}$ ,  $\kappa_{5cm}$  wartości progów były niemal dwukrotnie wyższe niż dla tych sporządzonych dla  $A_{\kappa 10}$  i  $A_{\kappa}$ .



Rysunek 6.4. Eksperymentalne pseudowariogramy krzyżowe pomiędzy zawartością Cu w glebie i: polem powierzchni  $A_{\kappa 10}$  i  $A_{\kappa}$  liczonym odpowiednio do głębokości 10 cm i głębokości ustabilizowania się krzywej podatności magnetycznej w profilu glebowym, podatnością magnetyczną  $\kappa_{3cm}$  i  $\kappa_{5cm}$  na głębokości odpowiednio 3 cm i 5 cm oraz maksymalną podatnością magnetyczną  $\kappa_{max}$  w profilu glebowym

Figure 6.4. Experimental pseudo cross-variograms between Cu concentration in soil and: area  $A_{\kappa 10}$  and  $A_{\kappa}$  calculated to the depth of 10 cm and where the curve stabilizes, respectively, magnetic susceptibility  $\kappa_{3cm}$  and  $\kappa_{5cm}$  at depth of 3 cm and 5 cm, respectively and maximum magnetic susceptibility  $\kappa_{max}$  in soil profile

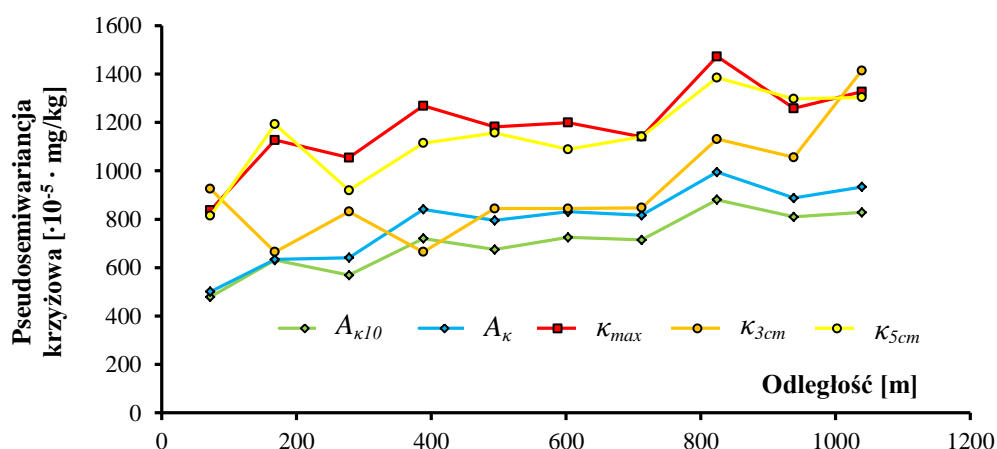


Rysunek 6.5. Eksperymentalne pseudowariogramy krzyżowe pomiędzy zawartością Zn w glebie i: polem powierzchni  $A_{\kappa 10}$  i  $A_{\kappa}$  liczonym odpowiednio do głębokości 10 cm i głębokości ustabilizowania się krzywej podatności magnetycznej w profilu glebowym, podatnością magnetyczną  $\kappa_{3cm}$  i  $\kappa_{5cm}$  na głębokości odpowiednio 3 cm i 5 cm oraz maksymalną podatnością magnetyczną  $\kappa_{max}$  w profilu glebowym

Figure 6.5. Experimental pseudo cross-variograms between Zn concentration in soil and: area  $A_{\kappa 10}$  and  $A_{\kappa}$  calculated to the depth of 10 cm and where the curve stabilizes, respectively, magnetic susceptibility  $\kappa_{3cm}$  and  $\kappa_{5cm}$  at depth of 3 cm and 5 cm, respectively and maximum magnetic susceptibility  $\kappa_{max}$  in soil profile

W przypadku zawartości Zn w glebie wykonane pseudowariogramy krzyżowe dla miar  $A_{\kappa 10}$ ,  $A_{\kappa}$ ,  $\kappa_{max}$ ,  $\kappa_{3cm}$ ,  $\kappa_{5cm}$  miały bardzo podobny przebieg (rys. 6.5.). Podobne były zarówno wartości progów, jak i zasięgów korelacji. Zasięgi korelacji były bardziej wyraźne

niż w przypadku zawartości Cu w glebie i wynosiły około 800 m. Na badanej powierzchni obserwowano podwyższoną zawartość Zn w glebie, które wynosiły do 352 mg/kg i mogły być spowodowane zanieczyszczeniem antropogenicznym.



**Rysunek 6.6.** Eksperymentalne pseudowariogramy krzyżowe pomiędzy zawartością Pb w glebie i polem powierzchni  $A_{\kappa 10}$  i  $A_{\kappa}$  liczonym odpowiednio do głębokości 10 cm i głębokości ustabilizowania się krzywej podatności magnetycznej w profilu glebowym, podatnością magnetyczną  $\kappa_{3cm}$  i  $\kappa_{5cm}$  na głębokości odpowiednio 3 cm i 5 cm oraz maksymalną podatnością magnetyczną  $\kappa_{max}$  w profilu glebowym

**Figure 6.6.** Experimental pseudo cross-variograms between Cu concentration in soil and: area  $A_{\kappa 10}$  and  $A_{\kappa}$  calculated to the depth of 10 cm and where the curve stabilizes, respectively, magnetic susceptibility  $\kappa_{3cm}$  and  $\kappa_{5cm}$  at depth of 3 cm and 5 cm, respectively and maximum magnetic susceptibility  $\kappa_{max}$  in soil profile

Na badanym obszarze zawartość Pb w glebie znacznie przekraczała dopuszczalną zawartość 100 mg/kg, co świadczyło o wyraźnym zanieczyszczeniu antropogenicznym. W przypadku zawartości Pb w glebie dla każdej z miar  $A_{\kappa 10}$ ,  $A_{\kappa}$ ,  $\kappa_{max}$ ,  $\kappa_{3cm}$ ,  $\kappa_{5cm}$  był obserwowany podobny zasięg korelacji, wynoszący około 800 m (rys. 6.6.). Ponownie w przypadku wariogramów dla  $A_{\kappa 10}$  i  $A_{\kappa}$  obserwowane wyraźnie niższe wartości progów w porównaniu z pozostałymi pseudowariogramami.

## 6.4 Podsumowanie

Podatność magnetyczna mierzona na powierzchni gleby wykazywała wyraźną korelację z miarami wyznaczonymi na podstawie rozkładów podatności w profilu glebowym, takimi jak powierzchnie pod krzywą podatności magnetycznej  $A_{\kappa 10}$  i  $A_{\kappa}$  czy maksymalna wartość podatności magnetycznej w profilu glebowym  $\kappa_{max}$ . Podatność magnetyczna  $\kappa_{3cm}$  i  $\kappa_{5cm}$ , mierzona odpowiednio na głębokościach 3 cm i 5 cm, była zdecydowanie słabiej skorelowana z podatnością magnetyczną mierzoną na powierzchni gleby. Miało to bezpośredni związek z budową profilu glebowego i miąższością poszczególnych poziomów glebowych. Podwyższone wartości podatności magnetycznej, wynikające z zanieczyszczenia

antropogenicznego były często obserwowane na większych głębokościach. Było to warunkowane dużą miąższością podziomu organicznego ściółki.

Badania zmienności przestrzennej pokazały, że powierzchnie pod krzywą podatności magnetycznej  $A_{\kappa 10}$  i  $A_{\kappa}$  w profilu glebowym charakteryzują łatwe do określenia korelacje przestrzenne, zarówno z podatnością magnetyczną mierzoną na powierzchni gleby, jak i z zawartością metali ciężkich w glebie. Pseudowariogramy krzyżowe dla miar  $\kappa_{max}$ ,  $\kappa_{3cm}$  i  $\kappa_{5cm}$  charakteryzowały się wysokimi wartościami efektu samorodka i mniej wyraźną ciągłością przestrzenną, co może być niekorzystne podczas integracji danych metodami kokrigingu.

W integracji pomiarów podatności magnetycznej, wykonywanych na powierzchni gleby i w profilu glebowym, najbardziej celowe wydaje się używanie pola powierzchni pod krzywą podatności magnetycznej. Pole takie może być liczone do głębokości 10 cm, co pokrywa się z zasięgiem penetracji miernika MS2D. Niemniej, jak pokazały badania, korzystniejsze może być wykorzystywanie pola powierzchni pod krzywą liczonego do głębokości, na której wartości podatności magnetycznej ustalają się. W takim przypadku bowiem są uwzględniane wszystkie poziomy glebowe, w których zostały zakumulowane zanieczyszczenia antropogeniczne, w tym metale ciężkie. Postępowanie takie może być szczególnie korzystne podczas integracji danych magnetometrycznych i chemicznych.



## **7 Integracja danych magnetometrycznych w przestrzeni dwuwymiarowej**

W magnetometrii terenowej są najczęściej wykonywane dwa rodzaje pomiarów podatności magnetycznej. Pierwszy z nich to pomiary na powierzchni gleby, czego przykładem są, wykorzystywane w tej pracy, pomiary podatności magnetycznej miernikiem MS2D Bartington. Drugi rodzaj pomiarów jest wykonywany w profilu glebowym. W przypadku niniejszej pracy, podatność magnetyczna w profilu glebowym była mierzona miernikiem SM-400.

W dotychczasowych badaniach najczęściej analizowano oddzielnie wartości podatności magnetycznej mierzone na powierzchni gleby oraz wartości mierzone w profilu glebowym. Niemniej jednak, oba rodzaje pomiarów charakteryzują się wzajemnymi krzyżowymi korelacjami przestrzennymi. Oznacza to, że wartości podatności magnetycznej mierzonej na oba sposoby wzajemnie się uzupełniają i jest możliwe, a nawet wskazane, zintegrowanie takich danych pomiarowych. Integracja danych umożliwi bowiem pełniejsze wykorzystanie informacji pomiarowej oraz bardziej precyzyjne zbadanie analizowanego zjawiska.

### **7.1 Wykorzystane pomiary magnetometryczne**

W niniejszym rozdziale zaprezentowano możliwości geostatystycznej integracji pomiarów podatności magnetycznej, ograniczając się tylko do rozkładów przestrzennych dwuwymiarowych. Integracja danych została zilustrowana na przykładzie wybranych powierzchni pomiarowych i przy wykorzystaniu pomiarów podatności magnetycznej, wykonywanych na powierzchni gleby oraz w profilu glebowym. Pomiary wykonywane na powierzchni gleby nie wymagały żadnych przekształceń. W przypadku pomiarów w profilu glebowym, było konieczne wybranie pewnych miar szacowanych na podstawie rozkładów podatności magnetycznej względem głębokości. Wykorzystano takie miary, jak  $A_k$ ,  $\kappa_{max}$ ,  $\kappa_{3cm}$  i  $\kappa_{5cm}$ , które zostały opisane w poprzedniej części pracy, poświęconej wstępnej integracji danych.

### **7.2 Integracja podatności magnetycznej na różnych głębokościach w profilu glebowym**

W niniejszym rozdziale przedstawiono przykładową integrację danych, mając na celu wykonanie serii rozkładów przestrzennych podatności magnetycznej na różnych głębokościach w profilu glebowym. Wykonano rozkłady przestrzenne na głębokościach od 0 cm (powierzchnia gleby) do głębokości 7 cm.

Rozkłady przestrzenne podatności na poszczególnych głębokościach w profilu glebowym zostały wykonane metodą kokrigingu wskaźnikowego, opisaną w rozdziale poświęconym metodom badawczym. Wartości podatności mierzone miernikiem SM-400 zostały wykorzystane jako zmienna główna, natomiast wartości podatności mierzone miernikiem MS2D na powierzchni gleby jako zmienna dodatkowa. Wybór taki był uwarunkowany tym, że pomiary wykonywane miernikiem SM-400 są mniej wrażliwe na bardzo silnie zmienną miąższość poszczególnych podpoziomów glebowych. Dodatkowo, miernik MS2D, ze względu na ograniczony zasięg penetracji, w pewnych punktach pomiarowych nie będzie w stanie pomierzyć podatności magnetycznej ze wszystkich podpoziomów glebowych, w których zostały zakumulowane metale ciężkie.

Na badanym obszarze zostało wykonanych 30 pomiarów miernikiem SM-400, a dla każdego z pomiarów otrzymano rozkład podatności magnetycznej, w zależności od głębokości w profilu glebowym. Każdy z takich rozkładów został wykorzystany do oszacowania wartości podatności magnetycznej na głębokości od 0 cm do 7 cm, z krokiem wynoszącym 1 cm. W rezultacie, otrzymano 8 zbiorów, każdy o liczności 30 wartości podatności magnetycznej. Dane te zostały wykorzystane jako zmienna główna w metodzie kokrigingu wskaźnikowego. Zostały uzupełnione 370 pomiarami podatności magnetycznej, które wykonano na powierzchni gleby miernikiem MS2D.

**Tabela 7.1. Statystyki opisowe oraz współczynniki korelacji Pearsona dla podatności magnetycznej mierzonej miernikiem MS2D oraz na głębokościach od 0 cm do 7 cm miernikiem SM-400**

**Table 7.1. Descriptive statistics and Pearson correlation coefficients for magnetic susceptibility measured with MS2D device and at depths from 0 cm to 7 cm with SM-400 device**

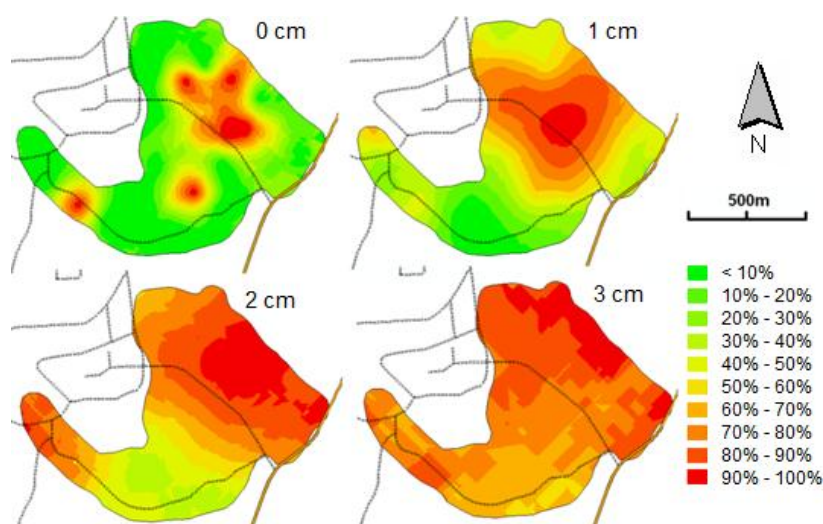
	Średnia	Mediana	Minimum	Maksimum	Odchylenie standardowe	Współczynnik:	
						skośności	korelacji Pearsona
			[·10 <sup>-5</sup> SI]			[-]	[-]
<b>MS2D</b>	31,0	30,7	0,0	79,1	11,6	0,4	-
<b>Miernik SM-400, pomiar na głębokości:</b>							
<b>0 cm</b>	29,5	23,4	4,7	105,1	24,6	1,5	0,08
<b>1 cm</b>	52,2	42,4	7,1	173,8	42,3	1,2	0,10
<b>2 cm</b>	75,3	62,7	10,0	199,7	51,5	0,7	0,18
<b>3 cm</b>	95,1	87,8	13,4	262,2	56,1	0,9	0,36
<b>4 cm</b>	100,0	97,6	19,8	164,6	39,6	-0,1	<b>0,62</b>
<b>5 cm</b>	100,9	99,4	29,2	184,1	38,8	0,3	<b>0,67</b>
<b>6 cm</b>	95,1	91,8	34,3	189,4	42,2	0,5	<b>0,57</b>
<b>7 cm</b>	84,2	79,5	22,4	173,7	41,3	0,4	<b>0,42</b>

Dla początkowej części profilu glebowego, do głębokości około 3 cm, zauważono słabe korelacje pomiędzy podatnością magnetyczną mierzoną miernikiem MS2D a podatnością mierzoną miernikiem SM-400 (tab. 7.1.). Słabe korelacje wynikały z tego, że ta część profilu

glebowego była zajmowana głównie przez podzium organiczny ściółki, który charakteryzuje się właściwościami diamagnetycznymi. Z powodu słabych i nieistotnych statystycznie korelacji dla początkowej części profilu glebowego, nie było możliwe wykonanie integracji danych metodą kokrigingu. Rozkłady przestrzenne dla głębokości od 0 cm do 3 cm wykonano więc metodą krigingu wskaźnikowego.

Dla większych głębokości, od 4 cm do 7 cm, obserwowane były silne i statystycznie istotne korelacje pomiędzy wartościami podatności magnetycznej mierzonej miernikami MS2D i SM-400. Z tego powodu było możliwe wykonanie integracji metodą kokrigingu wskaźnikowego. Wzrost sił korelacji był spowodowany tym, że na głębokościach od 4 cm do 7 cm w profilu glebowym występowały podziumy organiczny fermentacyjny i organiczny humusowy, w których w największym stopniu są akumulowane metale ciężkie.

Rozkłady przestrzenne podatności magnetycznej (rys. 7.1. i 7.2.) na głębokości od 0 cm do 3 cm zostały wykonane metodą krigingu wskaźnikowego, natomiast rozkłady przestrzenne dla pozostałych głębokości metodą kokrigingu wskaźnikowego. Jako wartość progowa podatności magnetycznej, w kokrigingu i krigingu wskaźnikowym, została użyta wartość wynosząca  $50 \cdot 10^{-5}$  SI. Jak pokazują dotychczasowe wyniki badań (Magiera, 2004), wartość tę można przyjąć jako odpowiadającą potencjalnemu zanieczyszczeniu gleb metalami ciężkimi. Wszystkie wykonane rozkłady prezentowały prawdopodobieństwo przekroczenia wartości  $50 \cdot 10^{-5}$  SI, a więc prawdopodobieństwo potencjalnego zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi.

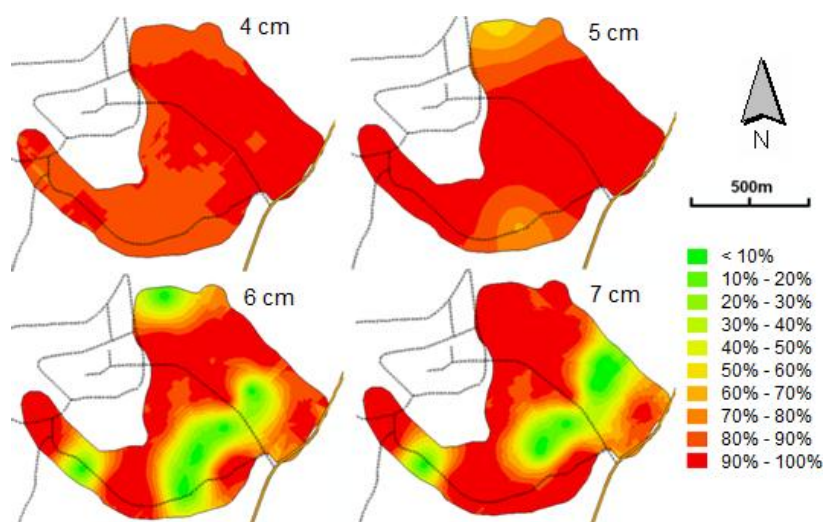


**Rysunek 7.1. Rozkłady przestrzenne prawdopodobieństwa przekroczenia wartości  $50 \cdot 10^{-5}$  SI na głębokościach 0 cm, 1 cm, 2 cm i 3 cm w profilu glebowym**

**Figure 7.1. Spatial distributions of probability of exceeding value of  $50 \cdot 10^{-5}$  SI at depths of 0 cm, 1 cm, 2 cm and 3 cm in soil profile**

Umożliwiło to porównanie jakości rozkładów wykonanych tylko na podstawie pomiarów jednego rodzaju z rozkładami wykonanymi dla zintegrowanego zbioru danych. Średnie błędy estymacji (tab. 7.2.) dla rozkładów przestrzennych wykonanych metodą krigingu wynosiły od 43% do 47%. Były wyższe w stosunku do błędów estymacji dla rozkładów wykonanych metodą kokrigingu, gdzie błędy te wynosiły od 24% do 42%.

Szczególny spadek wielkości średniego błędu estymacji był widoczny, w przypadku rozkładów przestrzennych podatności magnetycznej na głębokościach 4 cm i 5 cm. Potwierdza to, że integracja danych metodą kokrigingu pozwala na polepszenie jakości szacowanych rozkładów przestrzennych. Dla tych głębokości obserwowano najsilniejsze korelacje pomiędzy wartościami podatności magnetycznej, które były mierzone miernikiem MS2D i miernikiem SM-400. Dodatkowo jest istotne, że polepszenie jakości rozkładów obserwowano dla tych głębokości w profilu glebowym, na których w największym stopniu są akumulowane metale ciężkie, a więc są to głębokości najbardziej istotne ze względu na badania potencjalnego zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi.



**Rysunek 7.2. Rozkłady przestrzenne prawdopodobieństwa przekroczenia wartości  $50 \cdot 10^{-5}$  SI na głębokościach 4 cm, 5 cm, 6 cm i 7 cm w profilu glebowym**

**Figure 7.2. Spatial distributions of probability of exceeding value of  $50 \cdot 10^{-5}$  SI at depths of 4 cm, 5 cm, 6 cm and 7 cm in soil profile**

**Tabela 7.2. Średni błąd estymacji dla rozkładów przestrzennych prawdopodobieństwa przekroczenia wartości  $50 \cdot 10^{-5}$  SI na poszczególnych głębokościach w profilu glebowym**

**Table 7.2. Mean prediction error for spatial distributions of probability of exceeding  $50 \cdot 10^{-5}$  SI at particular depths in soil profile**

	0 cm	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm	6 cm	7 cm
<b>Średni błąd estymacji [%]</b>	43	45	47	46	33	24	42	38

### 7.3 Integracja pomiarów wykonywanych miernikami MS2D Bartington i SM-400

W poprzednim rozdziale zostały wykonane rozkłady przestrzenne podatności na poszczególnych głębokościach w profilu glebowym. W niniejszym rozdziale została zaprezentowana integracja danych z pomiarów miernikami MS2D i SM-400, która umożliwia wykonanie rozkładu przestrzennego jednej z miar,  $A_k$ ,  $\kappa_{max}$ ,  $\kappa_{3cm}$  lub  $\kappa_{5cm}$ .

Na powierzchni pomiarowej *Repty Śląskie* wykonano 31 pomiarów w profilu glebowym, miernikiem SM-400. Pomiarów te zostały później wykorzystane do wyznaczenia maksymalnej podatności magnetycznej  $\kappa_{max}$  w profilu glebowym. Jako pomiary uzupełniające zostały użyte pomiary podatności magnetycznej, wykonywane na powierzchni gleby miernikiem MS2D. Na podstawie zebranych danych pomiarowych zostały wyznaczone mapy rozkładów przestrzennych maksymalnej podatności magnetycznej  $\kappa_{max}$  w profilu glebowym.

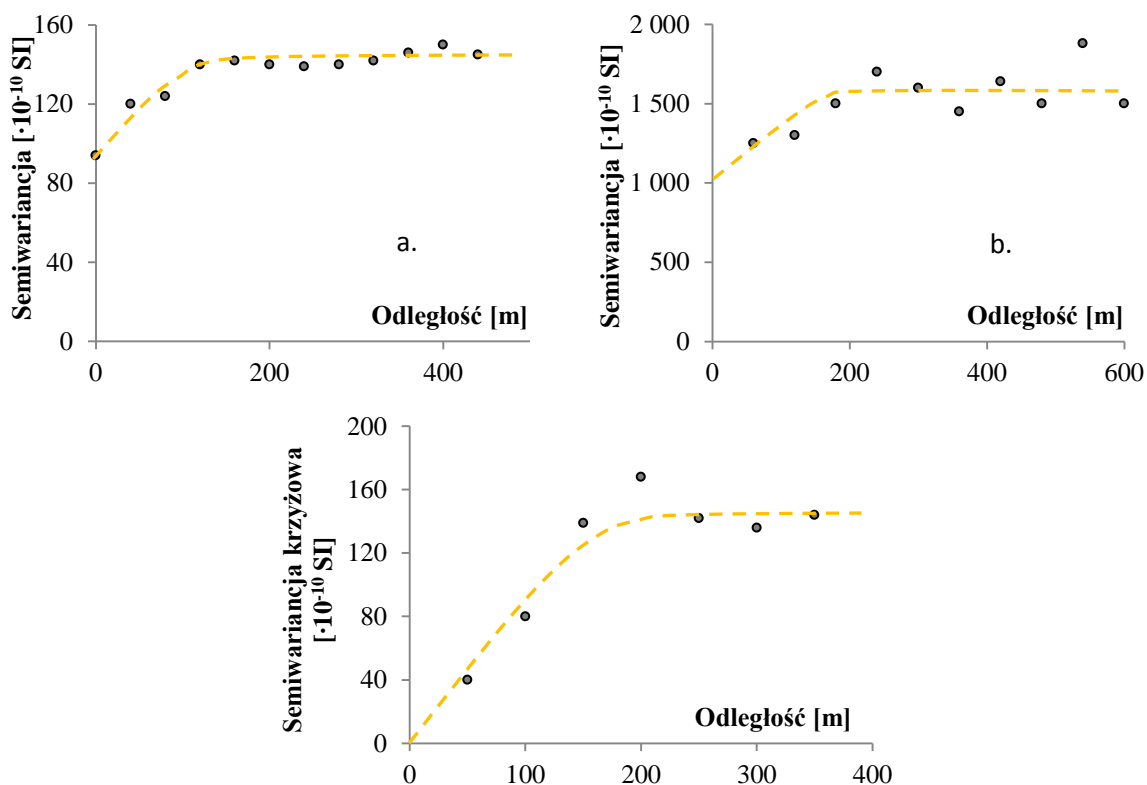
Rozkłady zostały wykonane dwiema metodami, w celu sprawdzenia korzyści integracji danych magnetometrycznych. Pierwszą z nich była metoda kriginu zwykłego, wykorzystująca tylko informację z pomiarów pionowych podatności magnetycznej, drugą natomiast metoda kokriginu. W metodzie kokriginu wykorzystano wyniki pomiarów pionowych, które uzupełnione zostały skorelowanymi z nimi pomiarami powierzchniowymi podatności magnetycznej.

**Tabela 7.3. Statystyki opisowe podatności magnetycznej mierzonej na powierzchni gleby miernikiem MS2D oraz maksymalnej podatności magnetycznej w profilu glebowym**

**Table 7.3. Descriptive statistics of magnetic susceptibility measured on the soil surface with MS2D device and maximum magnetic susceptibility in soil profile**

	Podatność magnetyczna na powierzchni gleby	Maksymalna podatność magnetyczna w profilu glebowym
Średnia	31,1	109,5
Mediana	30,7	105,9
Minimum	0	48,4
Maksimum	[ $\cdot 10^{-5}$ SI] 79,1	198,1
Kwartył dolny	23,0	72,5
Kwartył górny	38,0	144,5
Odchylenie standardowe	11,6	42,8
Współczynnik skośności	[-] 0,4	0,2

Maksymalna podatność magnetyczna w profilu glebowym była wyraźnie skorelowana z podatnością mierzoną na powierzchni gleby. Współczynnik korelacji Pearsona dla tych wartości wynosił 0,64 i był statystycznie istotny dla  $\alpha = 0,05$ . Wysoka wartość współczynnika korelacji wynikała z tego, że na badanym obszarze wartości maksymalne  $\kappa_{max}$  w profilu glebowym występowały na głębokościach wynoszących od 4 cm do 6 cm. Z tego względu miernik MS2D był w stanie objąć swoim zasięgiem penetracji tę część profilu glebowego.

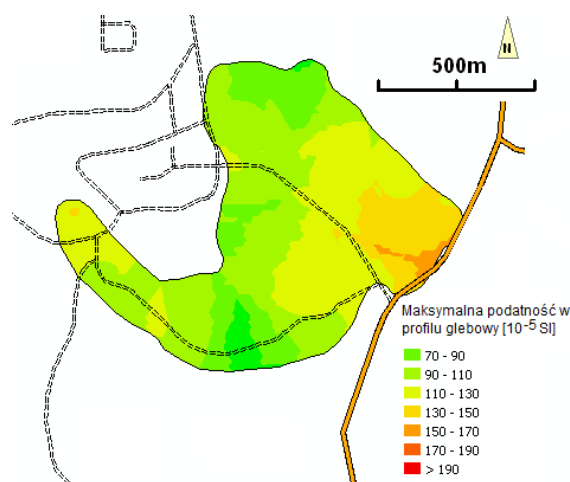


**Rysunek 7.3. Variogramy i modele: a) maksymalnej wartości podatności w profilu glebowym, b) podatności magnetycznej gleby mierzonej na powierzchni gleby, c) wariogram krzyżowy**

**Figure 7.3. Variograms and models: a) maximum magnetic susceptibility in soil profile, b) magnetic susceptibility measured on the soil surface, c) cross-variogram**

Wyniki analizy wariogramów pokazały, że zarówno maksymalną podatność magnetyczną w profilu glebowym, jak i podatność mierzoną na powierzchni gleby charakteryzowała wyraźna zmienność przestrzenna. Każda z mierzonych wielkości cechowała się zasięgiem korelacji wynoszącym 200 m. Zmienność przestrzenna została, w każdym przypadku, wymodelowana przy wykorzystaniu modelu sferycznego. Wariogram wartości podatności magnetycznej mierzonej na powierzchni gleby charakteryzował się dużo większą wartością nasycenia, niż wariogram maksymalnej podatności w profilu glebowym (rys. 7.3.). Obserwacje takie wynikały z tego, że wartości mierzone miernikiem MS2D są bardziej czułe na wpływ czynników pomiarowych, opisanych w części pracy poświęconej wstępowi do integracji danych, w porównaniu z wartościami mierzonymi miernikiem SM-400.

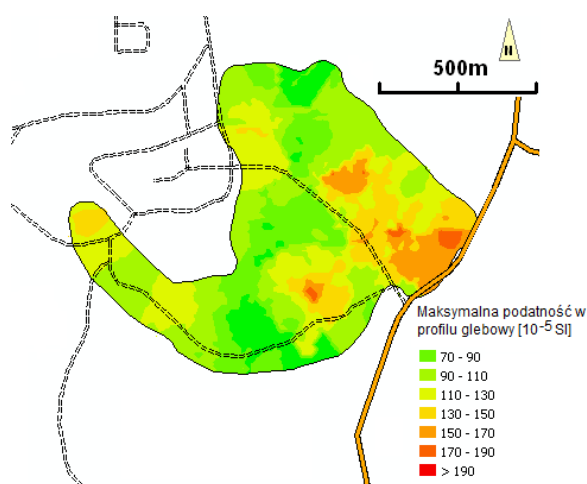
Rozkłady przestrzenne sporządzono na podstawie 25 spośród 31 punktów, w których wykonywany był pomiar w profilu glebowym. Pozostałe 6 punktów pomiarowych zostało wykorzystanych jako punkty kontrolne, do oceny jakości szacowanych rozkładów maksymalnej podatności magnetycznej w profilu glebowym. Pierwszy rozkład przestrzenny został wykonany metodą krigingu (rys. 7.4.).



**Rysunek 7.4. Rozkład przestrzenny maksymalnej podatności magnetycznej w profilu glebowym na powierzchni *Repty Śląskie*, wykonany metodą krigingu**

**Figure 7.4. Spatial distribution of maximum magnetic susceptibility in soil profile at area *Repty Śląskie*, calculated using kriging**

Następnie wykonano rozkład przestrzenny maksymalnej podatności w profilu glebowym metodą kokrigingu (rys. 7.5.). W tym przypadku zbiór 25 pomiarów miernikiem SM-400 został uzupełniony 370 pomiarami, które wykonano miernikiem MS2D.



**Rysunek 7.5. Rozkład przestrzenny maksymalnej podatności magnetycznej w profilu glebowym na powierzchni *Repty Śląskie*, wykonany metodą kokrigingu**

**Figure 7.5. Spatial distribution of maximum magnetic susceptibility in soil profile at area *Repty Śląskie*, calculated using cokriging**

Rozkłady przestrzenne maksymalnej podatności magnetycznej w profilu glebowym, wykonane metodą krigingu i kokrigingu, zostały porównane na kilka sposobów. W pierwszym etapie, porównano średni standaryzowany błąd estymacji. W przypadku rozkładu przestrzennego wykonanego metodą kokrigingu średni błąd estymacji był ponad dwukrotnie niższy niż w przypadku rozkładu wykonanego metodą krigingu. Rezultaty takie potwierdzają, że wykorzystanie podatności magnetycznej, mierzonej na powierzchni gleby,

jako zmiennej dodatkowej pozwoliło na znaczne zwiększenie precyzji szacowanych rozkładów przestrzennych.

Do zweryfikowania jakości rozkładów przestrzennych zostało wykorzystanych także 6 punktów kontrolnych. W punktach tych wykonano pomiary podatności magnetycznej oraz wyznaczono maksymalną wartość podatności w profilu glebowym. Następnie, wartości zmierzone zostały porównane z wartościami estymowanymi metodą kriginu i kokriginu. Wartości estymowane metodą kokriginu były zauważalnie silniej skorelowane z wartościami zmierzonymi w terenie w punktach kontrolnych, niż wartości estymowane metodą kriginu (tab. 7.4.). Ponadto, standaryzowany błąd estymacji w metodzie kriginu był ponad dwukrotnie mniejszy niż w metodzie kriginu.

**Tabela 7.4. Wyniki porównania rozkładów przestrzennych maksymalnej podatności magnetycznej w profilu glebowym wykonanych metodą kriginu i kokriginu**

**Table 7.4. Results of the comparison of spatial distribution of maximum magnetic susceptibility in soil profile calculated using kriging and cokriging**

	Standaryzowany średni błąd estymacji [-]	Współczynnik korelacji Pearsona pomiędzy wartościami zmierzonymi i estymowanymi
<b>Kriging</b>	-0,040	0,34
<b>Kokriging</b>	-0,018	0,74

Otrzymane wyniki badań pokazują, że jest możliwe efektywne uzupełnienie pomiarów w profilu glebowym pomiarami powierzchniowymi podatności magnetycznej, przy zastosowaniu metod kokriginu. W rezultacie, jest możliwe poprawienie jakości opisu podpowierzchniowej podatności magnetycznej, co jednocześnie pomaga w ocenie zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi.

#### **7.4 Podsumowanie korzyści integracji danych w przestrzeni dwuwymiarowej**

W magnetometrii terenowej bardzo często są wykonywane dwa rodzaje pomiarów podatności magnetycznej. W związku z tym, jest korzystne dokonanie integracji danych, w celu maksymalnego wykorzystania zebranej informacji pomiarowej. Jak pokazały rezultaty badań, jest możliwe poprawienie precyzji szacowanych rozkładów przestrzennych podatności magnetycznej, na skutek integracji danych pomiarowych.

Możliwość zastosowania metod kokriginu zależy od sił korelacji pomiędzy wartościami podatności magnetycznej mierzonej na powierzchni gleby i na poszczególnych głębokościach w profilu glebowym. Niemniej jednak, rezultaty badań pokazały, że dla głębokości, na których w największym stopniu są akumulowane metale ciężkie, integracja danych metodami kokriginu pozwala na znaczne poprawienie jakości szacowanych rozkładów



przestrzennych. Jedynie dla małych głębokości, na których występuje jedynie podpoziom organiczny ściółki, zastosowanie metod kokrigingu może być utrudnione.

Kokriging umożliwia także integrację wybranych miar, wyznaczonych na podstawie pomiarów w profilu glebowym, z pomiarami wykonywanymi na powierzchni gleby miernikiem MS2D. Miarami tymi mogą być: maksymalna podatność magnetyczna w profilu glebowym, powierzchnia pod krzywą podatności magnetycznej w profilu glebowym bądź podatność magnetyczna na wybranej głębokości w profilu glebowym.

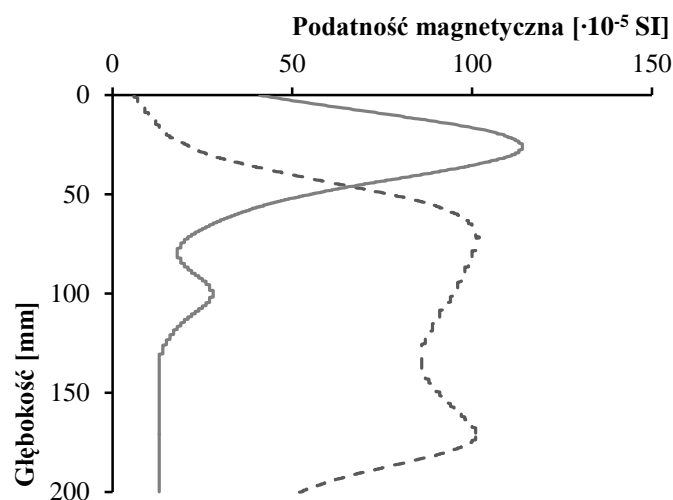
## **8 Integracja danych magnetometrycznych w przestrzeni trójwymiarowej**

Jednym z celów badawczych pracy było zbadanie możliwości oraz opracowanie efektywnych 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. Możliwe są dwa rodzaje integracji danych. Pierwszy obejmuje integrację różnego typu danych magnetometrycznych w przestrzeni dwuwymiarowej (2D), co zostało przedstawione w poprzednim rozdziale, drugi natomiast w przestrzeni trójwymiarowej (3D).

Integracja danych magnetometrycznych w przestrzeni 3D może dać sporo korzyści w ocenie potencjalnego zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi. W takiej integracji są wykorzystywane pomiary podatności magnetycznej na powierzchni gleby i w profilu glebowym. Dodatkowo, sam proces integracji danych w przestrzeni 3D nie wymaga zdecydowanie większego nakładu pracy niż integracja danych w przestrzeni 2D. Rezultatem geostatystycznej integracji danych magnetometrycznych są trójwymiarowe rozkłady przestrzenne podatności magnetycznej górnej warstwy gleby badanego obszaru. W porównaniu z dwuwymiarowymi rozkładami przestrzennymi, umożliwiają łatwiejsze wykrycie i określenie na jakiej głębokości w profilu glebowym są obserwowane podwyższone wartości podatności magnetycznej. Może to pozwolić na lepsze odróżnienie podwyższonych wartości podatności magnetycznej spowodowanych zanieczyszczeniem antropogenicznym, od tych, spowodowanych naturalnymi właściwościami gleby.

### **8.1 Wykorzystane pomiary magnetometryczne**

Do integracji danych magnetometrycznych w przestrzeni 3D zostały wykorzystane pomiary podatności magnetycznej wykonywane na powierzchni gleby miernikiem SM-400 oraz pomiary wykonywane w profilu glebowym miernikiem SM-400. Wynikiem pomiarów wykonywanych na powierzchni gleby jest zbiór punktów rozmieszczonych na płaszczyźnie 2D, pomijając różnice wynikające z ukształtowania terenu. Rezultatem pomiarów wykonywanych w profilu glebowym jest zbiór rozkładów podatności magnetycznej względem głębokości w profilu glebowym. Przykładowe rozkłady podatności magnetycznej w profilu glebowym, pochodzące z obszaru pomiarowego *Repty Śląskie*, zostały przedstawione na rysunku 8.1.



**Rysunek 8.1. Najbardziej typowe rozkłady podatności magnetycznej w profilu glebowym obserwowane na powierzchni pomiarowej *Repty Śląskie***

**Figure 8.1. The most common distributions of magnetic susceptibility in soil profile observed at area *Repty Śląskie***

Na podstawie pomiarów w profilu glebowym zostały wybrane wartości podatności magnetycznej na różnych głębokościach, z interwałem co 1 cm. W rezultacie, w każdym miejscu, w którym był wykonywany pomiar w profilu glebowym, otrzymano zbiór kilkunastu wartości podatności magnetycznej, rozmieszczonych w przestrzeni 3D. Współrzędne  $X$  oraz  $Y$  były związane z układem współrzędnych geograficznych, natomiast współrzędna  $Z$  z głębokością w profilu glebowym. W przypadku pomiarów wykonywanych na powierzchni gleby przyjmowano współrzędną  $Z$  równą 0.

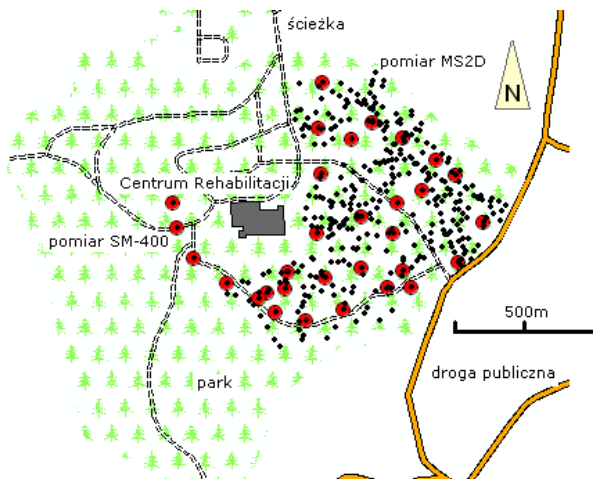
## 8.2 Wykorzystane metody integracji danych

Zarówno pomiary powierzchniowe, jak i pomiary wykonywane w profilu glebowym dotyczyły tej samej wielkości, czyli objętościowej podatności magnetycznej. Z tego względu, integracja danych pomiarowych nie wymagała wykorzystania metod geostatystycznych, w których stosuje się dwa typy zmiennych. Mogły zostać wykorzystane metody geostatystyczne oparte tylko na jednej zmiennej. W konsekwencji, rozkłady przestrzenne podatności magnetycznej na badanym obszarze zostały wykonane metodą krigingu zwykłego. W zależności od potrzeb, można też wykonać rozkładu prawdopodobieństwa przekroczenia założonej wartości progowej podatności magnetycznej, wykorzystując kriging wskaźnikowy. Wszystkie z wymienionych tu metod geostatystycznych, zostały omówione w części pracy poświęconej metodom badawczym.

## 8.3 Przykład integracji danych magnetometrycznych na obszarze *Repty Śląskie*

### 8.3.1 Analiza wstępna danych pomiarowych

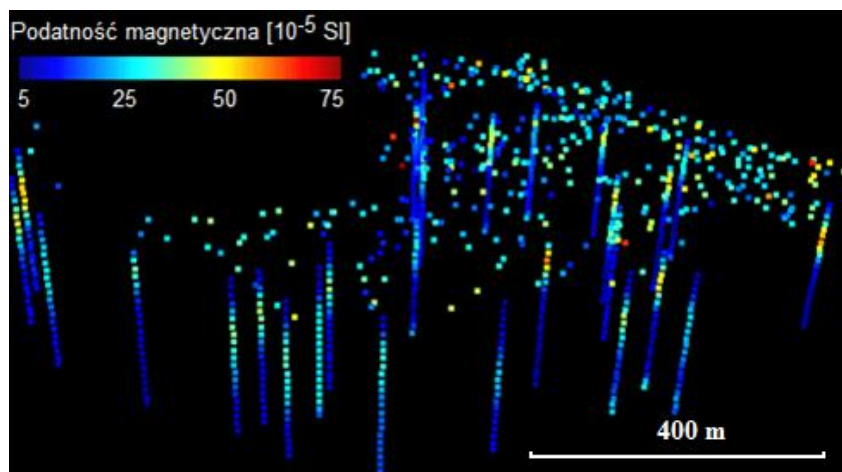
Przykład integracji danych magnetometrycznych w przestrzeni 3D został pokazany dla powierzchni pomiarowej *Repty Śląskie*, której opis zawarto w Załączniku nr 1.



**Rysunek 8.2. Punkty pomiaru podatności magnetycznej miernikiem MS2D oraz pomiaru podatności w profilu glebowym miernikiem SM-400, na powierzchni pomiarowej *Repty Śląskie***

**Figure 8.2. Sample points of magnetic susceptibility measured with MS2D device and magnetic susceptibility measured in soil profile with SM-400 device, at area *Repty Śląskie***

Łącznie na badanym obszarze zostało wykonanych 27 pomiarów podatności magnetycznej w profilu glebowym, miernikiem SM-400 (rys. 8.2.), do głębokości około 25 cm. Ze względu na to, że przy końcowych głębokościach mogą być obserwowane podwyższone wartości podatności magnetycznej, będące efektem cewki referencyjnej miernika SM-400, do analiz korelacji, zmienności przestrzennej oraz wykonania rozkładów przestrzennych wykorzystane zostały wartości podatności magnetycznej z głębokości do 15 cm. W każdym z 27 punktów pomiarowych otrzymano więc 16 wartości podatności magnetycznej, co w rezultacie dało 432 wartości. Zbiór ten został uzupełniony o 1919 pomiarów podatności, które wykonano na powierzchni gleby miernikiem MS2D. W rezultacie, otrzymano zbiór danych o liczności 2351 wartości podatności magnetycznej (rys. 8.3.).



Rysunek 8.3. Rozkład wartości podatności magnetycznej zmierzonej miernikiem MS2D i SM-400, na powierzchni *Repty Śląskie*. Odległości w profilu glebowym powiększono stukrotnie

Figure 8.3. Distribution of values of magnetic susceptibility measured with MS2D and SM-400 devices, at area *Repty Śląskie*. Distances in soil profile were scaled by 100

Jedynie w przypadku wykonywania statystyk opisowych (tabela 8.2) głębokości, na której obserwowano stabilizację podatności magnetycznej w profilu glebowym przeanalizowano wartości podatności zmierzone na głębokościach większych niż 15 cm.

W przypadku obszaru pomiarowego *Repty Śląskie*, podatność magnetyczna mierzona na powierzchni gleby była praktycznie nieskorelowana z podatnością magnetyczną na głębokościach 1 cm, 2 cm i 3 cm. Spowodowane było to tym, że ta część profilu glebowego była zajmowana głównie przez podpoziom O1, zbudowany głównie z substancji o charakterze diamagnetycznym. Podpoziom ten na ogół charakteryzuje się bardzo niskimi wartościami podatności magnetycznej. Wzrost sił korelacji był obserwowany na głębokości 4 cm, maksimum korelacji zaś na głębokościach 5 cm. Na głębokości około 9 cm następował zanik korelacji pomiędzy podatnością magnetyczną mierzoną na powierzchni, a podatnością mierzoną w profilu glebowym (tab. 8.1.).

Tabela 8.1. Współczynniki korelacji Pearsona pomiędzy podatnością magnetyczną zmierzoną na powierzchni gleby (MS2D) i w profilu glebowym (SM-400), na powierzchni *Repty Śląskie*

Table 8.1. Pearson correlation coefficients between magnetic susceptibility measured on the soil surface (MS2D) and in soil profile (SM-400), at area *Repty Śląskie*

Podatność magnetyczna			
	Na powierzchni		Na powierzchni
Na głębokości 1 cm	-0,01	Na głębokości 6 cm	0,43
Na głębokości 2 cm	0,01	Na głębokości 7 cm	0,33
Na głębokości 3 cm	-0,02	Na głębokości 8 cm	0,17
Na głębokości 4 cm	0,28	Na głębokości 9 cm	0,00
Na głębokości 5 cm	0,44	Na głębokości 10 cm	-0,10

Statystyki opisowe podatności magnetycznej zmierzonej na obszarze pomiarowym pokazują, że znacznie wyższe wartości podatności magnetycznej były obserwowane w przypadku pomiarów wykonywanych w profilu glebowym miernikiem SM-400. Ponieważ, większość zanieczyszczeń pochodzenia antropogenicznego była zakumulowana na głębokości około 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 8.2. Statystyki opisowe podatności magnetycznej zmierzonej na powierzchni gleby miernikiem MS2D oraz w profilu glebowym miernikiem SM-400, na powierzchni Repty Śląskie**

**Table 8.2. Descriptive statistics of magnetic susceptibility measured on the soil surface with MS2D device and in soil profile with SM-400 device, at area Repty Śląskie**

	Średnia	Mediana	Odchylenie standardowe	Wariancja	Współczynnik skośności	Minimum	Maksimum
	[·10 <sup>-5</sup> SI]			[·10 <sup>-10</sup> SI]	[-]	[·10 <sup>-5</sup> SI]	
<b>MS2D</b>	31,35	29,00	15,56	242,21	3,87	0,00	309,00
<b>1 cm</b>	52,16	42,40	42,33	1792,06	1,25	7,10	173,80
<b>2 cm</b>	75,26	62,70	51,45	2647,48	0,70	10,00	199,70
<b>3 cm</b>	95,08	87,80	56,08	3145,27	0,92	13,40	262,20
<b>4 cm</b>	99,99	97,60	39,57	1566,10	-0,14	19,80	164,60
<b>5 cm</b>	100,88	99,40	38,81	1506,57	0,34	29,20	184,10
<b>6 cm</b>	95,08	91,80	42,19	1779,73	0,48	34,30	189,40
<b>7 cm</b>	84,20	79,50	41,31	1706,45	0,37	22,40	173,70
<b>8 cm</b>	72,04	76,10	36,62	1340,79	0,12	13,80	151,10
<b>9 cm</b>	61,30	65,20	34,04	1159,06	0,18	9,30	127,90
<b>10 cm</b>	50,15	46,70	29,10	846,67	0,17	7,80	99,50
<b>11 cm</b>	40,67	41,08	26,11	681,75	0,51	6,10	96,48
<b>12 cm</b>	34,57	27,50	24,72	611,24	0,74	3,59	89,80
<b>13 cm</b>	29,43	22,74	22,72	516,26	0,85	2,00	86,03
<b>14 cm</b>	25,60	22,36	20,78	431,91	1,04	1,02	86,60
<b>15 cm</b>	23,19	21,49	20,01	400,38	1,47	0,24	90,78

W tabeli 8.2 pokazano jedynie statystyki opisowe dla wartości podatności magnetycznej zmierzonej na głębokościach do 15 cm, ze względu na efekt cewki referencyjnej miernika SM-400 występujący na większych głębokościach w niektórych punktach pomiarowych.

Analiza poszczególnych rozkładów podatności magnetycznej w profilach glebowych wykazała, że miały one przebieg charakterystyczny dla terenów z występującą silną presją antropogeniczną (rys. 8.1.). Dla większości profili były obserwowane podwyższone wartości podatności magnetycznej na głębokości od około 3 cm do 5 cm (tab. 8.3.). Następnie, wraz z głębokością, wartości podatności magnetycznej malały i ustalały się

średnio na głębokości około 16 cm. Ponowny wzrost wartości podatności magnetycznej był obserwowany na głębokości około 20 cm. Profile podatności magnetycznej miały więc przebieg charakterystyczny dla typu A1 (Magiera i inni, 2007). W 5 punktach pomiarowych przebieg podatności magnetycznej w profilu glebowym zbliżony był do typu A3 (rys. 8.1.), który jest często obserwowany w lasach liściastych (Magiera i inni, 2007). W profilach tego typu, podwyższone wartości podatności magnetycznej były obserwowane nawet do głębokości ponad 10 cm.

**Tabela 8.3. Statystyki opisowe głębokości, na której było obserwowane maksimum oraz ustalenie się podatności magnetycznej w profilu glebowym, na powierzchni pomiarowej Repty Śląskie**

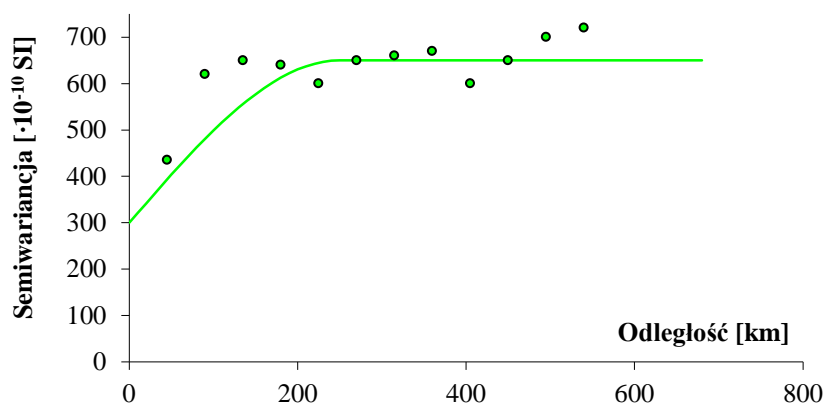
**Table 8.3. Descriptive statistics of depths where maximum and stabilization of magnetic susceptibility was observed in the soil profile, at area Repty Śląskie**

	Głębokość, na której podatność magnetyczna:	
	Osiąga maksimum	Ustala się
Średnia [cm]	5,1	16,7
Błąd standardowy [cm]	0,4	0,5
Mediana [cm]	5,0	16,0
Odchylenie standardowe [cm]	2,0	2,7
Wariancja [cm <sup>2</sup> ]	4,2	7,4
Kurtoza [-]	-0,43	-0,75
Współczynnik skośności [-]	0,28	0,44
Rozstęp [cm]	8,0	10,0
Minimum [cm]	2,0	13,0
Maksimum [cm]	10,0	23,0

W kilku punktach pomiarowych obserwowano rozkład podatności magnetycznej w profilu glebowym, wykazujący pewne cechy charakterystyczne dla dużego wpływu litogenicznego (Magiera i inni, 2007). W rozkładach takich (rys. 7.1.) największe wartości podatności obserwowane były na większych głębokościach, od około 7 cm do prawie 15 cm, a wartości maksymalne były położone w dolnej części profilu glebowego.

### 8.3.2 Badania zmienności przestrzennej podatności magnetycznej w profilu glebowym

W celu wykonania rozkładu przestrzennego podatności magnetycznej było konieczne zbadanie zmienności przestrzennej i wykonanie modelu wariogramu. W pierwszym etapie zostały wykonane badania korelacji przestrzennych na podstawie 2486 wartości podatności magnetycznej, rozmieszczonych w przestrzeni 3D (rys. 8.4.). Wariogram eksperymentalny został wykonany dla 15 klas długości wektora  $\mathbf{h}$ , z krokiem równym 45 m.



**Rysunek 8.4. Wariogram i jego model dla podatności magnetycznej zmierzonej na powierzchni gleby miernikiem MS2D i w profilu glebowym miernikiem SM-400, na powierzchni Repty Śląskie**

**Figure 8.4. Variogram and its model for magnetic susceptibility measured on the soil surface with MS2D device and in the soil profile with SM-400 device, at area Repty Śląskie**

Wariogram eksperymentalny został wymodelowany przy wykorzystaniu efektu samorodka i modelu sferycznego. Efekt samorodka wynoszący  $300 \cdot 10^{-10}$  SI miał stosunkowo dużą wartość w porównaniu z całkowitym progiem, który wynosił  $650 \cdot 10^{-10}$  SI. Niemniej, na wariogramie podatności magnetycznej można było zaobserwować wyraźną ciągłość przestrzenną, która charakteryzowała się zasięgiem korelacji wynoszącym 300 m. Model zmienności przestrzennej został później wykorzystany do wykonania rozkładu przestrzennego metodą krigingu zwykłego.

Dodatkowo została zbadana zmienność przestrzenna podatności magnetycznej na podstawie wartości zmierzonych tylko na określonej głębokości w profilu glebowym. Została wykonana seria wariogramów dla wartości podatności magnetycznej, zmierzonej na powierzchni gleby oraz na głębokościach od 1 cm do 15 cm. W rezultacie otrzymanych zostało 16 wariogramów, z których każdy obrazował zmienności przestrzenną podatności magnetycznej na głębokościach od 0 cm do 15 cm w profilu glebowym. Wszystkie wariogramy eksperymentalne zostały wykonane dla 10 klas długości wektora  $\mathbf{h}$ , z krokiem równym 45 m. Parametry, poszczególnych modeli wariogramów (tab. 8.4.), były dopasowywane przy wykorzystaniu metody najmniejszych kwadratów.

W przypadku podatności magnetycznej mierzonej na powierzchni gleby oraz na głębokości 1 cm, do opisu zmienności przestrzennej został wykorzystany model Gaussowski. Natomiast w pozostałych przypadkach był wykorzystywany model sferyczny. Taki wybór modelu był konieczny, ponieważ podatność magnetyczną mierzoną bardzo blisko powierzchni gleby, na głębokości 0 cm i 1 cm, charakteryzowały niewielkie zmiany korelacji przestrzennych, dla małych odległości pomiędzy punktami pomiarowymi. Mogło to wynikać stąd, że przypowierzchniowa, centymetrowa warstwa gleby była zajmowana głównie



przez podzium organiczny ściółki O<sub>l</sub>, który charakteryzuje się bardzo dużą zawartością diamagnetycznej substancji organicznej.

**Tabela 8.4. Parametry modeli wariogramów podatności magnetycznej zmierzonej na powierzchni gleby (0 cm) oraz na głębokościach do 15 cm w profilu glebowym. W nawiasach podano typ modelu: G – Gaussowski, S – sferyczny**

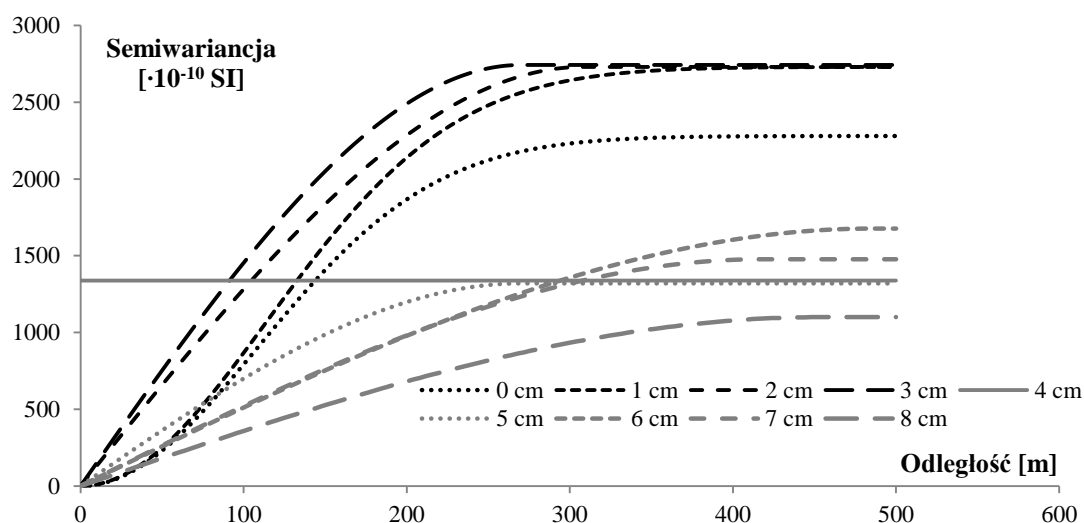
**Table 8.4. Parameters of variogram models of magnetic susceptibility measured on the soil surface (0 cm) and on depths to 15 cm in soil profile. Types of model were given in parentheses G – Gaussian, S – spherical**

Podatność magnetyczna na głębokości:	Parametry modeli wariogramów			Podatność magnetyczna na głębokości:	Parametry modeli wariogramów		
	Efekt samorodka [ $\cdot 10^{-10}$ SI]	Zasięg [m]	Próg [ $\cdot 10^{-10}$ SI]		Efekt samorodka [ $\cdot 10^{-10}$ SI]	Zasięg [m]	Próg [ $\cdot 10^{-10}$ SI]
0 cm	-	265(G)	760	8 cm	-	453(S)	1100
1 cm	-	280(G)	2280	9 cm	1055	-	-
2 cm	-	308(S)	2730	10 cm	764	-	-
3 cm	-	270(S)	2743	11 cm	568	-	-
4 cm	1339	-	-	12 cm	512	-	-
5 cm	-	270(S)	1320	13 cm	447	-	-
6 cm	-	485(S)	1677	14 cm	392	-	-
7 cm	-	417(S)	1477	15 cm	393	-	-

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. Obserwowano znacznie większy spadek korelacji przestrzennych, w porównaniu z korelacją dla podatności magnetycznej mierzonej na głębokości 0 cm i 1 cm. Wyniki takie były spowodowane tym, że na większych głębokościach w profilu glebowym występowały podziumy glebowe: organiczny fermentacyjny Of, organiczny humusowy Oh oraz próchniczny humusowy Ah, w których były zakumulowane największe ilości zanieczyszczeń pochodzenia antropogenicznego. Na podziumach tych obserwowano także najwyższe wartości podatności magnetycznej, co mogło wpływać na wzrost zmienności przestrzennej podatności.

Jedynie w przypadku podatności magnetycznej mierzonej na głębokościach od 0 cm do 8 cm, była obserwowana 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 wzrastał do 485 m dla podatności magnetycznej mierzonej na głębokości 6 cm. Obserwacje takie wskazywały na to, że zmienność przestrzenna podatności magnetycznej, warunkowana zanieczyszczeniem antropogenicznym, malała wraz z głębokością w profilu glebowym. Na większych głębokościach, od około 6 cm do 8 cm, znacznie spadała zawartość zanieczyszczeń pochodzenia antropogenicznego

oraz wartości podatności magnetycznej, a zasięg korelacji przestrzennych wynosił ciągle powyżej 400 m.



**Rysunek 8.5.** Wariogramy podatności magnetycznej zmierzonej na różnych głębokościach w profilu glebowym, na powierzchni pomiarowej *Repty Śląskie*

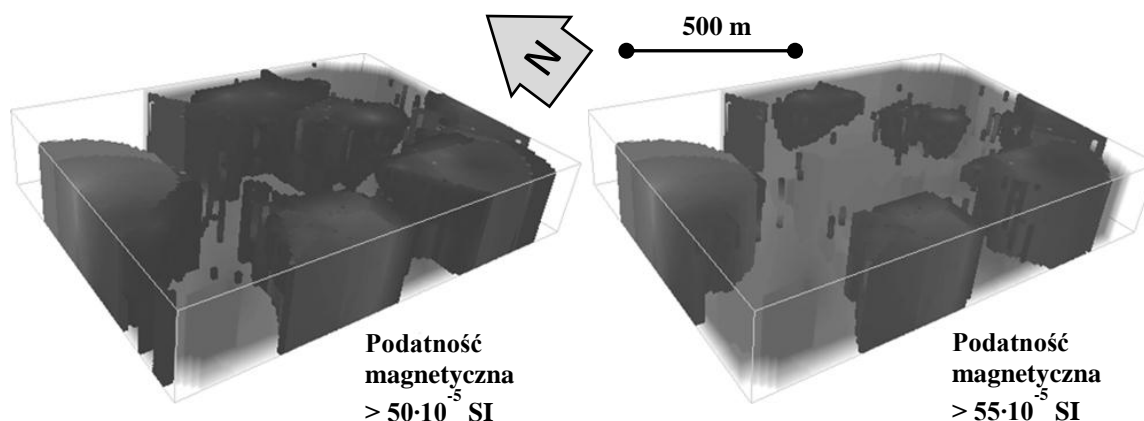
**Figure 8.5.** Variograms of magnetic susceptibility measured on different depths in soil profile, at area *Repty Śląskie*

Na wariogramach podatności magnetycznej, zmierzonej na głębokościach większych niż 10 cm w profilu glebowym, była obserwowana słabo widoczna zmienności przestrzenna. Wariogramy te zostały wymodelowane przy wykorzystaniu tylko czystego efektu samorodka, który malał wraz ze zwiększaniem się głębokości, na której była mierzona podatność magnetyczna, ponieważ wraz ze wzrostem głębokości w profilu glebowym, obserwowane były coraz mniejsze wartości podatności magnetycznej.

Wraz ze zwiększaniem się głębokości, na wariogramach podatności magnetycznej obserwowany był wzrost wartości progu. Maksymalne wartości progu były osiągnięte w przypadku wariogramów podatności magnetycznej mierzonej na głębokości 3 cm. W wielu punktach badanego obszaru na głębokości 3 cm zanikał podpoziom O1 i był już obserwowany następny z podpoziomów, podpoziom organiczny fermentacyjny Of. Podpoziomy te, w znacznym stopniu różnią się pod względem zdolności do kumulowania zanieczyszczeń antropogenicznych. W związku z tym, wartości podatności magnetycznej, mierzone na głębokości 3 cm, mogły się znacznie różnić w zależności od miejsca, w którym był wykonywany pomiar. Efektem tego była bardzo wysoka wartość progu obserwowana na wariogramie.

### 8.3.3 Analiza trójwymiarowych rozkładów przestrzennych podatności magnetycznej

Trójwymiarowy rozkład przestrzenny (rys 8.6.) podatności magnetycznej został wykonany do głębokości 15 cm w profilu glebowym. Ze względu na czytelność rysunków pokazano głównie wycinki rozkładu przestrzennego, gdzie podatność magnetyczna przekraczała wartość  $50 \cdot 10^{-5}$  SI i  $55 \cdot 10^{-5}$  SI.



**Rysunek 8.6. Rozkład przestrzenny objętości gleby, gdzie podatność magnetyczna przekraczała wartości  $50 \cdot 10^{-5}$  SI i  $55 \cdot 10^{-5}$  SI na powierzchni pomiarowej Repty Śląskie. Odległości w profilu glebowym powiększono pięćdziesięciokrotnie ze względu na czytelność rysunku**

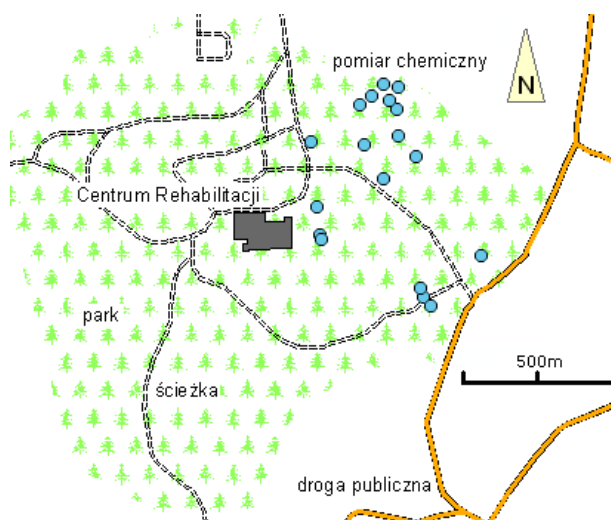
**Figure 8.6. Spatial distribution of volumes of soil where magnetic susceptibility exceeded  $50 \cdot 10^{-5}$  SI and  $55 \cdot 10^{-5}$  SI at area Repty Śląskie. Distances in soil profile were scaled by 50 to increase the readability of the figure**

Najwyższe wartości podatności magnetycznej były obserwowane w pobliżu pobliskiej drogi publicznej oraz niedaleko Centrum Rehabilitacji, w skrajnych północnych częściach badanego obszaru. Na znacznej części badanego obszaru, głównie w części południowej oraz południowo-zachodniej, stwierdzono wartości podatności magnetycznej przekraczające  $50 \cdot 10^{-5}$  SI. Były obserwowane praktycznie na całym przekroju glebowym, do głębokości równej 12 cm. Było także widoczne, że w rejonach, gdzie podatność magnetyczna przekraczała  $50 \cdot 10^{-5}$  SI na większych głębokościach w profilu glebowym, pierwsze centymetry (1 do 2 cm) profilu glebowego charakteryzowały się znacznie mniejszymi wartościami podatności magnetycznej. Wynikało to z braku ferromagnetycznych właściwości pierwszych kilku centymetrów profilu glebowego, zajmowanych przez podpoziom organiczny ściółki Ol. Natomiast w niżej położonym podpoziomie organicznym fermentacyjnym Of, organicznym humusowym Oh i próchnicznym humusowym Ah zostały zakumulowane metale ciężkie, co skutkowało dużymi wartościami podatności magnetycznej. Obserwacje takie potwierdzają, że na badanym obszarze gleby charakteryzowały się silnym i wyraźnym zanieczyszczeniem antropogenicznym.

W południowej części badanego obszaru, w pobliżu granicy parku, wartości podatności przekraczające  $50 \cdot 10^{-5}$  SI obserwowano na większych głębokościach w profilu glebowym. Podobne anomalie zostały zaobserwowane także w części północno-wschodniej obszaru. Może to sugerować, że dla tej części badanego obszaru podwyższone wartości podatności magnetycznej były wynikiem naturalnych właściwości gleb, a czynnik antropogeniczny miał mniejsze znaczenie (Magiera i inni, 2006). Potwierdza to, co zaobserwowano wcześniej w kilku punktach pomiarowych, zlokalizowanych w tej części badanego obszaru, gdzie rozkłady podatności magnetycznej w profilach glebowych charakteryzowały się zauważalnym wpływem litogenicznym.

#### 8.3.4 Weryfikacja wyników – pomiary zawartości metali ciężkich w glebie

Do weryfikacji wyników obliczeń, wykonanych na podstawie pomiarów podatności magnetycznej, zostały wykorzystane pomiary zawartości w glebie takich metali ciężkich, jak Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn. Na badanej powierzchni *Repty Śląskie* wykonano 18 pomiarów chemicznych (rys. 8.7.).



**Rysunek 8.7. Rozkład punktów pomiarowych zawartości metali ciężkich w glebie na powierzchni pomiarowej *Repty Śląskie***

**Figure 8.7. Location of sample points of heavy metals concentration in soil, at area *Repty Śląskie***

Na podstawie analiz statystyk opisowych zawartości poszczególnych metali ciężkich w glebie można stwierdzić, że zawartość metali ciężkich w glebie na badanym obszarze była wysoka. Obserwowano szczególnie dużą zawartość takich metali, jak Cd, Cu, Pb oraz Zn, której wartości nawet kilkukrotnie przekraczały dopuszczalną wielkość (szczegółowe dane na temat maksymalnej dopuszczalnej zawartości metali ciężkich w glebie, według Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002, zostały przedstawione

w Załączniku nr 2). W przypadku Pb w każdym punkcie pomiarowym zostały przekroczone wartości dopuszczalne. Zawartość Fe w glebie także osiągała wysokie wartości.

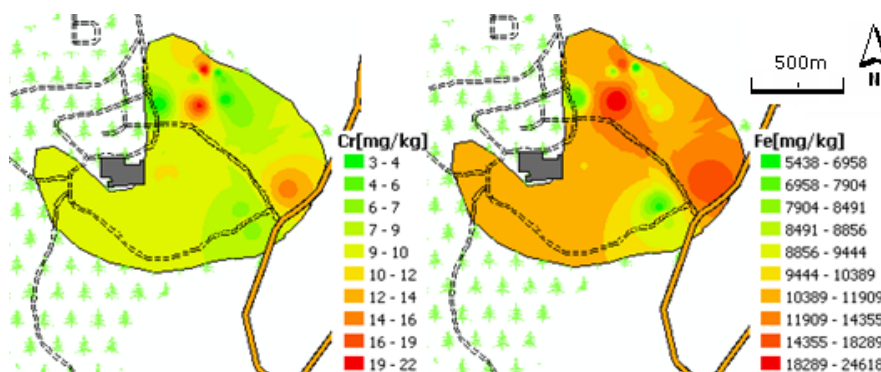
Zawartość tego pierwiastka w glebie nie jest normowana, jednak średnia zawartość na badanym obszarze, przekraczająca 11000 mg/kg, była wielokrotnie wyższa niż średnia zawartość w glebach w Polsce (*Kabata-Pendias i Pendias, 1993*). W przypadku Ni i Cr zawartość w glebie była niska i nie przekraczała wartości normowanych (tab. 8.5.).

**Tabela 8.5. Statystyki opisowe zawartości metali ciężkich w glebie i współczynniki korelacji pomiędzy podatnością magnetyczną a zawartością metali ciężkich, na powierzchni Repty Śląskie**

**Table 8.5. Descriptive statistics of heavy metals concentration in soil and Pearson correlation coefficients between magnetic susceptibility and heavy metals concentration, at area Repty Śląskie**

	Średnia	Mediana	Minimum	Maksimum	Kwartyl		Odchylenie standardowe	Współczynnik korelacji Pearsona
					25%	75%		
				[mg·kg <sup>-1</sup> ]				[-]
<b>Cd</b>	3,00	2,52	0,77	7,14	1,72	4,38	1,80	0,16
<b>Cr</b>	9,32	8,86	2,94	21,58	5,65	12,06	5,39	0,36
<b>Cu</b>	39,10	20,68	9,11	331,29	14,76	28,91	73,77	0,03
<b>Fe</b>	11255	9974	5438	24618	8725	12795	4786	0,35
<b>Ni</b>	6,31	6,48	0,05	12,06	4,43	7,82	3,25	0,41
<b>Pb</b>	339,00	265,76	114,42	706,65	203,13	479,36	189,01	0,44
<b>Zn</b>	350,96	265,52	90,21	1807,70	211,41	326,99	375,19	0,25

Dla każdego z badanych metali, został wykonany rozkład przestrzenny jego zawartości w glebie na badanym obszarze Repty Śląskie (rys. 8.8., 8.9., 8.10. i 8.11.). Ze względu na niedużą ilość pomiarów chemicznych, wszystkie rozkłady przestrzenne zostały wykonane metodą odwrotnych odległości (*ang. IDW – Inverse Distance Weighting*).

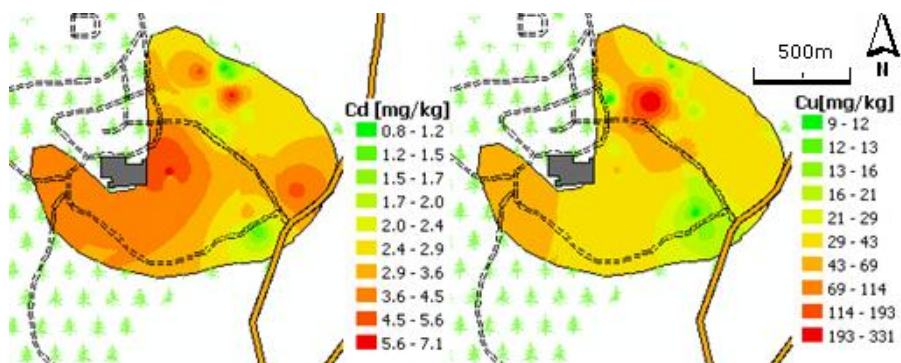


**Rysunek 8.8. Rozkłady przestrzenne zawartości Cr i Fe w glebie na powierzchni Repty Śląskie**

**Figure 8.8. Spatial distributions of Cr and Fe concentration in soil at area Repty Śląskie**

W części południowo-wschodniej i północnej obserwowano największą zawartość żelaza w glebie. Jest to zgodne z otrzymanymi rozkładami podatności magnetycznej. W tej części badanego obszaru obserwowano podwyższone wartości podatności magnetycznej, położone na większych głębokościach w profilu glebowym.

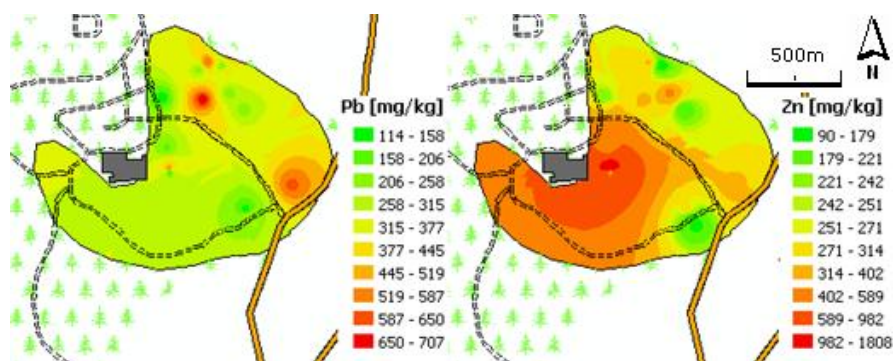
Potwierdza to obserwacje, że w tej części obszaru większy wpływ na podwyższone wartości podatności magnetycznej mogły mieć naturalne właściwości gleb.



**Rysunek 8.9.** Rozkłady przestrzenne zawartości Cd i Cu w glebie na powierzchni *Repty Śląskie*

**Figure 8.9.** Spatial distributions of Cd and Cu concentration in soil at area *Repty Śląskie*

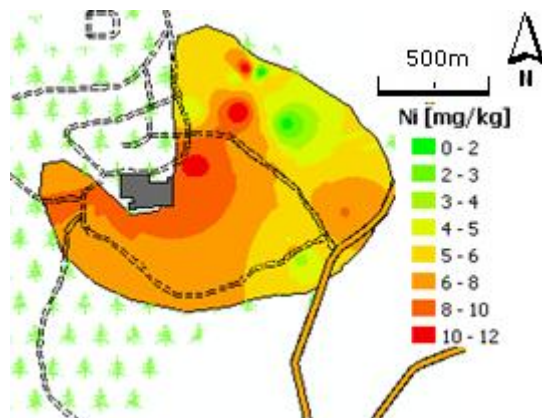
Zawartość kadmu w glebie znacznie przekraczała dopuszczalne wartości. Najwyższą zawartość obserwowano w pobliżu drogi publicznej w południowo-wschodniej części oraz w centrum badanego obszaru, w pobliżu Centrum Rehabilitacji. Zawartość miedzi w glebie także przekraczała dopuszczalną wartość, jednak tylko na niewielkiej części badanego obszaru. Obserwacje te były praktycznie ograniczone jedynie do jednego punktu pomiarowego.



**Rysunek 8.10.** Rozkłady przestrzenne zawartości Zn i Pb w glebie na powierzchni *Repty Śląskie*

**Figure 8.10.** Spatial distributions of Zn and Pb concentration in soil at area *Repty Śląskie*

Zawartość zarówno ołowiu, jak i cynku w znacznym stopniu przekraczała dopuszczalne wartości, praktycznie na całym badanym obszarze. Obserwacje takie mogą być tłumaczone tym, że powierzchnia pomiarowa *Repty Śląskie* znajdowała się w zasięgu występowania dolomitów kruszczońskich, bogatych między innymi w związki ołowiu i cynku.



**Rysunek 8.11. Rozkłady przestrzenne zawartości Ni w glebie na powierzchni Repty Śląskie**

**Figure 8.11. Spatial distribution of Ni concentration in soil at area Repty Śląskie**

Zawartość niklu w glebie była niską i nie przekraczała dopuszczalnej wartości. Fragmenty badanego obszaru, na których obserwowano najwyższą zawartość niklu w glebie, pokrywały się z tymi, na których obserwowano wysoką zawartość pozostałych metali ciężkich. Dotyczyło to pobliża drogi publicznej oraz fragmentu obszaru w jego północnej części.

Badania chemiczne potwierdziły wnioski wyciągnięte na podstawie pomiarów magnetometrycznych. Podwyższoną zawartość metali ciężkich w glebie obserwowano w tych samych rejonach, co podwyższone wartości podatności magnetycznej. W rejonach, gdzie stwierdzono wysoką zawartość Fe, Pb i Ni oraz w mniejszym stopniu Cd, obserwowano również podwyższone wartości podatności magnetycznej, w górnej części profilu glebowego.

Jednakże, w południowej części badanego obszaru i w pewnych punktach, w części południowo-wschodniej, podwyższoną podatność magnetyczną obserwowano także na większych głębokościach, co może świadczyć o wyraźnym litogenicznym wpływie.

#### **8.4 Podsumowanie**

Wykorzystanie metod geostatystycznych umożliwia prostą i efektywną integrację pomiarów wykonywanych na powierzchni i w profilu glebowym. Możliwe jest łączne spożytkowanie zalet pomiarów powierzchniowych i tych wykonywanych w profilu glebowym. Wykorzystanie rozkładów przestrzennych 3D pozwala na łatwiejsze i bardziej precyzyjne sprawdzenie czy podwyższone wartości podatności magnetycznej występują na podpoziomach glebowych Of, Oh i Ah, czy też na poziomach położonych głębiej w profilu glebowym. W rezultacie jest możliwe odróżnienie obszarów, gdzie większy wpływ

na wartości podatności magnetycznej miały naturalne właściwości gleb, od tych, gdzie dominował czynnik antropogeniczny.

Trójwymiarowe rozkłady przestrzenne podatności magnetycznej, wykonywane na podstawie zintegrowanych zbiorów danych pomiarowych, mają istotną przewagę w porównaniu z rozkładami przestrzennymi dwuwymiarowymi. Wartości podatności magnetycznej w miejscach, w których nie były wykonywane pomiary, są szacowane z wykorzystaniem trójwymiarowych korelacji przestrzennych. Oznacza to, że są też uwzględniane zależności wynikające z rozmieszczenia cząstek pochodzenia antropogenicznego w profilu glebowym. Ponadto, w sposób pośredni jest też uwzględniana budowa przekroju glebowego i poszczególnych poziomów glebowych, co jest silnie skorelowane z rozkładem podatności magnetycznej w profilu glebowym.

W większości przypadków, głębokość, do której należy wybierać wartości podatności magnetycznej mierzone w profilu glebowym, powinna być ustalana indywidualnie dla badanego obszaru. Powinna być dobierana tak, aby obejmowała cały zakres podwyższonych wartości podatności magnetycznej, które są wynikiem zanieczyszczenia antropogenicznego.



## 9 Integracja danych magnetometrycznych i chemicznych

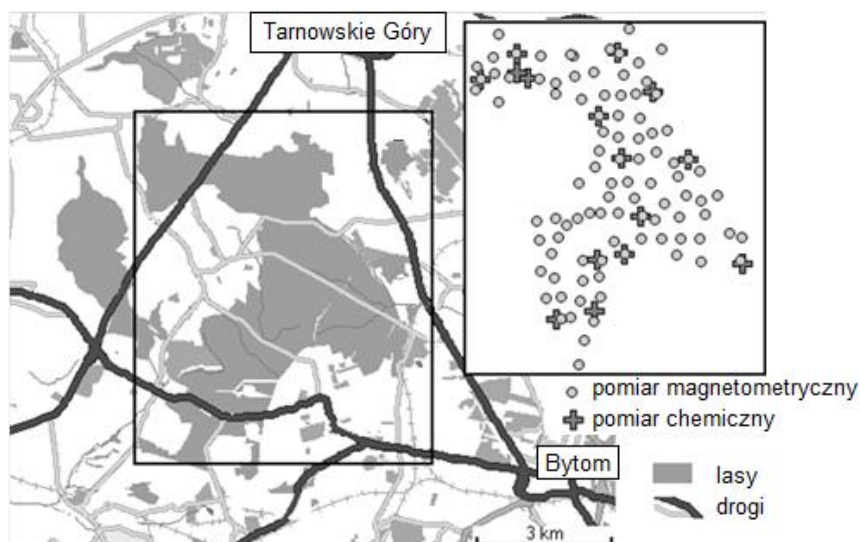
Wynikiem pomiarów magnetometrycznych są wartości podatności magnetycznej, która jest skorelowana z zawartością metali ciężkich w glebie. Dokładne określenie zawartości poszczególnych metali ciężkich, na podstawie wartości podatności magnetycznej, nie jest na razie możliwe. W związku z tym, jest konieczne wykonywanie weryfikujących pomiarów chemicznych, które uzupełniają wnioskowanie na temat zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi, na podstawie pomiarów magnetometrycznych. Jest więc możliwe, a nawet celowe, integrowanie pomiarów chemicznych i magnetometrycznych, ale ilość weryfikujących pomiarów chemicznych musi być minimalizowana. Po pierwsze, ze względu na koszty monitoringu, po drugie, dlatego że to pomiary magnetometryczne mają stanowić zasadnicze źródło informacji o zanieczyszczeniu gleby.

W integracji danych w metodzie magnetometrycznej wyszczególnić można dwa najbardziej istotne, dla wykorzystania metod geostatystycznych, przypadki. Pierwszy z nich dotyczy sytuacji, gdy jest wykonywana duża, znacznie przekraczająca 30, liczba pomiarów chemicznych. Najczęściej dotyczy to badań w większej skali (skali regionalnej). Drugi, znacznie częściej spotykany, z przypadków dotyczy badań w skali lokalnej, gdy ze względu na niewielką powierzchnię badanego obszaru wykonuje się czasem tylko kilkanaście pomiarów chemicznych.

Wtedy, gdy jest dostępna duża liczba pomiarów chemicznych jest możliwe dokładne modelowanie krzyżowych korelacji pomiędzy podatnością magnetyczną a zawartością metali ciężkich w glebie. Tym samym, jest możliwe wykonanie integracji danych metodami kokrigingu. W sytuacji, gdy jest dostępna mała liczba pomiarów chemicznych, może być konieczne wykorzystanie innych metod. W niniejszej pracy przedstawiono przykład integracji danych magnetometrycznych i chemicznych metodą Co\_Est (*Abbaspour i inni, 1998*).

### 9.1 Integracja danych magnetometrycznych i chemicznych metodą Co\_Est

Integracja danych magnetometrycznych i chemicznych została przeprowadzona na przykładzie pomiarów wykonanych na powierzchni pomiarowej *Miechowice*. Badany obszar miał nieregularny kształt, który był uwarunkowany głównie układem kompleksu leśnego (rys. 9.1.). Wszystkie pomiary podatności magnetycznej i pobór próbek glebowych wykonano na terenach leśnych.



**Rysunek 9.1. Lokalizacja powierzchni pomiarowej *Miechowice* oraz punktów pomiarowych podatności magnetycznej i poboru próbek glebowych**

**Figure 9.1. Location of area *Miechowice* and sample points of magnetic susceptibility and soil samples collection**

### 9.1.1 Wykorzystane pomiary magnetometryczne i chemiczne

Na badanej powierzchni *Miechowice* wykonano 96 pomiarów podatności magnetycznej na powierzchni gleby miernikiem MS2D oraz pobrano 14 próbek glebowych, które zostały wykorzystane do wyznaczenia zawartości Zn w glebie. Pomiary magnetometryczne wykonano także w 14 miejscach poboru próbek glebowych.

### 9.1.2 Przykład integracji danych na obszarze *Miechowice*

W celu wykorzystania metody Co\_Est, było konieczne określenie zależności regresyjnej pomiędzy podatnością magnetyczną a zawartością Zn w glebie. Zostało to wykonane na podstawie 14 punktów pomiarowych, w których przeprowadzono zarówno pomiary podatności magnetycznej, jak i zawartości Zn w glebie. Współczynnik korelacji pomiędzy podatnością magnetyczną, a zawartością Zn w glebie wynosił 0,44. Zależność regresyjna została określona jako:

$$\text{Zawartość Zn [mg/kg]} = 75,39 + 3,96 \cdot \text{podatność magnetyczna} [\cdot 10^{-5} \text{ SI}], \quad (40)$$

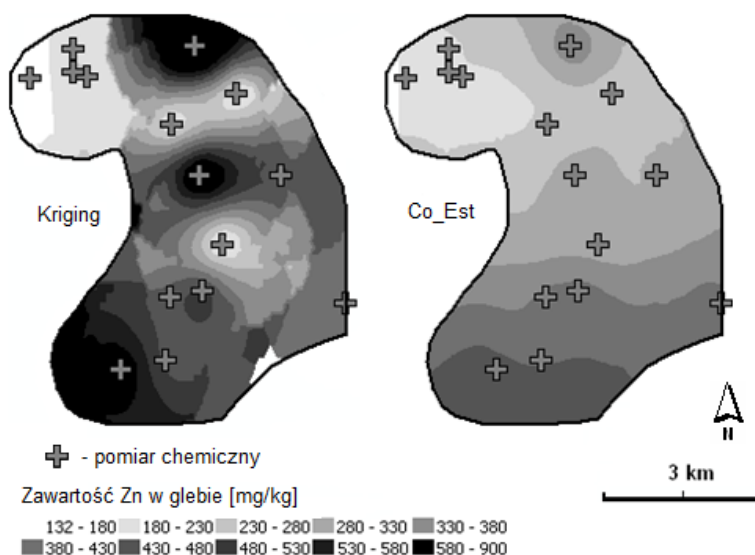
Wyznaczona zależność regresyjna została wykorzystana do obliczenia zawartości Zn w glebie w 96 punktach pomiarowych, w których była mierzona tylko podatność magnetyczna gleby. Po takim wyliczeniu, liczebność zbioru zawartości Zn w glebie wzrosła z 14 do 110.

Tabela 9.1. Statystyki opisowe wartości podatności magnetycznej zmierzonej na powierzchni gleby miernikiem MS2D oraz zawartości Zn w glebie, na powierzchni pomiarowej *Miechowice*

Table 9.1. Descriptive statistics of magnetic susceptibility measured with MS2D device on the soil surface and concentration of Zn in soil, at area *Miechowice*

	Podatność powierzchniowa [ $\cdot 10^{-5}$ SI]	Zawartość Zn w glebie [mg/kg]	Wyliczona zawartość Zn w glebie [mg/kg]
<b>Liczba</b>	96	14	96
<b>Średnia</b>	56,3	400,0	298,2
<b>Mediana</b>	53,3	430,0	286,3
<b>Odchylenie standardowe</b>	19,8	132,0	88,8
<b>Współczynnik skośności</b>	0,67	0,65	0,67
<b>Minimum</b>	22,4	238,6	153,9
<b>Maksimum</b>	110,2	900,0	511,7
<b>Rozstęp</b>	87,8	661,4	357,8
<b>Kwartył 25%</b>	39,5	177,0	231,9
<b>Kwartył 75%</b>	69,0	497,0	348,8
<b>Rozstęp międzykwartyłowy</b>	29,5	320,0	116,8

Wartości zawartości Zn w glebie, wyznaczone na podstawie pomiarów podatności magnetycznej, charakteryzowały się mniejszym rozstępem, w porównaniu z wartościami Zn wyznaczonymi na podstawie pomiarów chemicznych. Wynikało to głównie z tego, że maksymalna zawartość Zn wyznaczona na podstawie podatności magnetycznej wynosiła 511,7 mg/kg, natomiast w przypadku pomiarów chemicznych wynosiła ona 900 mg/kg (tab. 9.1.).



Rysunek 9.2. Rozkłady przestrzenne zawartości Zn w glebie na powierzchni pomiarowej *Miechowice*, otrzymane metodą krzygu oraz metodą *Co\_Est*

Figure 9.2. Spatial distribution of Zn concentration in soil at area *Miechowice*, calculated using kriging and *Co\_Est* method

Rozkład przestrzenny zawartości Zn w glebie, wyznaczony na podstawie tylko 14 pomiarów chemicznych, charakteryzował się małym stopniem wygładzenia oraz widocznym

efektem "bull's eye". Takie wyniki, były spowodowane głównie zbyt małą liczbą pomiarów chemicznych, niewystarczającą do efektywnego zastosowania metody krigingu (rys. 9.2.). Z kolei rozkład przestrzenny wyznaczony metodą Co\_Est, był bardziej wygładzony, a maksymalne estymowane wartości sięgały 480 mg/kg. Najwyższe wartości były obserwowane w południowej części badanego obszaru. Była to podobna obserwacja jak w przypadku analizy rozkładu zawartości Zn, szacowanego metodą krigingu.

**Tabela 9.2. Błędy estymacji dla rozkładów przestrzennych zawartości Zn w glebie na powierzchni pomiarowej *Miechowice*, wykonanych metodą krigingu i Co\_Est**

**Table 9.2. Estimation errors for spatial distribution of Zn concentration in soil at area *Miechowice*, calculated using kriging and Co\_Est method**

	Kriging	Co_Est
Średni błąd estymacji [mg/kg]	271,6	101,3
Standaryzowany spierwiastkowany średniokwadratowy błąd estymacji [-]	1,149	1,020

Na podstawie wyznaczonych błędów estymacji (tab. 9.2.) można było wywnioskować, że integracja pomiarów chemicznych i magnetometrycznych pozwoliła na wyraźną poprawę jakości szacowanego rozkładu przestrzennego zawartości Zn w glebie.

## 9.2 Podsumowanie

Integracja danych chemicznych i magnetometrycznych może być szczególnie utrudniona, gdy jest dostępna mała liczba pomiarów zawartości metali ciężkich w glebie. W takich sytuacjach, jest konieczne wykorzystywanie innych niż kokriging metod integracji danych. W badaniach stosowano głównie metodę Co\_Est, a otrzymane rezultaty badań pokazały, że metoda ta umożliwia efektywną integrację danych chemicznych i magnetometrycznych. Pewną niedogodnością stosowania metody Co\_Est jest konieczność wykonywania pomiarów magnetometrycznych także w punktach poboru próbek glebowych, do pomiarów zawartości metali ciężkich w glebie. Niemniej jednak, pomiary podatności magnetycznej wykonywane miernikiem MS2D są na tyle proste i szybkie do przeprowadzenia, że spełnienie wymogu takiego sposobu przeprowadzania pomiarów nie powinno być znacznym utrudnieniem.

## 10 Szacowanie zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi na podstawie pomiarów magnetometrycznych

### 10.1 Wykorzystane pomiary magnetometryczne

W badaniach zostały wykorzystane pomiary podatności magnetycznej w profilu glebowym, wykonane miernikiem SM-400, na powierzchni pomiarowej *Lasy Błędowskie*. Na podstawie tych pomiarów wyznaczono cztery miary magnetometryczne:

- i. podatność magnetyczna  $\kappa_{3cm}$  na głębokości 3 cm,
- ii. podatność magnetyczna  $\kappa_{5cm}$  na głębokości 5 cm,
- iii. maksymalna podatność  $\kappa_{max}$  w profilu glebowym,
- iv. pole  $A_\kappa$  pod krzywą podatności magnetycznej w profilu glebowym.

Miary te zostały szczegółowo opisane i zbadane w części pracy poświęconej wstępnej integracji danych w magnetometrii terenowej.

### 10.2 Stopień zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi na badanym obszarze *Lasy Błędowskie*

Na badanej powierzchni pomiarowej *Lasy Błędowskie* tylko w przypadku zawartości Cd, Pb i Zn w glebie zostały przekroczone dopuszczalne wartości (Załącznik nr 2), odpowiednio w 5, 16 i 3 punktach pomiarowych. Zawartość Cu i Ni w glebie była niska i na całym badanym obszarze nie przekraczała wartości dopuszczalnych (tab. 10.1.).

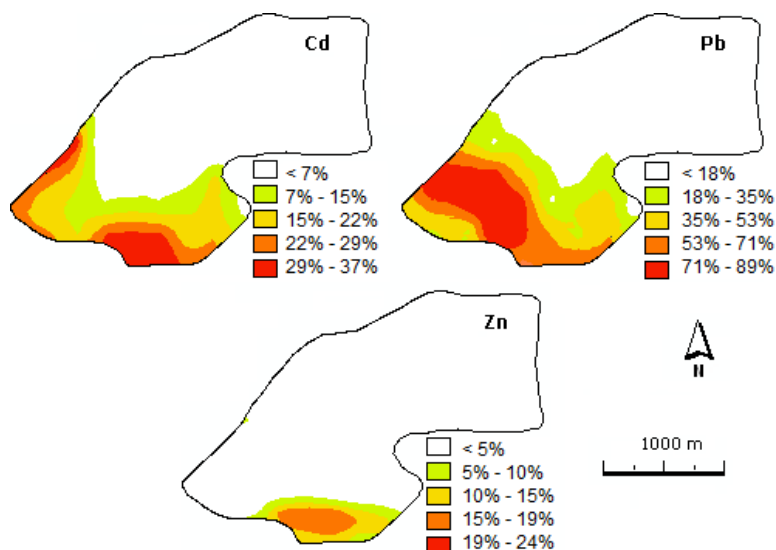
**Tabela 10.1. Statystyki opisowe zawartości metali ciężkich w glebie i wartości miar magnetometrycznych, dla powierzchni pomiarowej *Lasy Błędowskie***

**Table 10.1. Descriptive statistics of heavy metals concentration in soil and magnetometric measures, for area *Lasy Błędowskie***

	Minimum	Maksimum	Średnia	Mediana	Odchylenie standardowe
Kadm	0,3	8,0	1,6	1,1	1,5
Miedź	1,0	15,0	5,6	5,0	3,5
Nikiel [mg/kg]	1,0	9,0	3,1	1,5	2,6
Ołów	15,0	160,0	67,4	57,8	37,1
Cynk	9,0	352,0	107,4	76,0	82,4
$\kappa_{max}$	64,1	229,5	128,1	131,2	36,2
$\kappa_{3cm}$ [ $\cdot 10^{-5}$ SI]	0,0	160,3	67,2	60,5	39,7
$\kappa_{5cm}$	13,6	217,5	92,6	92,8	43,8
$A_\kappa$ [ $mm \cdot 10^{-5}$ SI]	22,0	157,9	78,8	77,1	28,1

W celu wyznaczenia obszaru, na którym została przekroczona zawartość, co najmniej jednego z metali ciężkich, wykonano rozkłady przestrzenne metodą krigingu wskaźnikowego.

Jako wartości progowe w metodzie kriginu wskaźnikowego, zostały wykorzystane dopuszczalne wartości zawartości poszczególnych metali ciężkich w glebie, wynoszące 4 mg/kg, 150 mg/kg, 100 mg/kg, 100 mg/kg i 300 mg/kg, odpowiednio dla Cd, Cu, Ni, Pb oraz Zn. Każdy z wyznaczonych rozkładów przestrzennych (rys. 10.1.) prezentował prawdopodobieństwo przekroczenia wartości progowej. Poniżej, przedstawiono rozkłady przestrzenne tylko Cd, Pb i Zn, gdyż w przypadku Cu i Ni na całym badanym obszarze nie zostały przekroczone wartości dopuszczalne.



**Rysunek 10.1. Rozkłady przestrzenne prawdopodobieństwa przekroczenia dopuszczalnej zawartości Cd, Pb i Zn w glebie, na powierzchni pomiarowej *Lasy Błędowskie***

**Figure 10.1. Spatial distributions of probability of exceeding allowable concentration of Cd, Pb and Zn in soil, at area *Lasy Błędowskie***

Następnie, wykonane rozkłady przestrzenne prawdopodobieństwa przekroczenia dopuszczalnej zawartości dla każdego z metali zostały wykorzystane do wyznaczenia obszaru potencjalnie zanieczyszczonego. Jako potencjalnie zanieczyszczony był traktowany obszar, na którym prawdopodobieństwo przekroczenia dopuszczalnej zawartości w glebie choćby jednego metalu ciężkiego było większe od 50%. Obszar, na którym zostały spełnione powyższe założenia (rys. 10.2.), był zlokalizowany głównie w południowo-zachodniej części badanej powierzchni *Lasy Błędowskie*.



Rysunek 10.2. Obszar potencjalnie zanieczyszczony, na którym prawdopodobieństwo przekroczenia dopuszczalnej zawartości, choćby jednego metalu ciężkiego było większe od 50%

Figure 10.2. Potentially contaminated area where the probability of exceeding the allowable concentration, of at least one heavy metal was greater than 50%

### 10.3 Określenie wartości progowych dla wybranych miar magnetometrycznych

Zgodnie z założeniami, wyznaczone miary magnetometryczne  $\kappa_{max}$ ,  $\kappa_{3cm}$ ,  $\kappa_{5cm}$  oraz  $A_k$ , miały zostać wykorzystane do określania obszaru potencjalnie zanieczyszczonego metalami ciężkimi, przy wykorzystaniu metody krigingu. Konieczne było określenie takich wartości progowych, dla każdej z miar  $\kappa_{max}$ ,  $\kappa_{3cm}$ ,  $\kappa_{5cm}$  oraz  $A_k$ , których przekroczenie świadczyłoby o potencjalnym zanieczyszczeniu metalami ciężkimi. W tym celu, dla każdej z czterech miar  $\kappa_{max}$ ,  $\kappa_{3cm}$ ,  $\kappa_{5cm}$  oraz  $A_k$ , zostały wykonane rozkłady przestrzenne metodą krigingu zwykłego. Następnie, z wykonanych rozkładów przestrzennych wybrano fragmenty obszaru, na których obserwowane wartości danej miary magnetometrycznej przekraczały wartość progową  $T_s$  (tab. 10.2.). Tak wybrany obszar był traktowany jako potencjalnie zanieczyszczony.

Tabela 10.2. Wartości progowe badanych miar magnetometrycznych

Table 10.2. Thresholds values of analyzed magnetometric measures

Miara magnetometryczna	Wartość progowa– $T_s$	Ilość wartości progowych
$\kappa_{max}$ [ $\cdot 10^{-5}$ SI]	105, 110, ..., 140	8, ( $s = 1, \dots, 8$ )
$\kappa_{3cm}$ [ $\cdot 10^{-5}$ SI]	65, 70, ..., 90	6, ( $s = 1, \dots, 6$ )
$\kappa_{5cm}$ [ $\cdot 10^{-5}$ SI]	85, 90, ..., 105	5, ( $s = 1, \dots, 5$ )
$A_k$ [mm $\cdot 10^{-5}$ SI]	70, 75, ..., 95	6, ( $s = 1, \dots, 6$ )

Tabela 10.3. Możliwe warianty szacowania potencjalnego zanieczyszczenia gleb na podstawie pomiarów magnetometrycznych

Table 10.3. Possible situations of the estimation of potential soil pollution using magnetometric measurements

Typ oszacowania	Pomiary chemiczne	Pomiary magnetometryczne
Prawidłowe oszacowanie	obszar zanieczyszczony	obszar zanieczyszczony
	obszar niezanieczyszczony	obszar niezanieczyszczony
Przeszacowanie	obszar niezanieczyszczony	obszar zanieczyszczony
Niedoszacowanie	obszar zanieczyszczony	obszar niezanieczyszczony

W kolejnym kroku, każdy z obszarów, który został wyznaczony na podstawie poszczególnych wartości progowych  $T_s$ , był porównywany z obszarem zanieczyszczonym, wyznaczonym na podstawie pomiarów chemicznych. Możliwe sytuacje, powstające podczas porównania obszarów, zostały zestawione w tabeli 10.3.

Przyjęto założenie, że największa precyzja w klasyfikacji obszaru, na podstawie pomiarów magnetometrycznych, była osiągnięta dla tej wartości progowej, dla której zostały spełnione następujące warunki:

- i. Cały obszar zanieczyszczony, który oszacowano na podstawie pomiarów zawartości metali ciężkich w glebie, został wykryty.
- ii. Powierzchnia obszaru, który mylnie zaklasyfikowano jako zanieczyszczony, chociaż nie zostały na nim przekroczone dopuszczalne zawartości metali ciężkich, jest jak najmniejsza.

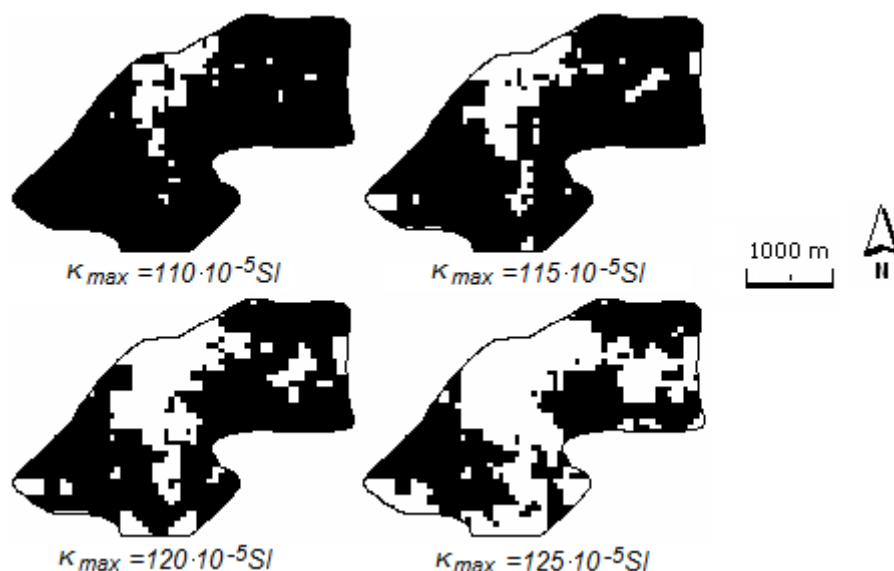
**Tabela 10.4. Wyniki porównania obszaru zanieczyszczonego, oszacowanego na podstawie różnych wartości progowych miar magnetometrycznych  $\kappa_{max}$ ,  $\kappa_{3cm}$ ,  $\kappa_{5cm}$  i  $A_k$ , z obszarem zanieczyszczonym oszacowanym na podstawie pomiarów chemicznych**

**Table 10.4. Results of the comparison of polluted area estimated using different threshold values of magnetometric measures  $\kappa_{max}$ ,  $\kappa_{3cm}$ ,  $\kappa_{5cm}$  and  $A_k$  with area estimated using chemical measurements**

		Wartość progowa							
$\kappa_{max}$	[ $\cdot 10^{-5}$ SI]	<b>105</b>	<b>110</b>	<b>115</b>	<b>120</b>	<b>125</b>	<b>130</b>	<b>135</b>	<b>140</b>
Dokładne oszacowanie	[%]	20,6	<u>24,7</u>	33,2	41,0	53,6	66,4	77,2	81,8
	[km <sup>2</sup> ]	1,5	<u>1,8</u>	2,4	3,0	3,9	4,8	5,6	5,9
Niedoszacowanie	[%]	0,0	<u>0,0</u>	0,5	1,8	3,2	5,1	7,0	9,1
	[km <sup>2</sup> ]	0,0	<u>0,0</u>	0,0	0,1	0,2	0,4	0,5	0,7
Przeszacowanie	[%]	79,4	<u>75,3</u>	66,4	57,2	43,2	28,5	15,8	9,1
	[km <sup>2</sup> ]	5,7	<u>5,4</u>	4,8	4,1	3,1	2,1	1,1	0,7
$\kappa_{3cm}$	[ $\cdot 10^{-5}$ SI]	<b>65</b>	<b>70</b>	<b>75</b>	<b>80</b>	<b>85</b>	<b>90</b>		
Dokładne oszacowanie	[%]	48,2	<u>52,3</u>	56,5	58,8	64,2	70,5		
	[km <sup>2</sup> ]	3,5	<u>3,8</u>	4,1	4,2	4,6	5,1		
Niedoszacowanie	[%]	0,0	<u>0,0</u>	0,1	1,8	3,4	4,6		
	[km <sup>2</sup> ]	0,0	<u>0,0</u>	0,0	0,1	0,2	0,3		
Przeszacowanie	[%]	51,8	<u>47,7</u>	43,4	39,4	32,5	24,9		
	[km <sup>2</sup> ]	3,7	<u>3,4</u>	3,1	2,8	2,3	1,8		
$\kappa_{5cm}$	[ $\cdot 10^{-5}$ SI]	<b>85</b>	<b>90</b>	<b>95</b>	<b>100</b>	<b>105</b>			
Dokładne oszacowanie	[%]	40,3	49,2	<u>61,6</u>	69,2	73,4			
	[km <sup>2</sup> ]	2,9	3,5	<u>4,4</u>	5,0	5,3			
Niedoszacowanie	[%]	0,0	0,0	<u>0,0</u>	2,5	4,9			
	[km <sup>2</sup> ]	0,0	0,0	<u>0,0</u>	0,2	0,4			
Przeszacowanie	[%]	59,7	50,8	<u>38,4</u>	28,3	21,7			
	[km <sup>2</sup> ]	4,3	3,7	<u>2,8</u>	2,0	1,6			
$A_k$	[mm $\cdot 10^{-5}$ SI]	<b>70</b>	<b>75</b>	<b>80</b>	<b>85</b>	<b>90</b>	<b>95</b>		
Dokładne oszacowanie	[%]	27,6	<u>71,8</u>	82,8	86,7	89,7	87,7		
	[km <sup>2</sup> ]	2,0	<u>5,2</u>	6,0	6,2	6,5	6,3		
Niedoszacowanie	[%]	0,0	<u>0,0</u>	0,8	2,5	4,2	7,4		
	[km <sup>2</sup> ]	0,0	<u>0,0</u>	0,1	0,2	0,3	0,5		
Przeszacowanie	[%]	99,3	<u>28,2</u>	16,4	10,8	6,1	4,8		
	[km <sup>2</sup> ]	7,2	<u>2,0</u>	1,2	0,8	0,4	0,3		



Oszacowanie obszaru potencjalnie zanieczyszczonego (tab. 10.4.), na podstawie maksymalnej podatności magnetycznej w profilu glebowym  $\kappa_{max}$ , było zauważalnie mniej precyzyjne w porównaniu z oszacowaniem obszarów na podstawie pozostałych miar  $\kappa_{3cm}$ ,  $\kappa_{5cm}$ , oraz  $A_{\kappa}$ . Dla wartości  $\kappa_{max} = 110 \cdot 10^{-5}$  SI, był wykryty cały obszar zanieczyszczony, który został oszacowany na podstawie pomiarów zawartości metali ciężkich w glebie. Jednocześnie, ponad 75% powierzchni badanego obszaru zostało mylnie zaklasyfikowane jako obszar zanieczyszczony. Dla większych wartości  $\kappa_{max}$ , wielkość obszaru, na którym nie zostały przekroczone dopuszczalne zawartości metali ciężkich, a który był mylnie klasyfikowany jako zanieczyszczony, malała. Dla wartości  $\kappa_{max} = 135 \cdot 10^{-5}$  SI, było to już tylko 15% powierzchni badanego obszaru. Jednakże, pojawiał się znaczny błąd niedoszacowania. Około 7% powierzchni badanego obszaru, na którym zostały przekroczone dopuszczalne zawartości metali ciężkich w glebie, pozostawało niewykryte.

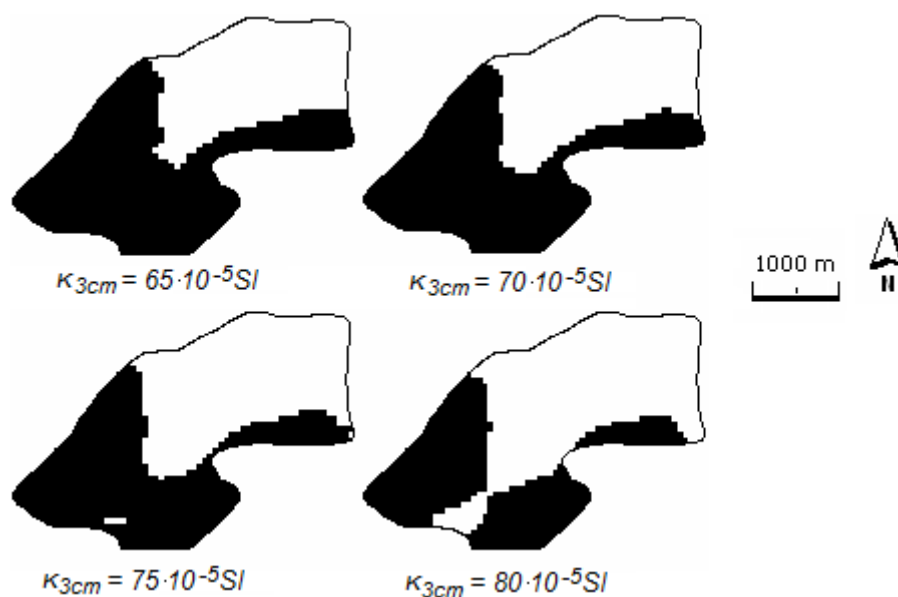


**Rysunek 10.3. Obszar potencjalnie zanieczyszczony wyznaczony metodą krigingu, przy użyciu wartości progowych maksymalnej podatności magnetycznej  $\kappa_{max}$  w profilu glebowym**

**Figure 10.3. Potentially polluted area calculated using kriging and threshold values of maximum magnetic susceptibility  $\kappa_{max}$  in soil profile**

Wykorzystanie podatności magnetycznej  $\kappa_{3cm}$  i  $\kappa_{5cm}$  pozwoliło na osiągnięcie lepszych oszacowań obszaru potencjalnie zanieczyszczonego, niż w przypadku użycia podatności maksymalnej w profilu glebowym. Najdokładniejsze szacunki były osiągnięte dla wartości progowych  $\kappa_{3cm} = 70 \cdot 10^{-5}$  SI oraz  $\kappa_{5cm} = 95 \cdot 10^{-5}$  SI. Wykrywano cały obszar, na którym zostały przekroczone dopuszczalne wartości metali ciężkich w glebie, natomiast obszar czysty, mylnie zaklasyfikowany jako zanieczyszczony, stanowił około 48% (3,40 km<sup>2</sup>) i 38% (2,77 km<sup>2</sup>) powierzchni badanego obszaru, odpowiednio dla  $\kappa_{3cm}$  i  $\kappa_{5cm}$ . Tak więc, powierzchnia, na której przeszacowane zostało zanieczyszczenie, była znacznie

mniejsza niż w przypadku szacunków wykonanych na podstawie wartości  $\kappa_{max}$ , kiedy to stanowiła ona 75% powierzchni badanego obszaru.

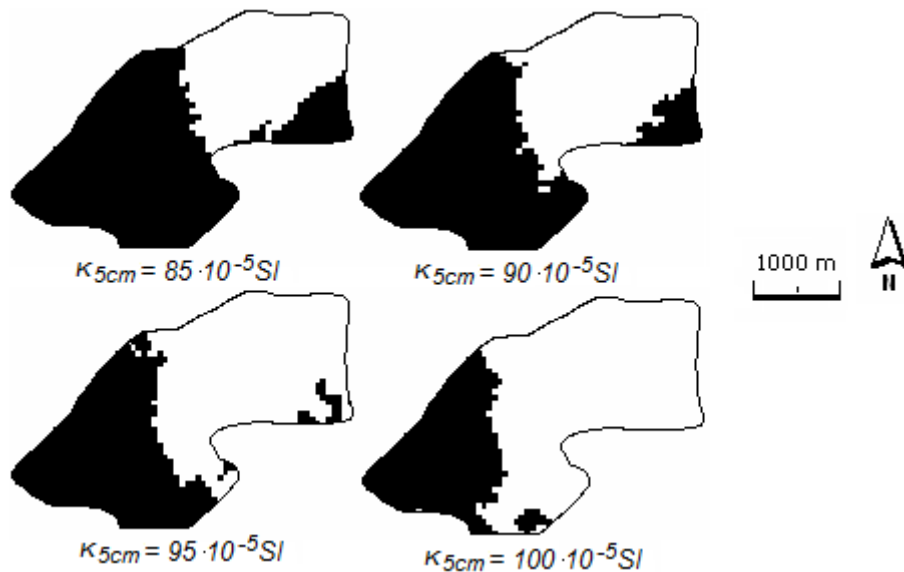


**Rysunek 10.4.** Obszar potencjalnie zanieczyszczony wyznaczony metodą krigingu, przy użyciu wybranych wartości progowych podatności magnetycznej  $\kappa_{3cm}$  na głębokości 3 cm w profilu glebowym

**Figure 10.4.** Potentially polluted area calculated using kriging and threshold values of magnetic susceptibility  $\kappa_{3cm}$  on the depth of 3 cm in soil profile

Podatność magnetyczna  $\kappa_{5cm}$ , mierzona na głębokości 5 cm, okazała się lepszym wskaźnikiem potencjalnego zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi, w porównaniu z podatnością magnetyczną  $\kappa_{3cm}$ , mierzoną na głębokości 3 cm. Powierzchnia obszaru, który został prawidłowo zaklasyfikowany przy użyciu  $\kappa_{5cm}$ , była około 10% większa niż w przypadku wykorzystania  $\kappa_{3cm}$  (tab. 10.4.). Jednakże, dla wartości  $\kappa_{3cm}$  równej  $75 \cdot 10^{-5}$  SI, różnice te wynosiły już tylko 5%. Jednocześnie, 0,1% powierzchni badanego obszaru, który był zanieczyszczony, pozostała niewykryta.

Obserwowane różnice w efektywności pomiędzy szacunkami, wykonanymi na podstawie wartości  $\kappa_{3cm}$  oraz  $\kappa_{5cm}$ , mogą być tłumaczone silną zależnością tych wskaźników od rozwoju profilu glebowego oraz miąższości poziomu organicznego gleby. Lepsza precyzja osiągnięta w przypadku  $\kappa_{5cm}$  może być tłumaczona większym prawdopodobieństwem, że podpoziomy glebowe Of lub Oh, w których w największym stopniu zakumulowane są metale ciężkie, będą występować na głębokości 5 cm niż na głębokości 3 cm. Na głębokości 3 cm, w większości punktów pomiarowych występował tylko podzespół O1, w którym w małym stopniu akumulowane są zanieczyszczenia pochodzenia antropogenicznego. W związku z tym, wartości podatności magnetycznej  $\kappa_{3cm}$  nie odzwierciedlały dobrze zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi.

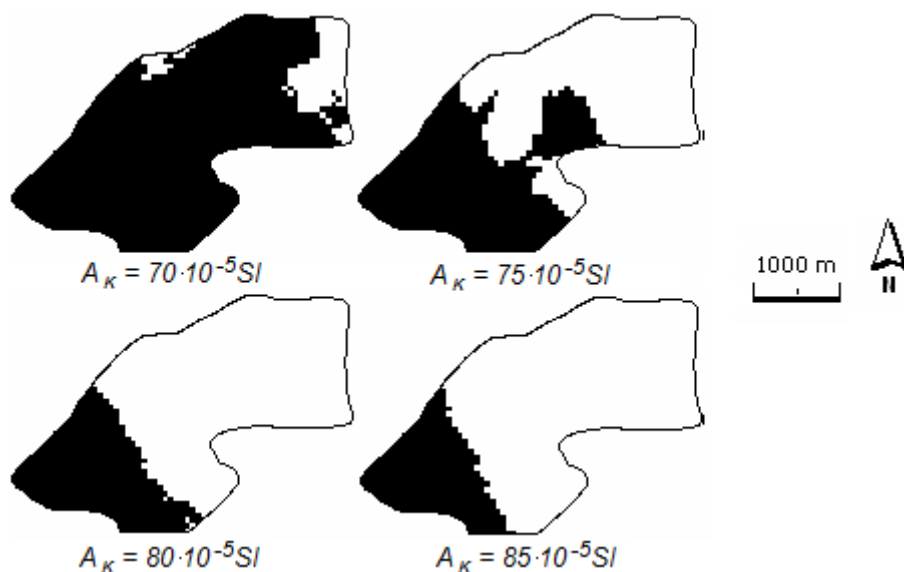


**Rysunek 10.5.** Obszar potencjalnie zanieczyszczony wyznaczony metodą krzygu, przy użyciu wybranych wartości progowych podatności magnetycznej  $\kappa_{5cm}$  na głębokości 5 cm w profilu glebowym

**Figure 10.5.** Potentially polluted area calculated using kriging and threshold values of magnetic susceptibility  $\kappa_{5cm}$  on the depth of 5 cm in soil profile

Wykorzystanie jako miary magnetometrycznej pola powierzchni  $A_\kappa$  pod krzywą podatności magnetycznej pozwoliło na najdokładniejsze oszacowanie obszaru potencjalnie zanieczyszczonego. Przy wartości  $A_\kappa$  równej  $75 \text{ mm} \cdot 10^{-5} \text{ SI}$ , był wykrywany cały obszar zanieczyszczony i jedynie około 28,2% powierzchni całego badanego obszaru zostało mylnie zaklasyfikowane jako obszar zanieczyszczony, pomimo że zawartość metali ciężkich nie przekraczała wartości dopuszczalnych. W przypadku, gdy obszar potencjalnie zanieczyszczony był szacowany na podstawie wartości  $A_\kappa$ , równej  $80 \text{ mm} \cdot 10^{-5} \text{ SI}$ , dokładność szacowania wzrosła zauważalnie. Tylko około 16% powierzchni całego badanego obszaru, było mylnie klasyfikowane jako obszar zanieczyszczony. Jednakże, nie zostało wykryte około 0,8% zanieczyszczonego obszaru, na którym przekroczone zostały dopuszczalne zawartości metali ciężkich w glebie.

Pole powierzchni pod krzywą  $A_\kappa$  posiadało także bardzo istotną zaletę, w stosunku do pozostałych miar  $\kappa_{max}$ ,  $\kappa_{3cm}$  i  $\kappa_{5cm}$ . Wartości  $A_\kappa$  odzwierciedlały bowiem podatność magnetyczną ze wszystkich poziomów glebowych, w których obserwowano podwyższone wartości podatności magnetycznej i zarazem były zakumulowane metale ciężkie. W przypadku wartości  $\kappa_{max}$ ,  $\kappa_{3cm}$  i  $\kappa_{5cm}$  była to jedynie wartość podatności magnetycznej na określonej głębokości, silnie zależna od budowy profilu glebowego w miejscu wykonywania pomiaru.



**Rysunek 10.6.** Obszar potencjalnie zanieczyszczony wyznaczony metodą krigingu, przy użyciu wybranych wartości progowych pola powierzchni pod krzywą podatności magnetycznej  $A_k$  w profilu glebowym

**Figure 10.6.** Potentially polluted area calculated using kriging and threshold values of area  $A_k$  under the curve of magnetic susceptibility against the depth in soil profile

W przypadku zastosowania każdej z miar,  $\kappa_{max}$ ,  $\kappa_{3cm}$ ,  $\kappa_{5cm}$  oraz  $A_k$ , część badanego obszaru, na którym nie zostały przekroczone dopuszczalne zawartości metali ciężkich w glebie, była mylnie klasyfikowana jako zanieczyszczona. Niemniej, na tych częściach obszaru były obserwowane wysokie zawartości metali ciężkich w glebie, a prawdopodobieństwo przekroczenia maksymalnej dopuszczalnej zawartości było wysokie (rys. 10.1.), sięgające 37%, 24% i 50%, odpowiednio dla Cd, Zn i Pb. Powyższe obserwacje dotyczyły w największym stopniu obszaru zanieczyszczonego szacowanego na podstawie wartości  $A_k$  (rys. 10.6.) oraz w mniejszym stopniu obszarów szacowanych na podstawie wartości  $\kappa_{3cm}$  i  $\kappa_{5cm}$  (rys. 10.4. i 10.5.).

#### 10.4 Weryfikacja wyników

Wyniki otrzymane z pomiarów wykonanych na powierzchni *Lasy Błędowskie* zostały zweryfikowane na podstawie pomiarów wykonanych na powierzchni pomiarowej *Szczejkowice*. W tym celu, na powierzchni pomiarowej *Szczejkowice* oszacowano obszar potencjalnie zanieczyszczony, wykorzystując, określone w poprzedniej części pracy miary magnetometryczne  $\kappa_{max}$ ,  $\kappa_{3cm}$ ,  $\kappa_{5cm}$  oraz  $A_k$  i ich wartości progowe. Wykorzystano te wartości progowe, dla których była osiągnięta największa precyzja szacowania obszaru potencjalnie zanieczyszczonego. Wartości te wynosiły:

- i.  $\kappa_{max} = 95 \cdot 10^{-5} \text{ SI}$ ,

- ii.  $\kappa_{3cm} = 70 \cdot 10^{-5}$  SI,
- iii.  $\kappa_{5cm} = 110 \cdot 10^{-5}$  SI,
- iv.  $A_{\kappa} = 80 \cdot 10^{-5}$  mm·SI.

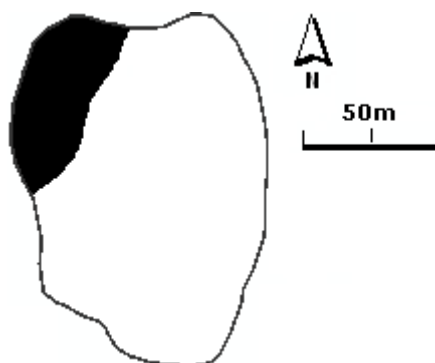
Obszar potencjalnie zanieczyszczony był szacowany przy wykorzystaniu metody IDW. Było to konieczne ze względu na niezbyt liczny zbiór danych pomiarowych, co powodowało, że nie było możliwe wykorzystanie metody kriginu. Obszar zanieczyszczony, oszacowany na podstawie miar magnetometrycznych, został potem zweryfikowany przy wykorzystaniu pomiarów zawartości metali ciężkich w glebie.

**Tabela 10.5. Statystyki opisowe zawartości metali ciężkich w glebie i wartości miar magnetometrycznych dla powierzchni pomiarowej *Szczejkowice***

**Table 10.5. Descriptive statistics of concentration of heavy metals in soil and magnetometric measures, for area *Szczejkowice***

	Minimum	Maksimum	Średnia	Mediana	Odchylenie standardowe
Kadm	0,0	0,4	0,1	0,0	0,1
Miedź	2,6	14,8	8,4	7,6	3,5
Nikiel [mg/kg]	0,2	4,0	1,7	1,7	1,0
Ołów	17,0	154,0	73,0	70,0	36,9
Cynk	4,0	58,0	18,8	13,8	14,6
$\kappa_{max}$	23,1	111,5	83,0	85,1	22,5
$\kappa_{3cm}$ [ $\cdot 10^{-5}$ SI]	18,3	106,1	50,5	52,0	27,0
$\kappa_{5cm}$	9,4	110,2	66,5	69,9	28,2
$A_{\kappa}$ [ $mm \cdot 10^{-5}$ SI]	14,5	88,7	52,9	52,1	19,1

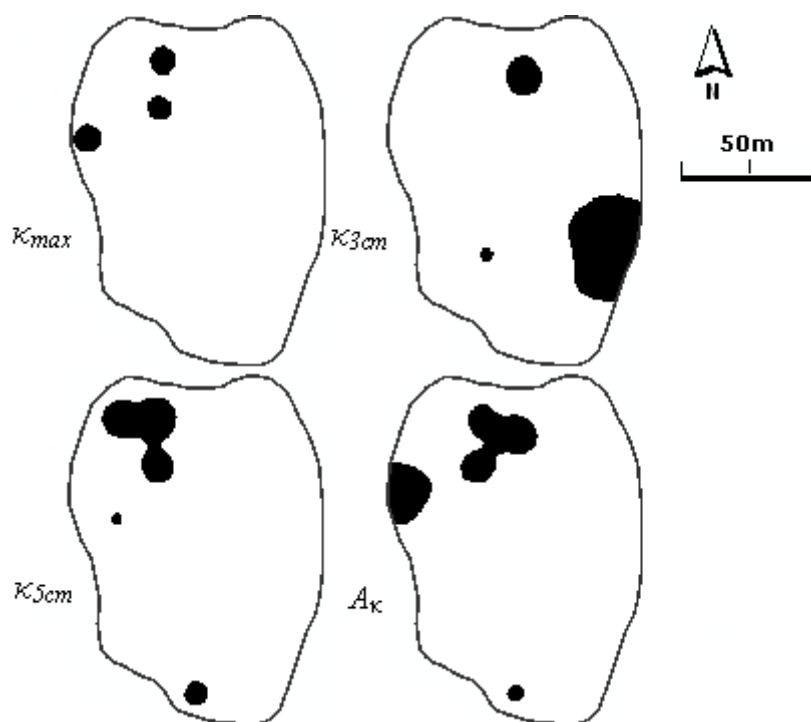
Na badanym obszarze została przekroczona tylko dopuszczalna zawartość ołowiu w glebie (tab. 10.5). Zawartość pozostałych metali ciężkich w glebie była niska i nie przekraczała wartości dopuszczalnych. Maksymalna zawartość takich metali ciężkich, jak Cd, Cu, Ni i Zn osiągała zaledwie, odpowiednio 10%, 10%, 4% i 25% maksymalnej dopuszczalnej wartości określanej przez normy dotyczące jakości gleb.



**Rysunek 10.7. Obszar potencjalnie zanieczyszczony wyznaczony metodą IDW na podstawie pomiarów zawartości metali ciężkich w glebie, dla powierzchni pomiarowej *Szczejkowice***

**Figure 10.7. Potentially polluted area calculated using IDW method and measurements of concentration of heavy metals in soil, for area *Szczejkowice***

Obszar potencjalnie zanieczyszczony, oszacowany na podstawie miar  $\kappa_{max}$ ,  $\kappa_{3cm}$ , i  $A_{\kappa}$ , występował głównie w północno-zachodniej części powierzchni pomiarowej, co wykazywało dużą zgodność z rozkładem wyznaczonym na podstawie pomiarów chemicznych (rys. 10.7. i 10.8.). Obszar potencjalnie zanieczyszczony, szacowany na podstawie podatności magnetycznej  $\kappa_{3cm}$ , nie pokrywał się zupełnie z rzeczywistym zanieczyszczeniem gleby, zbadanym na podstawie pomiarów chemicznych. Obserwacje takie mogą być tłumaczone dużą miąższością poziomu organicznego ściółki na badanej powierzchni *Szczekowice*. Miąższość tego poziomu dochodziła miejscami nawet do 8 cm, a maksymalne wartości miąższości były obserwowane w części północno-zachodniej badanego obszaru. Z tego względu, podatność magnetyczna, mierzona na głębokości 3 cm, nie była związana z rzeczywistym zanieczyszczeniem antropogenicznym, gdyż na tej głębokości nie występowały poziomy glebowe, w których w największym stopniu są akumulowane metale ciężkie.



**Rysunek 10.8.** Obszar potencjalnie zanieczyszczony wyznaczony metodą IDW przy użyciu wartości: maksymalnej podatności magnetycznej  $\kappa_{max} = 95 \cdot 10^{-5}$  SI, podatności magnetycznej na głębokości 3 cm i 5 cm  $\kappa_{3cm} = 70 \cdot 10^{-5}$  SI i  $\kappa_{5cm} = 110 \cdot 10^{-5}$  SI, pola powierzchni pod krzywą podatności magnetycznej w profilu glebowym  $A_{\kappa} = 80 \cdot 10^{-5}$  mm·SI

**Figure 10.8.** Potentially polluted area calculated using IDW method and values of: maximum magnetic susceptibility  $\kappa_{max} = 95 \cdot 10^{-5}$  SI, magnetic susceptibility at depths of 3 cm  $\kappa_{3cm} = 70 \cdot 10^{-5}$  SI and  $\kappa_{5cm} = 110 \cdot 10^{-5}$  SI, area under the curve of magnetic susceptibility in soil profile  $A_{\kappa} = 80 \cdot 10^{-5}$  mm·SI

## 10.5 Podsumowanie

Rezultaty badań pokazały, że jest możliwe efektywne szacowanie obszarów potencjalnie zanieczyszczonych poprzez wykorzystanie metod geostatystycznych i odpowiednio dobranych wartości progowych miar magnetometrycznych  $K_{max}$ ,  $K_{3cm}$ ,  $K_{5cm}$  oraz  $A_K$ . Podczas takich szacunków jest nieuchronne występowanie błędów przeszacowania, polegających na mylnym klasyfikowaniu obszarów, na których nie zostały przekroczone wartości dopuszczalne zawartości metali ciężkich w glebie, jako obszary zanieczyszczone. Niemniej jednak, w większości przypadków na obszarach, na których zostało przeszacowane zanieczyszczenie gleb, były obserwowane podwyższone zawartości metali ciężkich w glebie. Istotne jest także, że jednocześnie odpowiednio dobrane wartości miar magnetometrycznych pozwalają na niemal całkowite wyeliminowanie błędów niedoszacowania potencjalnego zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi. W przypadku metody magnetometrii terenowej, która ma służyć do wstępnego rozpoznania badanego obszaru, sytuacja taka jest korzystniejsza niż dopuszczenie możliwości wystąpienia błędu niedoszacowania zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi.

## 11 Podsumowanie wyników pracy i wnioski końcowe

### 11.1 Podsumowanie i wnioski

Jak pokazały wyniki badań, osiągnięcie poszczególnych celów badawczych byłoby bardzo utrudnione lub też niemożliwe bez wykorzystania metod geostatystycznych. W wielu przypadkach było konieczne zbadanie korelacji przestrzennych charakteryzujących podatność magnetyczną i zawartość metali ciężkich w glebie lub wykorzystanie zaawansowanych, przestrzennych technik integracji danych. Są to zagadnienia wykraczające znacznie poza zakres klasycznych metod statystycznych.

W ramach postawionego celu badawczego, została oceniona zmienność przestrzenna podatności magnetycznej, w zależności od wielu czynników, takich jak rodzaj podłoża glebowego, typ drzewostanu oraz sposób wykorzystania terenu. Wyniki badań pozwoliły na lepsze poznanie charakteru zmienności przestrzennej podatności magnetycznej. Zostały też określone zostały też charakterystyczne zasięgi korelacji przestrzennych podatności magnetycznej. Na ich podstawie ustalono odległości pomiędzy punktami pomiarowymi podatności magnetycznej, które są wystarczające do wyznaczenia rozkładów przestrzennych, przy jednoczesnym ograniczeniu liczby wykonywanych pomiarów. Zostało to zweryfikowane na przykładzie wybranych powierzchni pomiarowych. Rezultaty tych badań mogą zostać wykorzystane do planowania przyszłych pomiarów podatności magnetycznej na obszarze Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego. Wyniki te stanowiły też konieczną podstawę do osiągnięcia pozostałych celów badawczych.

Podczas badań przeanalizowano także szereg czynników pomiarowych, które mogą być istotne podczas integracji danych magnetometrycznych oraz chemicznych. Czynniki takie, jak grubość poziomu organicznego gleby lub występowanie dolomitów kruszonośnych, mogą w znacznym stopniu wpływać na korelacje przestrzenne podatności magnetycznej i jednocześnie utrudniać wnioskowanie na temat potencjalnego zanieczyszczenia gleb. Jak pokazały wyniki badań, możliwe jest takie opracowanie danych i wykonanie rozkładów przestrzennych, które pozwoli na zminimalizowanie niekorzystnego wpływu czynników pomiarowych.

Rezultaty badań pozwoliły na określenie sposobów integracji danych w metodzie magnetometrycznej. Wykorzystanie metod geostatystycznych umożliwiło integrację pomiarów wykonywanych na powierzchni gleby i tych wykonywanych w profilu glebowym. Trójwymiarowe rozkłady przestrzenne mogą być bardzo pomocne w odróżnieniu obszarów,



gdzie podwyższone wartości podatności magnetycznej są rezultatem zanieczyszczenia antropogenicznego od tych, na których są rezultatem naturalnych właściwości gleb. Dotychczas wnioski tego typu były wyciągane praktycznie tylko na podstawie analiz rozkładów podatności magnetycznej w pobranych profilach glebowych.

Stosując metody geostatystyczne, można wnioskować wykorzystując nie tylko wybrane pomiary punktowe, a rozkłady przestrzenne estymowane dla całego badanego obszaru. Ponadto, w niektórych przypadkach może być istotne, że trójwymiarowe rozkłady przestrzenne są wykonywane metodą krigingu, a nie kokrigingu. Pozwala to na pominięcie modelowania wariogramów krzyżowych. Może to być istotne na przykład dla oceny zanieczyszczenia na terenach, gdzie krzyżowe korelacje przestrzenne pomiędzy podatnością magnetyczną mierzoną na powierzchni gleby a miarami wyznaczanymi na podstawie pomiarów w profilu glebowym są trudne do wyznaczenia.

Jak pokazały wyniki badań, jest możliwa także integracja danych magnetometrycznych w przestrzeni dwuwymiarowej. W tym przypadku, konieczne było wyznaczenie, na podstawie pomiarów wykonywanych w profilu glebowym, takich miar, które całościowo charakteryzują te pomiary i pozwalają na ich efektywną integrację z pomiarami wykonywanymi na powierzchni gleby. Podczas badań, zostało określonych kilka miar, wyznaczanych na podstawie pomiarów w profilu glebowym, z czego najbardziej efektywna okazała się powierzchnia pod krzywą podatności w profilu glebowym. Wyniki prac dostępnych, do tej pory, sugerowały już, że powierzchnia pod krzywą podatności w profilu glebowym jest dobrym wskaźnikiem potencjalnego zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi. Niemniej, powierzchnia pod krzywą podatności w profilu glebowym nie była do tej pory wykorzystywana do geostatystycznej integracji danych. Wyniki pokazały także, że jest możliwe wykonanie integracji z użyciem innych miar, takich jak podatność magnetyczna na wybranej głębokości lub maksymalna podatność w profilu glebowym. Jednak w tym przypadku, mogą wystąpić pewne trudności w analizowaniu wykonanych rozkładów przestrzennych, utrudniające szacowanie potencjalnego zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi.

Zbadano także możliwość integracji danych magnetometrycznych z chemicznymi. Jest to istotne, ponieważ metoda magnetometryczna jest wykorzystywana do szybkiej wstępnej oceny badanego obszaru, która później musi zostać zweryfikowana pomiarami chemicznymi. Wyniki przeprowadzonych badań pokazują, że jest możliwe wykonanie integracji pomiarów podatności magnetycznej i zawartości metali ciężkich, a rozkłady przestrzenne wyznaczone na podstawie pomiarów zintegrowanych charakteryzują się większą

precyzją niż te wyznaczone tylko na podstawie pomiarów chemicznych. W przypadku obszarów, na których została wykonana wystarczająca liczba pomiarów chemicznych możliwe jest wykorzystanie metod kokrigingu. Gdy jest dostępna mała liczba pomiarów, konieczne jest zastosowanie innych metod integracji danych.

Wyniki badań pozwoliły na określenie wartości progowych dla miar wyznaczanych na podstawie pomiarów w profilu glebowym, których wykorzystanie umożliwia szacowanie rozkładów przestrzennych potencjalnego zanieczyszczenia, geostatystycznymi metodami wskaźnikowymi. Wyniki badań pokazały, że jest możliwe oszacowanie obszaru potencjalnie zanieczyszczonego. Wykrywa się cały obszar, na którym zostały przekroczone dopuszczalne zawartości metali ciężkich w glebie. Natomiast powierzchnia obszaru, na którym nie zostały przekroczone dopuszczalne zawartości metali ciężkich, a jest klasyfikowany mylnie jako zanieczyszczony, wynosi do 20% powierzchni badanego obszaru. Jest istotne, że na obszarze, na którym nastąpiło przeszacowanie zanieczyszczenia, zawartość metali ciężkich może być bardzo wysoka, aczkolwiek nieprzekraczająca wartości normowanych.

Podsumowując, można stwierdzić, że rezultaty badań i wynikające z nich wnioski szczegółowe, zaprezentowane powyżej, w pełni dowodzą słuszności tezy niniejszej pracy.

## **11.2 Możliwości dalszych badań**

Zgodnie z tematem pracy, badania dotyczyły głównie możliwości usprawnienia magnetometrii terenowej przy wykorzystaniu metod geostatystycznych. Samo zagadnienie magnetometrii terenowej jest na tyle złożone i skomplikowane, że nie było możliwe w pełni szczegółowe zbadanie każdego elementu składowego tej metody. Dodatkowo, magnetometria terenowa należy do klasy technik pomiarowych, które oprócz tego, że są szybkie i tanie, są wrażliwe na szereg czynników pomiarowych. Tak więc, wysoka zmienność różnych czynników, związanych ze środowiskiem glebowym i warunkami łączącymi się z zanieczyszczeniem antropogenicznym dodatkowo może utrudniać wnioskowanie na temat potencjalnego zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi.

Powierzchnie pomiarowe były położone w obrębie Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego. W związku z tym, na badanych powierzchniach mogły panować specyficzne dla tego rejonu warunki glebowe oraz te związane z presją antropogeniczną, opadem i składem pyłów oraz dominującym wpływem pewnego rodzaju przemysłu. Jest możliwe, że w przypadku terenów o bardzo odmiennym charakterze od terenów GOP, podatność magnetyczną mogą cechować nieco inne korelacje przestrzenne lub też zależności wiążące

podatność magnetyczną z zanieczyszczeniem gleb metalami ciężkimi. W takim przypadku, może być konieczne wprowadzenie pewnych modyfikacji do wypracowanych metod i wniosków. Jest możliwe wykonanie w tym celu szeregu, podobnych do przeprowadzonych w tej pracy, badań na terenach o innej niż GOP charakterystyce.

Podobne badania mogą być wykonane z wykorzystaniem innego sprzętu pomiarowego. W pracy do pomiarów podatności magnetycznej użyto urządzeń pomiarowych Bartington oraz SM-400. Wyciągnięte na podstawie przeprowadzonych badań wnioski będą jak najbardziej stosowalne w przypadku wykorzystania innych urządzeń do pomiaru podatności magnetycznej. Jest jednak możliwe, że będzie konieczne wprowadzenie pewnych modyfikacji, wynikających ze specyfiki urządzeń pomiarowych, zwłaszcza zasięgu penetracji w profilu glebowym. W przypadku miernika MS2D Bartington, zasięg ten wynosił 10 cm, co było uwzględniane w przeprowadzanych analizach. Inny, zwłaszcza znacznie różny, zasięg penetracji może obejmować większą lub mniejszą część przekroju glebowego. Może to być istotne na przykład w integracji pomiarów, wykonywanych na powierzchni gleby i w profilu glebowym.

Na koniec należy dodać, że niewątpliwie konieczny jest dalszy rozwój magnetometrii terenowej i poprawa jej dokładności, tak aby w jak największym stopniu ograniczyć liczbę koniecznych do wykonania weryfikacyjnych pomiarów chemicznych. Wiąże się to zarówno z rozwojem samej metody pomiarowej i oprzyrządowania pomiarowego. Oprócz tego możliwy jest także rozwój oprogramowania geostatystycznego, tak aby umożliwiała wstępne wnioskowanie na temat mierzonych wartości podatności magnetycznej bezpośrednio w terenie. Pozwoliło by to na szybką analizę zmienności przestrzennej, wybranych parametrów rozkładów podatności magnetycznej w profilu glebowym i przyczyniło się tym samym to zwiększenia efektywności metody magnetometrycznej. Możliwe było by dokładniejsze planowanie kolejnych punktów pomiarowych oraz ich liczności, w celu osiągnięcia zakładanych celów monitoringu gleb.

## Bibliografia

- [1] Abbaspour K.C., Schulin R., van Genuchten M.Th., Schlappi E., 1998. *An Alternative to Cokriging for Situations with Small Sample Sizes*. *Mathematical Geology*, 30(3), 761-765.
- [2] Allard D., 1998. *Geostatistical Classification and Class Kriging*. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 2(2), 77-90.
- [3] Aunon J., Gomez-Hernandez J.J., 2000. Dual Kriging with Local Neighborhoods: Application to the Representation of Surfaces. *Mathematical Geology*, 32(1), 69-85.
- [4] Benson C.H., Rashad S.M. *Enhanced Subsurface Characterization for Prediction of Contaminant Transport Using Co-kriging*. *Geostatistics for Environmental and Geotechnical Applications*, ASTM STP 1283 (Ed.) Srivastava R.M., Rouhani S., Cromer M.V., Johnson A.I., Desbarats J.A., American Society for Testing and Materials, 1996.
- [5] Boyko T., Scholger R. and Stanjek H., 2004. Topsoil Magnetic Susceptibility Mapping as a Tool for Pollution Monitoring: Repeatability of in Situ Measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 55, 249-259.
- [6] Caeiro S., Goovaerts P., Painho M., Costa H., Sousa S. *Optimal Spatial Sampling Design for Mapping Estuarine Sediment Management Areas*. 5th AGILE Conference on Geographic Information Science, Palma (Balearic Islands, Spain), April 25th-27th, 2002.
- [7] Cattle J.A., McBratney A.B., Minasny B., 2002. *Kriging Method Evaluation for Assessing the Spatial Distribution of Urban Soil Lead Contamination*. *Journal of Environmental Quality*, 31, 1576–1588.
- [8] Chappell A., McTainsh G., Strong C. *Simulations to Optimise Sampling of Aeolian Sediment Transport in Space and Time for Mapping*. *Proceeding of ICAR5/GCTE-SEN Joint Conference*, International Center for Arid Semiarid Lands Studies, Texas Tech University, Lubbock, Texas, USA, 2002.
- [9] Chianese D., D'Emilio M., Bavusi M., Lapenna V. and Macchiato M., 2005. Magnetic and Ground Radar Measurements for Soil Pollution Mapping in the Industrial Area of Val Basento (Basilicata Region, Southern Italy): A Case Study. *Environmental Geology*, 49, 389-404.
- [10] Clark I., *The Art of Cross Validation in Geostatistical Applications*. 19th Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, (Ed.) R.V. Ramani. Sponsored by The Pennsylvania State University, Colorado, April 14-16, 1986.
- [11] Colin P., Froidevaux R., Garcia M. Nicoletis S. *Integrating Geophysical Data for Mapping the Contamination of Industrial Sites by Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: A Geostatistical Approach*. *Geostatistics for Environmental and Geotechnical Applications*, ASTM STP 1283 (Ed.) Srivastava R.M., Rouhani S., Cromer M.V., Johnson A.I., Desbarats J.A., American Society for Testing and Materials, 1996.
- [12] Cressie N., 1986. *Kriging Non-stationarity Data*. *Journal of American Statistical Association*, 81(2), 625-634.
- [13] Culbard E.B., Thornton I., Watt J., Wheatley M., Moorcroft S., Thompson M., 1988. *Metal Contamination in British Urban Dusts and Soils*. *Journal of Environmental Quality*, 17, 26-34.

- [14] David M. *Geostatistical Ore Reserve Estimation*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1977.
- [15] De Iaco S., Myers D.E., Posa D., 2003. *The Linear Coregionalization Model and the Product–Sum Space–Time Variogram*. *Mathematical Geology*, 35(1), 25-38.
- [16] Dearing J.A. *Environmental Magnetic Susceptibility: Using The Bartington MS2 System*, Chi Publishing, Kenilworth, UK, 1994.
- [17] Dearing J.A., Dann R.J.L., Hay K., Lees J.A., Loveland P.J., Maher B.A., O'Grady K., 1996. *Frequency-Dependent Susceptibility Measurements of Environmental Materials*. *Geophysical Journal International*, 124, 228-240.
- [18] D'Emilio M., Chianese D., Coppola R., Macchiato M., Ragosta M., 2007. Magnetic Susceptibility Measurements as Proxy Method to Monitor Soil Pollution: Development of Experimental Protocols for Field Surveys. *Environmental Monitoring and Assessment*, 125, 137–146.
- [19] Desbarat A.J. *Modeling Spatial Variability Using Geostatistical Simulation*. *Geostatistics for Environmental and Geotechnical Applications*, ASTM STP 1283 (Ed.) Srivastava R.M., Rouhani S., Cromer M.V., Johnson A.I., Desbarats J.A., American Society for Testing and Materials, 1996.
- [20] Desenfant F., Petrovsky E. and Rochette P., 2004. Magnetic Signature of Industrial Pollution of Stream Sediments and Correlation with Heavy Metals: Case Study from South France. *Water Air and Soil Pollution*, 152, 297-312.
- [21] Deutsch C.V., Journel A.G. *GSLIB Geostatistical Software Library And Users Guide*, Oxford University Press, UK, 1992.
- [22] Doyle J.L., Hopkins T.L., Betzer P.R., 1976. *Black Magnetic Spherule Fallout in the Eastern Gulf of Mexico*. *Science*, 194, 1157-1159.
- [23] Dulaney W.P., Lengnick L.L., Hart F.G. *Use of Geostatistical Techniques in the Design of An Agricultural Field Experiment*. *Proceedings of the Survey Research Methods Section, American Statistical Association*, 1994.
- [24] EEA, European Environment Agency. *Proposal for European Soil Monitoring and Assessment Framework*. Technical report No.61, Copenhagen, 2001.
- [25] Emery X., 2003. *Disjunctive Kriging With Hard and Imprecise Data*. *Mathematical Geology*, 35(6), 699-718.
- [26] Ferdyn M. i Strzyszczyk Z., 2002. Zawartość Metali Ciężkich w Wierzchniej Warstwie Gruntu i Roślinności Składowiska Żużla Hutniczego ZGH "Orzeł Biały" w Piekarach Śląskich. *Archiwum Ochrony Środowiska*, 28(3), 121-131.
- [27] Fialová H., Maier G., Petrovský E., Kapička A., Boyko T., Scholger R. and MAGPROX Team, 2006. *Magnetic Properties of Soils from Sites with Different Geological and Environmental Settings*. *Journal of Applied Geophysics*, 59(4), 273-283.
- [28] Flanders P., 1994. Collection, Measurement, and Analysis of Airborne Magnetic Particulates from Pollution in the Environment. *Journal of Applied Physics*, 75, 5931–5936.

- [29] Gattacceca J., Eisenlohr P., Rochette P., 2004. *Calibration of in Situ Magnetic Susceptibility Measurements*. Geophysical Journal International, 158, 42-49.
- [30] Georgeaud V.M., Rochette P., Ambrosi J.P., Vandamme D. and Williamson D., 1997. *Relationship Between Heavy Metals and Magnetic Properties in a Large Polluted Catchment: The Etang de Berre (South of France)*. Physics and Chemistry of the Earth, 22, 211-214.
- [31] Goovaerts P. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, Oxford University Press, New York, 1997.
- [32] Goovaerts P., 1998. *Ordinary Cokriging Revisited*. Mathematical Geology, 30(1), 21-42.
- [33] Goovaerts P., 1999. Geostatistics in Soil Science: State-of-the-art and Perspectives. Geoderma, 89, 1-45.
- [34] Goovaerts P., 2000. Estimation or Simulation of Soil Properties? An Optimisation Problem with Conflicting Criteria. Geoderma, 97(3-4), 165-186.
- [35] Goovaerts P., 2001. Geostatistical Modelling of Uncertainty in Soil Science. Geoderma, 103, 3-26.
- [36] Gringarten E., Clayton V., 2000. *Deutsch Teacher's Aide Variogram Interpretation and Modeling*. Mathematical Geology, 33(4), 507-534
- [37] Han S., Schneider S.M., Evans R.G., 2003. *Evaluating Cokriging for Improving Soil Nutrient Sampling Efficiency*. Transactions of ASAE, 46(3), 845-849.
- [38] Hanesch M. and Scholger R., 2002. Mapping of Heavy Metal Loadings in Soils by Means of Magnetic Susceptibility Measurements. Environmental Geology, 42, 857-870.
- [39] Hanesch M., Scholger R., 2005. The Influence of Soil Type on the Magnetic Susceptibility Measured throughout Soil Profiles. Geophysical Journal International, 161, pp. 50-56.
- [40] Hanesch M., Scholger R., Rey D., 2003. Mapping Dust Distribution around an Industrial Site by Measuring Magnetic Parameters of Tree Leaves. Atmospheric Environment, 37, 5125-5133.
- [41] Heller F., Strzyszczyk Z. and Magiera T., 1998. *Magnetic Record of Industrial Pollution in Forest Soils of Upper Silesia, Poland*. Journal of Geophysical Research, 103, 17 767-17 774.
- [42] Hengl T., Rossiter D.G., Stein A., 2003. *Soil Sampling Strategies for Spatial Predictions by Correlation with Auxiliary Maps*. Australian Journal of Soil Research, 41, 1403-1422.
- [43] Hoffmann V., Knab M., Appel E., 1999. *Magnetic Susceptibility Mapping of Roadside Pollution*. Journal of Geochemical Exploration, 66, 313-326.
- [44] Hulett L. D., Weinberger A. J., Northcutt K. J., Ferguson M., 1980. *Chemical Species in fly Ash from Coal-burning Power Plant*. Science, 210, 1356-1358.
- [45] Isaaks E.H., Srivastava R.M. *Applied Geostatistics*, Oxford University, New York, 1998.
- [46] Jordanova N., Jordanova D., Veneva L., Yorova K, Petrovsky E., 2003. *Magnetic Response of Soils and Vegetation to Heavy Metal Pollution. A case study*. Environmental Science & Technology, 37(19), 4417-4424.
- [47] Journel, A.G. i Huijbregts Ch.J. *Mining Geostatistics*, Academic Press, New York, 1978.
- [48] Kabata-Pendias A. i Pendias H. *Biogeochemia Pierwiastków Śladowych*, PWN, Warszawa, 1993.

- [49] Kapička A. and Petrovsky E. 1997. Magnetic Mapping of Fly-Ash Pollution Around a Coal-Burning Power Plant of Pocerady. Czech Republic Ann. Geophys., 15, C103.
- [50] Kapička A., Jordanova N., Petrovsky and Podrazsky V., 2003. *Magnetic Study of Weakly Contaminated Forest Soils*. Water Air and Soil Pollution, 148, 31-44.
- [51] Kapička A., Petrovsky E., Jordanova N., 1997. *Comparison of in Situ Field Measurements of Soil Magnetic Susceptibility with Laboratory Data*. Studia Geophysica et Geodaetica, 41, 391-395.
- [52] Kapička A., Petrovsky E., Jordanova N., Fialova H. *The Influence of Industrial Imission on the Magnetic Parameters of Soil*. Symposium no. 55, Paper no. 2130, 17th WCSS 14-21 August 2002.
- [53] Kapička A., Petrovsky E., Ustjak S., and Machackova E., 1999. Proxy Mapping of Fly-Ash Pollution of Soils Around a Coal-Burning Power Plant: A Case Study in the Czech Republic. Journal of Geochemical Exploration, 66, 291-297.
- [54] Kirwan N., Oliver M.A., Moffat A.J., Morgan G.W., 2004. *Sampling the Soil in Long-Term Forest Plots: The Implications of Spatial Variation*. Environmental Monitoring and Assessment, 111, 149-172.
- [55] Krishnan S.S., Jervis R.E. i Vela L.D., 1994. *Studies of Incinerator Ashes and Environmental Effects Using Radioanalytical Techniques*. Biological Trace Element Research, 43-45(1), 169-175.
- [56] Kupfersberger H., Deutsch C.V., Journal A.G., 1998. *Deriving Constraints on Small-Scale Variograms due to Variograms of Large-Scale Data*. Mathematical Geology, 30(7), 837-852.
- [57] Lark R.M., 2000. A Comparison of Some Robust Estimators of the Variogram for Use in Soil Surveys. European Journal of Soil Science, 51, 137-157.
- [58] Lark R.M., 2002. Robust Estimation of the Pseudo Cross-semivariogram for Cokriging Soil Properties. European Journal of Soil Science, 53, 253- 270.
- [59] Lark R.M., Papritz A., 2003. Fitting a Linear Model of Coregionalization for Soil Properties Using Simulated Annealing. Geoderma, 103, 245-260.
- [60] Larocque G., Dutilleul P., Pelletier B., Fyles J.W., 2007. *Characterization and Quantification of Uncertainty in Coregionalization Analysis*. Mathematical Geology, 39, 263-288.
- [61] Lecoanet H., Leveque F., Segura S., 1999. *Magnetic Susceptibility in Environmental Applications: Comparison of Field Probes*. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 115, 191-204.
- [62] Lis J., Pasieczna A. *Atlas Geochemiczny Górnego Śląska*, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa, 1995.
- [63] Lis J., Pasieczna A. *Atlas Geochemiczny Polski*, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa, 1995.
- [64] Ma Y.Z., Jones T.A., 2001. *Modeling Hole-Effect Variograms of Lithology-Indicator Variables*. Mathematical Geology, 33(5), 631-648.
- [65] Magiera T. and Zawadzki J., 2006. Using of High-resolution Topsoil Magnetic Screening for Assessment of Dust Deposition: Comparison of Forest and Arable Soil Datasets. Environmental Monitoring and Assessment, 125(1-3), 19-28.
- [66] Magiera T. i Strzyszczyk Z., 1996. The Use Of Magnetic Methods To Identify Anthropogenic Ferrimagnetics In Soils. Geologica Carpathica, 47(3), 187-189.

- [67] Magiera T. *Wykorzystanie Magnetometrii do Oceny Zanieczyszczenia Gleb i Osadów Jeziornych*, Works & Studies No. 59, Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, Zabrze, 2004.
- [68] Magiera T., Lis J., Nawrocki J., Strzyszczyński Z. *Podatność Magnetyczna Gleb Polski*, Państwowy Instytut Geologiczny, 2002.
- [69] Magiera T., Strzyszczyński Z., Kapička A. and Petrovsky E., 2006. Discrimination of Lithogenic and Anthropogenic Influences on Topsoil Magnetic Susceptibility in Central Europe. *Geoderma*, 130, 299-311.
- [70] Magiera T., Strzyszczyński Z. and Rachwał M. 2007. Mapping Particulate Pollution Loads Using Soil Magnetometry in Urban Forests in the Upper Silesia Industrial Region. *Forest Ecology and Management*, 248(1-2), 36-42.
- [71] Magiera T., Strzyszczyński Z. *Using of Field Magnetometry in Estimation of Urban Soil Degradation*. Proceedings of First Internationale Conference on Soil of Urban, Industrial, Traffic and Mining Areas, University of Essen, Essen, 12-18.07.2000, 105-110.
- [72] Magiera T., Strzyszczyński Z., Ferdyn M., *Możliwości Wykorzystania Magnetometrii Terenowej w Monitoringu Regionalnym Gleb Leśnych na Przykładzie Nadleśnictwa Katowice*, w: *Obieg Pierwiastków w przyrodzie* tom. IIB, Ed. Gworek i J. Misiak, IOŚ, Warszawa, 2003.
- [73] Magiera T., Strzyszczyński Z., Petrovsky E., Kapička A., Smółka D., 1998. *Ferrimagnetic Minerals and Heavy Metal Distribution within Different Granulometric Fraction of Fly Ashes*. *Geologica Carpathica*, 49(4), 238-239.
- [74] Magiera T., Strzyszczyński Z., Rachwał M., 2006. Magnetic Susceptibility of Forest Topsoils in Mountain Regions of Southern Poland Based on Field Measurement Techniques. *Polish Journal of Soil Science*, 39(2), 101-108.
- [75] Magiera T., Zawadzki J., Gajda B., 2007. Using of High Resolution Screening for Comparison of Topsoil Magnetic Susceptibility Data Obtained in Forest and Open Areas. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol.125 (1-3), 19-28.
- [76] Maier G., Scholger R., 2004. Demonstration of Connection Between Pollutant Dispersal and Atmospheric Boundary Layers by Use of Magnetic Susceptibility Mapping, St. Jacob (Austria). *Physics and Chemistry of the Earth*, 29, 997-1009.
- [77] Maier G., Scholger R., Schon J., 2005. *The Influence of Soil Moisture on Magnetic Susceptibility Measurements*. *Journal of Applied Geophysics*, 59, 162-175.
- [78] Marchant B.P., Lark R.M., 2007. *Optimized Sample Schemes for Geostatistical Surveys*. *Mathematical Geology*, 39(1), 113-134.
- [79] Markus J.A., McBratney A.B., 2001. A Review of the Contamination of Soil with Lead II. Spatial Distribution and Risk Assessment of Soil Lead. *Environment International*, 27, 399-411.
- [80] Matheron G. *Traité de Géostatistique Appliquée*, Editions Technip, France, 1963.
- [81] McBratney A.B., and Webster R., 1986. Choosing Function for Semivariograms of Soil Properties and Fitting Them to Sampling Estimates. *Journal of Soil Science*, 37, 617-639.



- [82] Montarella L. *Existing Soil Monitoring Systems*. Interim Report of task group Existing soil monitoring systems of the Working group on Monitoring within EU Soil Thematic Strategy, 2003.
- [83] Myers D.E., 1991. Pseudo-cross-variograms, Positive Definiteness, and Co-kriging. *Mathematical Geology*, 23, 805-816.
- [84] Namysłowska-Wilczyńska B., Wilczyński A., 1997. Badania Geostatystyczne Zanieczyszczenia Gleb Metalami Ciężkimi w Wybranych Rejonach Górnego Śląska. *Ochrona Środowiska*, 2(65), 9-18.
- [85] Oliver M.A., Kharyat A.L. *Investigating the Spatial Variation of Radon in Soil Geostatistically*. Proceedings of the 4th International Conference on GeoComputation, Mary Washington College, Fredericksburg, Virginia, USA, 25 - 28 July 1999.
- [86] Pacyna J.M., 1986. *Source-receptor relationships for trace elements in Northern Europe*. *Water Air and Soil Pollution*, 30(3-4), 825-835.
- [87] Panaiotu C.G., Necula, C., Panaiotu C.E., Axente, V., *A Magnetic Investigation of Heavy Metals Pollution in Bucharest*. w: I. Ionel (Ed): Sustainability for humanity & environment in the extended connection field science-economy-policy, Scientific reunion of the special program of Alexander von Humboldt Foundation concerning the reconstruction of the South Eastern Europe, Editura Politehnica, Timisoara, 2005
- [88] Pannatier Y. *Variowin, Software for Spatial Data Analysis in 2D*, Springer – Verlag, New York, 1996.
- [89] Pardo-Iguzquiza E., Dowd P.A., 1998. *The Second-Order Stationary Universal Kriging Model Revisited*. *Mathematical Geology*, 30(4), 347-378.
- [90] Petrovsky E., Hulka Z., Kapička A., 2004. A New Tool for in Situ Measurements of the Vertical Distribution of Magnetic Susceptibility in Soils as Basis for Mapping Deposited Dust. *Environmental Technology*, 25, 1021-1029.
- [91] Petrovsky E., Kapička A., Jordanova N., Zapletal K., Boruvka L., Janku J., Rochette P. *Magnetic Properties of Alluvial Soils (fluvisols) Contaminated with Pb, Zn and Cd*. 8th Scientific Assembly of IAGA, August 4-14, Uppsala, Sweden, 1997.
- [92] Pozza M.R., Boyce J.I., Morris W.A. *Lake-based Magnetic Mapping of Contaminated Sediments, Hamilton Harbour, Ontario, Canada*. Proceedings of SAGEEP Annual Meeting, February, Las Vegas, Nevada, 2002.
- [93] Przewłocki S. *Geodezja dla Inżynierii Środowiska*, PWN, Warszawa, 2000.
- [94] Regulation of Ministry of Environment of Poland, Dz. U.02.165.1359, 4th October 2002.
- [95] Rivoirard J., 2001. *Which Models for Collocated Cokriging?*. *Mathematical Geology*, 33(2), 117-131.
- [96] Robertson D.J., Taylor K.G., Hoon S.R., 2003. *Geochemical and Mineral Magnetic Characterization of Urban Sediment Particulates*, Manchester, UK. *Applied Geochemistry*, 18, 269-282.
- [97] Salchow E., Lal R., Fausey N.R., Ward A., 1996. *Pedotransfer Functions for Variable Alluvial Soils in Southern Ohio*. *Geoderma*, 73(3), 165-181.
- [98] Schibler L., Boyko T., Ferdyn M., Gajda B., Holl S., Jordanova N., Rosler W., and MAGPROX team., 2002. *Topsoil Magnetic Susceptibility Mapping: Data Reproducibility and Compatibility, Measurement Strategy*. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 46, 43-57.

- [99] Schnabel U., Tietje O., Scholtz R.W., 2004. *Uncertainty Assessment for Management of Soil Contaminants with Sparse Data*. Environmental Management, 33(6), 911-925.
- [100] Shefsky S. *Sample Handling Strategies for Accurate Lead-in-Soil Measurements in the Field and Laboratory*. International Symposium of Field Screening Methods for Hazardous Wastes and Toxic Chemicals, Las Vegas, Nevada, USA, January 29-31 1997.
- [101] *Smart Sampling, Subsurface Contaminants Focus Area*. Summary Report, DOE/EM-0491, U.S. Department of Energy, September 1999.
- [102] Spiteri C., Kalinski V., Rosler W., Hoffman V. and Appel E., 2005. Magnetic Screening of Pollution Hotspots in the Lausitz Area, Eastern Germany: Correlation Analysis Between Magnetic Proxies and Heavy Metal Concentration in Soil. Environmental Geology, 49, 1-9.
- [103] Stein A. *Change of Support for Environmental Indicators*. GeoEnv III Geostatistics for environmental applications / Monestiez et al. Dordrecht : Kluwer, 393 – 404, 2001.
- [104] Stein A., Van Eijnsbergen A.C., Barendregt L.G., 1991. *Cokriging Nonstationary Data*. Mathematical Geology, 23, 703-719.
- [105] Strzyszczyk Z. and Magiera T., 1998. *Heavy Metal Contamination and Magnetic Susceptibility in Soils of Southern Poland*. Physics and Chemistry of the Earth, 23, 1127–1131.
- [106] Strzyszczyk Z. and Magiera T., 2001. Chemical and Mineralogical Composition of Some Ferrimagnetic Minerals Occurring in Industrial Dusts and Contaminated Soils. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd.96 (H.2), 697-698.
- [107] Strzyszczyk Z. *Ferromagnetic Properties of Forest Soils Being under Influence of Industrial Pollution*. Air Pollution and Forest Decline. Proc. 14th Int. Meeting for Specialist in Air Pollution Effects on Forest Ecosystems, IUFRO, 201–207, 1989.
- [108] Strzyszczyk Z. i Magiera T. Topsoil Magnetic Susceptibility Enhancement of Technogenic Origin in Upper and Lower Silesia (Poland) and Saxony (Germany). Annual Report of Polish Academy of Sciences, 86-88, 2006.
- [109] Strzyszczyk Z. i Magiera T., 1993. *Distribution of Ferromagnetics in Forest Soils of Some Polish and German Regions in Relation to Their Origin*. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd. 72, 1309-1312.
- [110] Strzyszczyk Z. i Magiera T., 2000. Podatność Magnetyczna Niektórych Przemysłowych Pyłów Atmosferycznych jej Znaczenie w Monitoringu Ekologicznym Powierzchni Ziemi. Prace i Studia IPIŚ PAN, 54, 205-215.
- [111] Strzyszczyk Z. *Magnetic Susceptibility of Soils in the Areas Influenced by Industrial Emission*, w: Soil Monitoring, Ed. Schulin R., Desaulles A., Birkhauser Verlag Basel, 155-269, 1993.
- [112] Strzyszczyk Z., 1995. Gehalt an Ferromagnetika in der von der Immision der Zementindustrie in der wojewodschaft Opole beeinflussten Boden. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 76, 1477-1480.
- [113] Strzyszczyk Z., 1999. *Sources of Anthropogenic Ferrimagnetic Minerals in Soils*. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 91(3), 1427-1431.

- [114] Strzyszczyk Z., Brożek S., Zwydak M., Magiera T., 2005. *Podatność Magnetyczna Niektórych Typów Leśnych Gleb Górskich w Zależności od Depozycji Pyłów Przemysłowych*. Problemy Zagospodarowania Ziemi Górskich, 25, 87-95.
- [115] Strzyszczyk Z., Magiera T. and Heller F., 1996. The Influence of Industrial Emissions on The Magnetic Susceptibility of Soils in Upper Silesia. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 40, 276-286.
- [116] Strzyszczyk Z., Magiera T. *Content of Heavy Metals in Soils of Polish - Czech Border Areas*. Proceedings of Sixth International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, University of Guelph, 2001, 500.
- [117] Strzyszczyk Z., Magiera T. *The Main Sources of Chemical Degradation of Soil in Urban Areas*. Proceedings of First Internationale Conference on Soil of Urban, Industrial, Traffic and Mining Areas, University of Essen, Essen, 12-18.07.2000, 695-699.
- [118] Strzyszczyk Z., Magiera T. Topsoil Magnetic Susceptibility Enhancement of Technogenic Origin in Upper and Lower Silesia (Poland) and Saxony (Germany). Annual Report of Polish Academy of Sciences, 86-88, 2006.
- [119] Strzyszczyk Z., Magiera T., 1998. *Heavy Metal Contamination and Magnetic Susceptibility in Soils of Southern Poland*. Physics and Chemistry of the Earth, 23, 1127-1131.
- [120] Strzyszczyk Z., Magiera T., 2001. Chemical and Mineralogical Composition of some Ferrimagnetic Minerals Occuring in Industrial Dusts and Contaminated Soils. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 96(2), 697-698.
- [121] Strzyszczyk Z., Magiera T., 2001. Magnetic Susceptibility Measurement on Ombrothrophic Peat in Monitoring of Industrial Immision. *Archives of Environmental Protection*, 27, 141-167.
- [122] Strzyszczyk Z., Magiera T., Bzowski Z., 1994. Magnetic Susceptibility as an Indicator of Soils Contamination in Some Regions of Poland. *Roczniki Gleboznawcze*, XLIV, 85-93.
- [123] Strzyszczyk Z., Magiera T., Ferdyn M., 2005. Magnetometr SM 400 jako Nowe Narzędzie do Oceny Wielkości Depozycji Pyłów Przemysłowo-Miejskich w Glebach w Oparciu o Pomiar Podatności Magnetycznej w Terenie. II Kongres Inżynierii Środowiska, Materiały, t.2. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, 33, 623-631.
- [124] Strzyszczyk Z., Magiera T., Rachwał M., 2006. Application of Soil Magnetometry for Identification of Technogenic Anomalies of Trace Metals and Iron Contents: A Case Study in the Katowice Forest District. *Polish Journal of Environmental Studies*, 15(2a), 176-184.
- [125] Tao S., 1995. Kriging and Mapping of Copper, Lead and Mercury Contents in Surface Soil in Shenzhen Area. *Water Air and Soil Pollution*, 83, 61-72
- [126] Thompson R., Oldfield F. *Environmental Magnetism*, Allen & Unwin, London, 1986.
- [127] Usowicz B., 1999. Zastosowanie analizy geostatycznej i teorii fraktali w badaniach dynamiki wilgotności w profilu glebowym na polach uprawnych. *Acta Agrophysica*, 22, 229-243.
- [128] Usowicz B., Sokołowska Z., Dąbkowska-Naskręt H., Lipiec J., Hajnos M., Usowicz J.B. *Zastosowanie metod geostatycznych do weryfikacji satelitarnych pomiarów wilgotności gleby w misji SMOS*. 27

- Kongres Polskiego Towarzystwa Gleboznawczego "Gleba w Czasie i Przestrzeni", Warszawa, 03-07.2007, 193a.
- [129] van Dam R.L., Hendrickx J.M.H, Harrison B., Borchers B., Norman D.I., Ndur S., Jasper Ch., Niemeyer P., Nartey R., Vega D., Calvo L., Simms J.E. *Spatial Variability of Magnetic Soil Properties, in Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets*. IX Proceedings of the SPIE, Orlando, 665-676, 2004.
- [130] van den Boogaart K.G., Brenning A., 2001. *Why Universal Kriging is Better than IRFk-Kriging: Estimation of Variograms in the Presence of Trend*. Proceedings of 2001 Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology, Cancun, Mexico, September 6-12 2001.
- [131] van Groenigen J.W., 2000. The Influence of Variogram Parameters on Optimal Sampling Schemes for Mapping by Kriging. *Geoderma*, 97, 223-236.
- [132] van Groenigen J.W., Gandah M., Bouma J., 2000. *Soil Sampling Strategies for Precision Agriculture Research under Sahelian Conditions*. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 1674-1680.
- [133] van Groenigen J.W., Pieters G., Stein A., 2000. *Optimizing Spatial Sampling for Multivariate Contamination in Urban Areas*. *Environmetrics*, 11, 227-244.
- [134] Vauclin M., Viera S.R., Vachaud G., Nielsen D.R., 1983. *The Use of Cokriging with Limited Field Soil Observations*. *Soil Science Society of America Journal*, 47, 175-184.
- [135] von Staiger B., Webster R., Schulin R., Lehmann R., 1996. *Mapping Heavy Metals in Soils by Disjunctive Cokriging*. *Environmental Pollution*, 94(2), 205-215.
- [136] Wackernagel H. *Principal Component Analysis for Autocorrelated Data: A Geostatistical Perspective*. Technical Report N-22/98/G, Centre de Geostatistique – Ecole de Mines de Paris, August 1998.
- [137] Walvoort D.J.J., de Gruijter J.J., 2001. *Compositional Kriging: A Spatial Interpolation Method for Compositional Data*. *Mathematical Geology*, 33(8), 951-966.
- [138] Wang X. and Qin Y., 2005. Magnetic Properties of Urban Topsoils and Correlation with Heavy Metals: A Case Study From City of Xuzhou, China. *Environmental Geology*, 49, 897-904.
- [139] Webster R., Oliver M.A. *Geostatistics for Environmental Scientists*, John Wiley & Sons, Chichester, 2001.
- [140] Webster R., Oliver M.A., 1992. *Sample Adequately to Estimate Variograms of Soil Properties*. *Journal of Soil Science*, 43, 177-192.
- [141] Wosten J.H.M., Finke P.A., Jansen M.J.W, 1995. Comparison of Class and Continuous Pedotransfer Functions to Generate Soil Hydraulic Properties. *Geoderma*, 66(3), 227-237.
- [142] Zawadzki J., 2003. Introduction to Integration of Spatial Data by Cokriging Method. *Wiadomości Statystyczne GUS*, 5, 7-21.
- [143] Zawadzki J., 2005. *Wykorzystanie Metod Geostatystycznych w Badaniach Środowiska Przyrodniczego*. *Prace Naukowe, Inżynieria Środowiska*, 49, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- [144] Zawadzki J., 2005. Zastosowanie Metod Geostatystycznych do Planowania Sieci Pomiarowych w Badaniach Geofizycznych. Część I Metody Oparte na Estymacji Przestrzennej. *Geofizyka*, 2, 105-118.

- [145] Zawadzki J., 2006. Zastosowanie Metod Geostatystycznych do Planowania Sieci Pomiarowych w Badaniach Geofizycznych. Część II, Metody oparte na symulacjach przestrzennych. *Geofizyka*, 1, 106-117.
- [146] Zawadzki S. *Gleboznawstwo*, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Inowrocław, 1999.
- [147] Zhang R., Myers D.E., Warrick A.W., 1992. *Estimation of the Spatial Distributions of Soils Chemicals Using Pseudo-cross-semivariograms*. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 1444-1452.

## Załącznik nr 1 – Obszary pomiarowe

### Z1.1. Używane oznaczenia powierzchni i serii pomiarowych

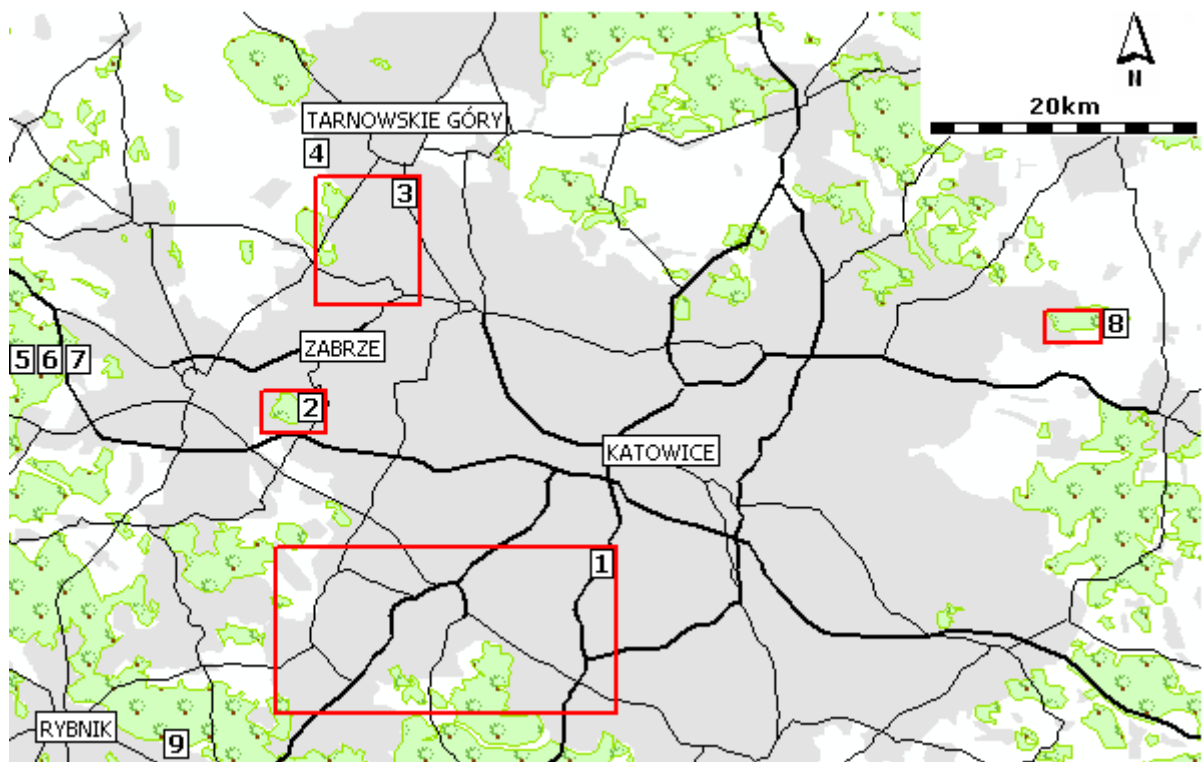
Pomiary terenowe podatności magnetycznej oraz zawartości metali ciężkich w glebie były wykonywane na kilku powierzchniach pomiarowych. W celu zachowania czytelności, w całej pracy stosowano nazewnictwo powierzchni oraz serii pomiarowych, które zostało zestawione w tabeli Z1.1.

Tabela Z1.1. Zestawienie powierzchni oraz serii pomiarowych wykorzystanych w pracy

Table Z1.1. List of study areas and measurement series used in this study

Powierzchnia pomiarowa	Numer powierzchni	Seria pomiarowa	Siatka pomiarowa	
			Podatność magnetyczna	Zawartość metali ciężkich
<i>Województwo Śląskie</i>	-	<i>Województwo Śląskie A</i>	12 km	-
		<i>Województwo Śląskie B</i>	6 km	-
<i>GOP</i>	-	<i>GOP A</i>	4 km	-
		<i>GOP B</i>	2 km	-
<i>Mikołów</i>	1	<i>Mikołów</i>	1 km	-
<i>Makoszów</i>	2	<i>Makoszów</i>	220 m	300 m
<i>Miechowice</i>	3	<i>Miechowice</i>	220 m	300 m
<i>Repty Śląskie</i>	4	<i>Repty Śląskie</i>	200 m	250 m
<i>Rudziniec Las Sosnowy</i>	5	<i>Rudziniec Las Sosnowy</i>	10 m	-
<i>Rudziniec Pole Pszenicy</i>	6	<i>Rudziniec Pole Pszenicy</i>	~ 10 m	-
<i>Rudziniec Las Bukowy</i>	7	<i>Rudziniec Las Bukowy</i>	~ 5 m	-
<i>Lasy Błędowskie</i>	8	<i>Lasy Błędowskie</i>	250 m	250 m
<i>Szczyrkowice</i>	9	<i>Szczyrkowice</i>	10 m	20 m

Zamieszczono również podstawowe informacje na temat powierzchni pomiarowych i pomiarów na nich wykonanych. Szczegółowe opisy powierzchni pomiarowych zostały zawarte w odpowiednich rozdziałach Załącznika nr 1.

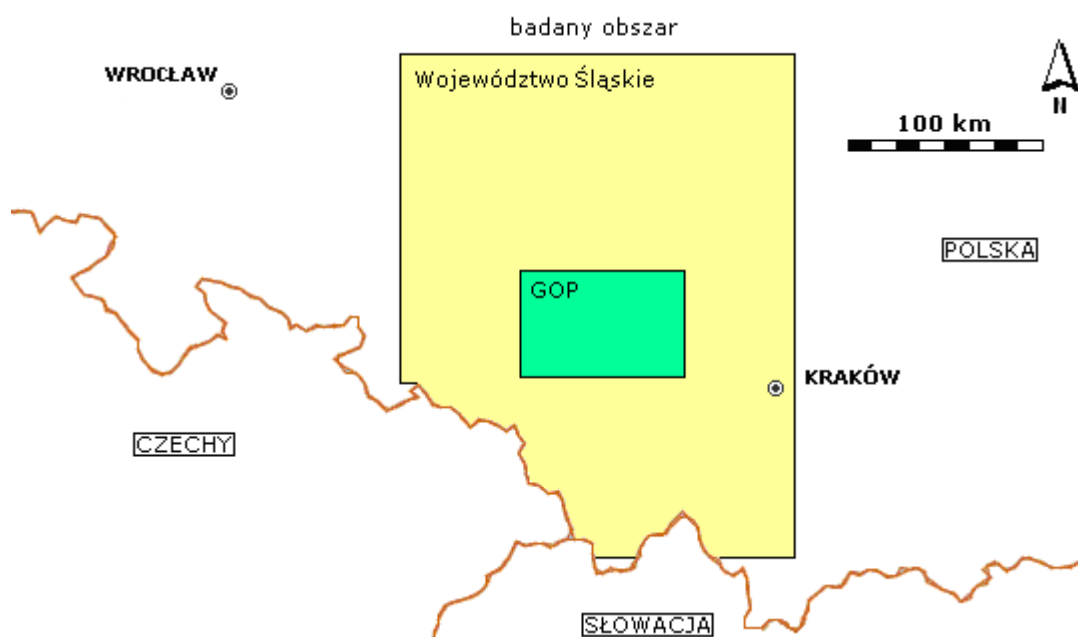


Rysunek Z1. 1. Lokalizacja powierzchni pomiarowych wykorzystanych w pracy

Figure Z1. 1. Location of study areas used in this study

### Z1.2. Obszary pomiarowe Województwo Śląskie i GOP

Pomiary magnetometryczne oraz chemiczne były wykonywane na wielu obszarach pomiarowych zlokalizowanych na terenie Województwa Śląskiego.

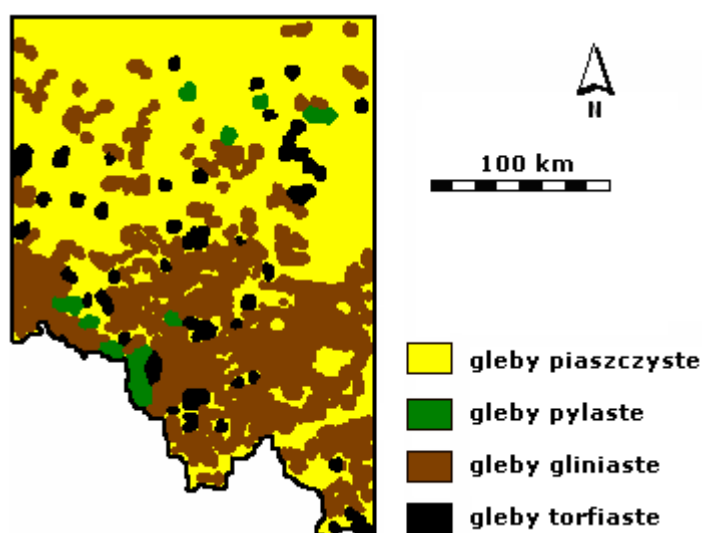


Rysunek Z1. 2. Lokalizacja powierzchni pomiarowych *Województwo Śląskie* oraz *GOP*

Figure Z1. 2. Location of study areas *Województwo Śląskie* and *GOP*

Badany obszar charakteryzował się skomplikowaną budową geologiczną. Jest to związane z występowaniem wielu formacji geologicznych. W części północnej badanego obszaru przeważały osady glin dolnej Jury, w części centralnej osady węglowe środkowego Triasu oraz Karbonu, natomiast w części południowej osady trzeciorzędowe. Wschodnia część badanego obszaru była zajmowana głównie przez osady węglowe Jury i Kredy. W części centralnej występowały dolomity kruszconośne oraz eksploatowane złoża cynku i ołowiu.

Na badanym obszarze w przeważającej części występowały gleby utworzone z piasków oraz glin zwałowych, które zajmowały odpowiednio około 65% i 32% całkowitej powierzchni. Inne typy gleb, takie jak gleby wykształcone z torfów i pyłów występowały bardzo rzadko i zajmowały odpowiednio około 0,5% i 2,5% całkowitej powierzchni badanego obszaru. W części południowej przeważały gleby utworzone z piasków, natomiast w części północnej gleby utworzone z glin zwałowych. Ponad 70% badanego obszaru było zajmowane przez gleby, których pH było niższe niż 6,7.



Rysunek Z1. 3. Mapa gleb występujących na badanym obszarze (Lis i Pasieczna, 1995)

Figure Z1. 3. Map of soil present at the study area (Lis and Pasieczna, 1995)

Na badanym obszarze obserwowano wysokie stężenia metali ciężkich w glebie, zwykle przekraczające dopuszczalne wartości. Typowe średnie zawartości Cd, Cu, Ni, Pb i Zn wynosiły odpowiednio 3,1 mg/kg, 13 mg/kg, 6 mg/kg, 130 mg/kg oraz 331 mg/kg. Maksymalne obserwowane wartości bardzo często były do stu razy wyższe.

Cały badany obszar został opróbowany na podstawie stosunkowo gęstej sieci pomiarowej. Średnia odległość między pomiarami wynosiła około 6 km, aczkolwiek odległość pomiarami na niektórych obszarach była mniejsza. Sumarycznie na całym badanym obszarze zostało wykonanych ponad 2500 pomiarów podatności magnetycznej gleb.



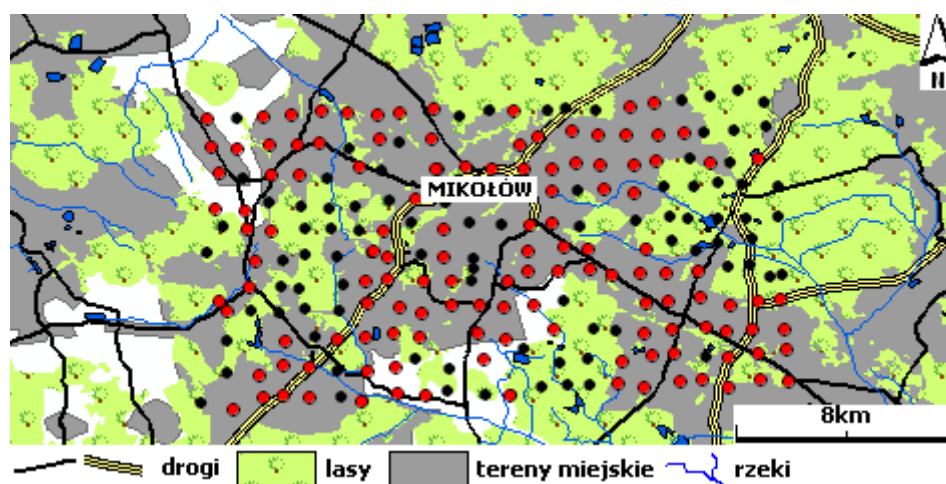
Obszar został zbadany przy wykorzystaniu próbek glebowych, pochodzących z zasobów archiwalnych Państwowego Instytutu Geologicznego. Poboru dokonywano w latach 1991–1992. Próbkę o masie około 0,5 kg pobierano za pomocą ręcznej sondy o średnicy około 0,08 m z głębokości 0,0 – 0,2 m. Próbkę były pobierane niezależnie od sposobu użytkowania terenu (obszary leśne, parki miejskie, pola uprawne, łąki, pastwiska, ugory, ogródki działkowe). Na terenach leśnych przed poborem próby usuwano ściółkę leśną, co miało zniwelować różnice między terenami rolnymi i leśnymi. Na podstawie próbek glebowych zostały wykonane w laboratorium pomiary masowej podatności magnetycznej  $\chi$  za pomocą miernika podatności MS2B Bartington.

Cały badany obszar został określany mianem *Województwo Śląskie*, natomiast wycinek tego obszaru mianem *GOP* (Górnośląski Okręg Przemysłowy).

Dodatkowo, w rejonie całego badanego obszaru *Województwo Śląskie* zlokalizowano szereg mniejszych powierzchni pomiarowych, były które położone głównie w parkach miejskich i lasach. Obszary te zostały opisane poniżej.

### Z1.3. Obszar pomiarowy *Mikołów*

Powierzchnia pomiarowa była zlokalizowana na południe od Aglomeracji Katowickiej. Na terenie tym wykonywano pomiary podatności magnetycznej miernikiem MS2D w dwóch seriach pomiarowych. Pierwsza obejmowała pomiary na terenach otwartych (łąki, pola uprawne), druga natomiast pomiary na terenach leśnych.

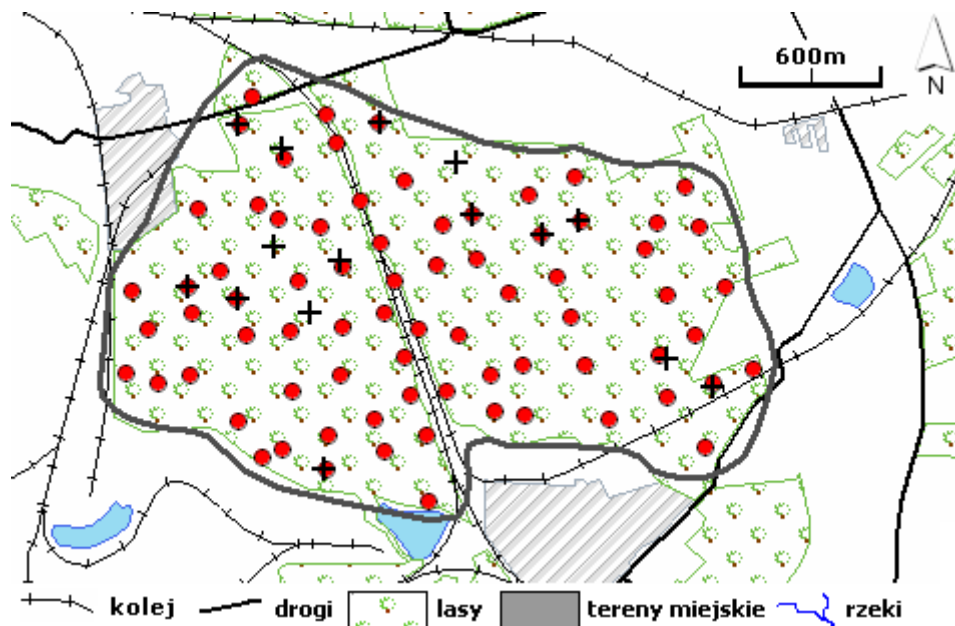


Rysunek Z1. 4. Powierzchnia pomiarowa *Mikołów*. Pomiary wykonywane na terenach otwartych i wykonywane na terenach leśnych oznaczono odpowiednio kolorem czerwonym i czarnym

Figure Z1. 4. Study area *Mikołów*. Measurements performed at open areas and in forest were denoted in red and black, respectively

#### Z1.4. Obszar pomiarowy *Makoszów*

Powierzchnia pomiarowa była zlokalizowana na terenie parku miejskiego położonego na południu Zabrze. Obszar parku był podzielony linią kolejową, która przebiegała z północy na południe. Część wschodnia parku była zwykle bardziej wykorzystywana przez ludność do celów rekreacyjnych.



**Rysunek Z1. 5. Powierzchnia pomiarowa *Makoszów*. Pomiary podatności magnetycznej wykonywane miernikiem MS2D oraz pomiary chemiczne oznaczone zostały odpowiednio, punktami i krzyżami**

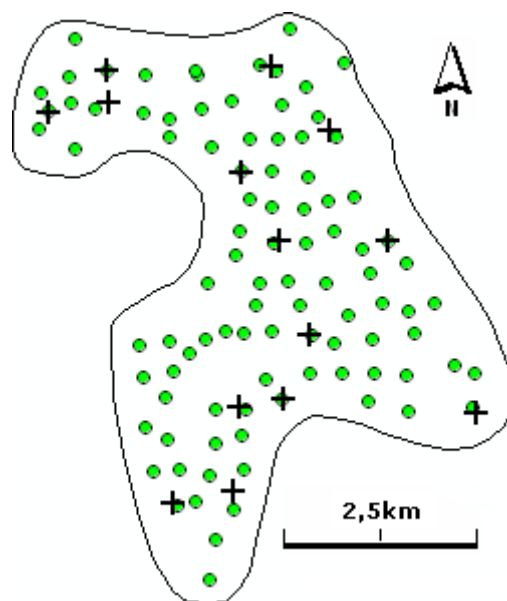
**Figure Z1. 5. Study area *Makoszów*. Measurements of magnetic susceptibility performed with MS2D device and chemical measurements were denoted with points and crosses, respectively**

Część zachodnia parku była mniej uczęszczana i w związku z tym roślinność piętra średniego była tam o wiele bardziej rozwinięta i gęsta. Na południu park graniczył ze składowiskami, wykorzystywanymi przez kopalnię węgla. Stare i nieużytkowane składowiska były też zlokalizowane w części zachodniej parku. W części południowo-wschodniej występowały głównie ogródki działkowe.

W drzewostanie parku przeważającą część stanowiły drzewa liściaste, takie jak brzoza, dąb, akacja, klon, w niektórych miejscach występowały także drzewa iglaste, takie jak sosna. Na obszarze parku dominowały głównie gleby brunatne i płowe. Gleby te zostały wykształcone głównie z piasków polodowcowych.

### Z1.5. Obszar pomiarowy *Miechowice*

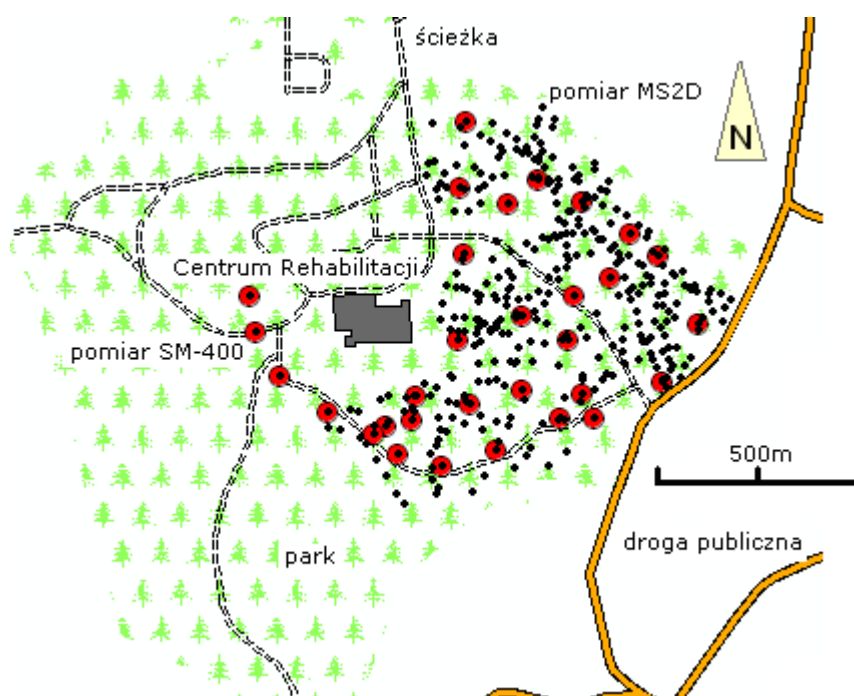
Powierzchnia pomiarowa była zlokalizowana na terenie kompleksu leśnego, położonego na północ od Zabrza, pomiędzy Bytomiem a Tarnowskimi Górami. Na badanej powierzchni występowały głównie gleby opadowo-glejowe, bielcowe, rdzawe oraz brunatne, wykształcone z glin zwałowych i piasków polodowcowych. Badany obszar był zlokalizowany w zasięgu występowania dolomitów oraz wapieni z dodatkiem rud metali ciężkich.



**Rysunek Z1. 6. Rozkład punktów pomiarowych na powierzchni *Miechowice*; miejsce pomiaru podatności magnetycznej oraz poboru profili glebowych oznaczono odpowiednio, punktami i krzyżami**

**Figure Z1. 6. Location of sample points at study area *Miechowice*; sample points of magnetic susceptibility and soil cores collection were denoted with points and crosses, respectively**

## Z1.6. Obszar pomiarowy *Repty Śląskie*



**Rysunek Z1. 7. Powierzchnia pomiarowa *Repty Śląskie*; czarnymi punktami i czerwonymi punktami zostały oznaczone odpowiednio, miejsca pomiaru podatności magnetycznej miernikiem MS2D i miejsca pomiaru podatności magnetycznej w profilu glebowym**

**Figure Z1. 7. Study area *Repty Śląskie*; black points and red points denotes locations of magnetic susceptibility measurements performed with MS2D device and locations of measurements performed in soil profile, respectively**

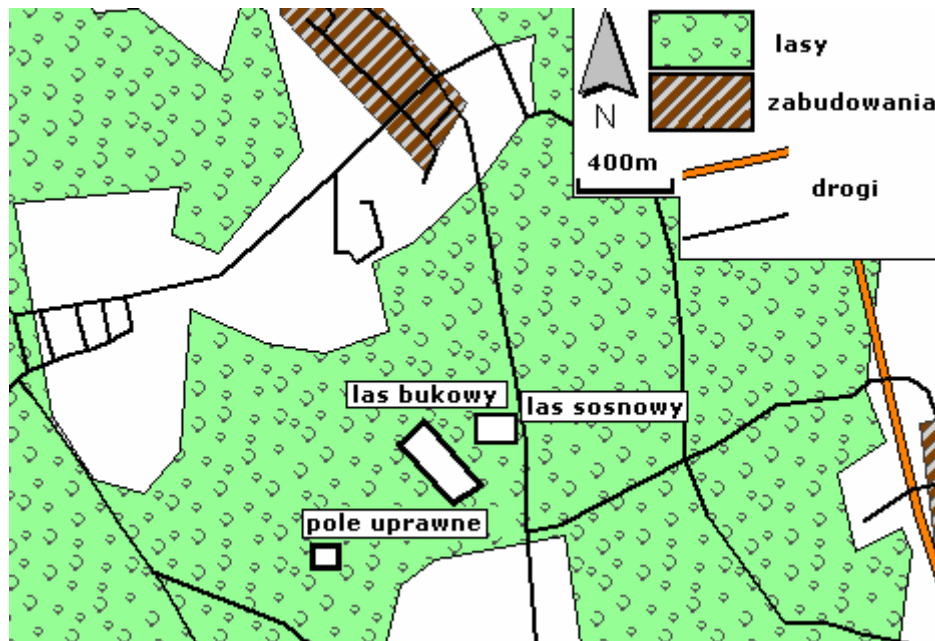
Powierzchnia pomiarowa była położona w parku miejskim w Reptach Śląskich, niedaleko Górnośląskiego Centrum Rehabilitacyjnego. Park jest obecnie zamknięty dla ruchu publicznego i samochodowego i jest wykorzystywany tylko przez pieszych. Na jego terenie nie występują zbiorniki wodne. Tereny parku w Reptach Śląskich objęte są obszarem występowania utworów dolomitowych. Badany obszar o rozmiarach około 800 m na 1000 m miał nieregularne kształty.

Na obszarze występowały głównie gleby brunatne wykształcone na cienkiej warstwie piasków i żwirów, pod którą występuje warstwa dolomitów kruszonośnych, bogatych w Pb, Zn, Ag, Cd.

Na badanym obszarze wykonano dwie serie pomiarowe. Pierwsza z nich obejmowała pomiary podatności magnetycznej na powierzchni gleby miernikiem MS2D. Pomiary były przeprowadzane bez usuwania ściółki leśnej. W wybranej lokalizacji wykonywano od 10 do 15 pojedynczych pomiarów podatności. Następnie wartości pomiarowe zostały uśrednione, a średnia była przyjęta jako wartość zmierzona w punkcie pomiarowym. Druga seria pomiarowa obejmowała pomiary podatności w profilu glebowym miernikiem SM400 oraz pobór profili glebowych do analiz chemicznych.

### Z1.7. Obszary pomiarowe Rudziniec Las Bukowy, Rudziniec Las Sosnowy, Rudziniec Pole Pszenicy

Na terenach nadleśnictwa Rudziniec były zlokalizowane trzy małe powierzchnie pomiarowe (0,01 km<sup>2</sup>). Pierwsza z nich znajdowała się na terenie wysokiego lasu bukowego, druga na terenie młodego lasu sosnowego, natomiast trzecia na polu pszenicy. Wszystkie powierzchnie pomiarowe były zlokalizowane w bezpośredniej odległości od siebie, tak więc presja antropogeniczna była podobna na każdym z obszarów.



Rysunek Z1. 8. Powierzchnie pomiarowe *Rudziniec Las Bukowy, Rudziniec Las Sosnowy, Rudziniec Pole Pszenicy*

Figure Z1. 8. Study areas *Rudziniec Las Bukowy, Rudziniec Las Sosnowy, Rudziniec Pole Pszenicy*

Na każdej z powierzchni zostały wykonane bardzo gęste pomiary podatności magnetycznej miernikiem MS2D.



**Rysunek Z1. 9. Zdjęcie powierzchni pomiarowej *Rudziniec Las Bukowy***  
**Figure Z1. 9. Photograph of study area *Rudziniec Las Bukowy***



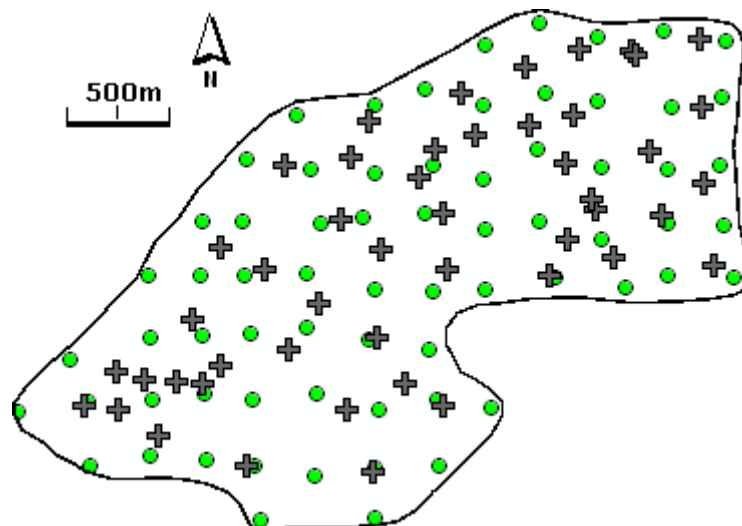
**Rysunek Z1. 10. Zdjęcie powierzchni pomiarowej *Rudziniec Las Sosnowy***  
**Figure Z1. 10. Photograph of study area *Rudziniec Las Sosnowy***



Rysunek Z1. 11. Zdjęcie powierzchni pomiarowej *Rudziniec Pole Pszenicy*  
 Figure Z1. 11. Photograph of study area *Rudziniec Pole Pszenicy*

### Z1.8. Obszar pomiarowy *Lasy Błędowskie*

Powierzchnia pomiarowa była zlokalizowana około 30 km na wschód od Katowic, w lasach błędowskich, niedaleko miejscowości Laski. Występujący tutaj obszar leśny przechodził w lasy Błędowskie, które są objęte prawną ochroną przyrody. Przez północno-zachodnią część badanego obszaru przepływała rzeka Biała, w okolicy której występowały rozlewiska i meandry. Na badanej powierzchni występowały głównie ubogie gleby bielcowe, wykształcone z piasków.



Rysunek Z1. 12. Rozkład punktów pomiarowych na powierzchni pomiarowej *Lasy Błędowskie*  
 Figure Z1. 12. Location of sample points at study area *Lasy Błędowskie*

### Z1.9. Obszar pomiarowy *Szczejkowice*

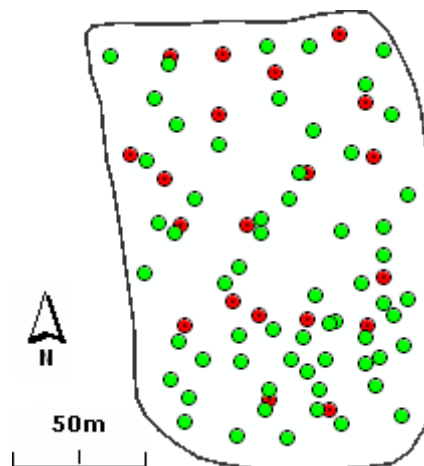
Powierzchnia pomiarowa (0,01 km<sup>2</sup>) była zlokalizowana na południowy zachód od aglomeracji katowickiej, niedaleko miejscowości *Szczejkowice*, na terenie wysokiego lasu sosnowego.



Rysunek Z1. 13. Zdjęcie powierzchni pomiarowej *Szczejkowice* wykonane podczas pomiarów terenowych

Figure Z1. 13. Photograph of study area *Szczejkowice* during field measurements

Na tym obszarze zostało wykonanych kilka serii pomiarowych. Obejmowały one pomiary podatności magnetycznej miernikiem MS2D, pomiary podatności w profilu glebowym miernikiem SM-400 oraz pobór profili glebowych do analiz chemicznych.



Rysunek Z1. 14. Rozkład punktów pomiarowych na powierzchni pomiarowej *Szczejkowice*; zielony punkt oznacza miejsce pomiaru podatności magnetycznej miernikiem MS2D, czerwony punkt miejsce poboru profili glebowych oraz pomiarów podatności w profilu glebowym

Figure Z1. 14. Location of sample points at study area *Szczejkowice*, green points denote locations of magnetic susceptibility measurements performed with MS2D device, red points denote locations where soil cores were collected and magnetic susceptibility in soil profile was measured



## Załącznik nr 2 – Standardy jakości gleb obowiązujące w Polsce

Standardy jakości gleby oraz dopuszczalna zawartość zanieczyszczeń w glebie, które obecnie obowiązują w Polsce, zostały zawarte w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. Dopuszczalna zawartość różnych substancji, w tym metali ciężkich, została określona z uwzględnieniem trzech rodzajów gruntu.

- i. Grupa A – grunty leżące na obszarach, podlegających prawnej ochronie na podstawie przepisów o ochronie przyrody.
- ii. Grupa B – grunty zaliczane do użytków rolnych z wyłączeniem gruntów pod stawami, rowami, gruntów leśnych i zadrzewionych i nieużytków oraz grunty zabudowane i zurbanizowane z wyłączeniem terenów przemysłowych i komunikacyjnych oraz użytków kopalnych.
- iii. Grupa C – grunty leżące na terenach przemysłowych i komunikacyjnych oraz użytki kopalne.

W przypadku terenów grupy B i C dopuszczalna zawartość została podana w zależności od głębokości w profilu glebowym oraz w zależności od wodnoprzepuszczalności gruntów. Ze względu na specyfikę metody magnetometrycznej, w pracy zostały wykorzystane jedynie wartości normowane, podane dla głębokości od 0 do 20 cm.

**Tabela Z2.1. Dopuszczalna zawartość metali ciężkich w glebie według Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002**

**Table Z2.1. Allowable concentrations of heavy metals in soil accordingly to the Regulation of Ministry of Environment from 9 September 2002**

	<b>Grupa A</b>	<b>Grupa B</b>	<b>Grupa C</b>
	[mg/kg]		
<b>Arsen</b>	20	20	60
<b>Bar</b>	200	200	1000
<b>Chrom</b>	50	150	500
<b>Cyna</b>	20	20	350
<b>Cynk</b>	100	300	1000
<b>Kadm</b>	1,0	4,0	15,0
<b>Kobalt</b>	20	20	200
<b>Miedź</b>	30	150	600
<b>Molibden</b>	10	10	250
<b>Nikiel</b>	35	100	300
<b>Ółów</b>	50	100	600
<b>Rtęć</b>	0,5	2,0	30

## Załącznik nr 3 – Używane oznaczenia

Tabela Z3.1. Lista przyjętych w pracy oznaczeń, w kolejności alfabetycznej

Table Z3.1. List of symbols used in the thesis, in alphabetical order

Symbol	Znaczenie
a	zasięg korelacji przestrzennych
Ah	podpoziom próchniczny humusowy.
$A_{\kappa}$	pole powierzchni pod krzywą podatności magnetycznej w profilu glebowym, liczone od powierzchni gleby do głębokości, na której wartości podatności magnetycznej zmieniały się nieznacznie z głębokością
$A_{\kappa 10}$	pole powierzchni pod krzywą podatności magnetycznej w profilu glebowym, liczone od powierzchni gleby do głębokości 10 cm
c	wartość progę wariogramu
<b>C</b>	macierz kowariancji pomiędzy wartościami zmierzonymi i estymowanymi
C	lasy igłaste
C(0)	wartość kowariogramu dla odległości pomiędzy punktami wynoszącej 0
C( <b>h</b> )	kowariogram
$c_0$	wartość efektu samorodka
C-aD	lasy igłaste z domieszką drzew liściastych
Cov	kowariancja
$C_{próg}$	wartość progowa stosowana w metodach wskaźnikowych
D	lasy liściaste
D-aC	lasy liściaste z domieszką drzew iglastych
$d_k$	końcowa głębokość w profilu glebowym, na której było obserwowane ustalenie się wartości podatności magnetycznej
Dol	tereny, na których występują utwory dolomitowe
Dol̄	tereny, na których nie występują utwory dolomitowe
Dol <sup>+</sup>	tereny, na których występują dolomity kruszczone
$d_p$	początkowa głębokość w profilu glebowym, na której był obserwowany duży wzrost wartości podatności magnetycznej, spowodowany zanieczyszczeniem antropogenicznym
g	współczynnik liniowego modelu koregionalizacji
GOP	Górnośląski Okręg Przemysłowy
<b>h</b>	wektor oddzielający parę punktów pomiarowych
$h_{avg}(j)$	średnie odległości dla j-tej struktury
$h_{max}(j)$	maksymalne odległości dla j-tej struktury
I( <b>x</b> )	transformowana wartość 0 lub 1 w metodzie wskaźnikowej
IGF	<i>Indicative Goodness of Fit</i> – miara dopasowania modelu do wariogramu empirycznego
<b>K</b>	macierz kowariancji pomiędzy wartościami zmierzonymi w punktach pomiarowych
m	stała średnia lokalna na badanym obszarze
M	lasy mieszane
m( <b>x</b> )	średnia lokalna w sąsiedztwie punktu <b>x</b>
$m_{+h}$	średnia wartość na początku wektora <b>h</b>
$m_{-h}$	średnia wartość na końcu wektora <b>h</b>
$m_{p-k}$	miąższość warstwy gleby, dla której były obserwowane podwyższone wartości podatności magnetycznej, spowodowane zanieczyszczeniem antropogenicznym
$m_U$	stała średnia lokalna zmiennej dodatkowej na badanym obszarze
$m_U(\mathbf{x})$	średnia lokalna zmiennej dodatkowej w sąsiedztwie punktu <b>x</b>
$m_Z$	stała średnia lokalna zmiennej głównej na badanym obszarze
$m_Z(\mathbf{x})$	średnia lokalna zmiennej głównej w sąsiedztwie punktu <b>x</b>
N	ilość par punktów pomiarowych

**Tabela Z3.2. Lista przyjętych w pracy oznaczeń, w kolejności alfabetycznej**

**Table Z3.2. List of symbols used in the thesis, in alphabetical order**

<b>Symbol</b>	<b>Znaczenie</b>
$n(j)$	ilość klas dla j-tej struktury
Of	podpoziom organiczny fermentacyjny
Of/Oh	oznaczenie stosowane w przypadku, gdy miąższość podpoziomu Oh była zbyt mała i w analizach rozpatrywano go łącznie z podpoziodem Of.
Oh	podpoziom organiczny humusowy
Ol	podpoziom organiczny ściółki
$P(i)$	ilość par dla i-tej klasy
$P(\mathbf{x})$	prawdopodobieństwo, że wartości zmiennej przekroczą wartość progową $C_{próg}$
$R(\mathbf{x})$	wartość reszt – różnica zmierzonej wartości i średniej lokalnej
$s$	współczynnik liniowego modelu koregionalizacji
$T_s$	wartości progowe
$u$	współczynnik liniowego modelu koregionalizacji
$U(\mathbf{x})$	wartość zmiennej dodatkowej zmierzona w punkcie $\mathbf{x}$
$U(\mathbf{x}+\mathbf{h})$	wartość zmiennej dodatkowej zmierzona w punkcie $\mathbf{x}+\mathbf{h}$
$v$	wagi kokrigingu
$Var$	wariancja
$w$	wagi krigingu
$\mathbf{x}$	położenie na badanej powierzchni
$Z(\mathbf{x})$	wartość zmiennej głównej zmierzona w punkcie $\mathbf{x}$
$Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})$	wartość zmiennej głównej zmierzona w punkcie $\mathbf{x}+\mathbf{h}$
$Z_{est}(\mathbf{x})$	wartość zmiennej głównej szacowana w punkcie $\mathbf{x}$
$\beta_0$	stały współczynnik regresji
$\beta_k$	stały współczynnik regresji
$\gamma(\mathbf{h})$	wartość semiwariancji
$\gamma_{exp}(i)$	semiwaniancja eksperymentalna
$\gamma_L(\mathbf{h})$	semiwaniancja wartości logarytmowanych
$\gamma_M(\mathbf{h})$	semimadogram
$\gamma_{mod}(i)$	semiwaniancja z modelu
$\gamma_R(\mathbf{h})$	semirodogram
$\gamma_U(\mathbf{h})$	model wariogramu zmiennej dodatkowej
$\gamma_Z(\mathbf{h})$	model wariogramu zmiennej głównej
$\gamma_{ZU}(\mathbf{h})$	model wariogramu krzyżowego
$\varepsilon$	zmienna o średniej zero i wariancji $\sigma$
$\kappa$	objętościowa podatność magnetyczna
$\kappa_{3cm}$	wartości podatności magnetycznej na głębokości 3 cm w profilu glebowym
$\kappa_{5cm}$	wartości podatności magnetycznej na głębokości 5 cm w profilu glebowym
$\kappa_{max}$	maksymalna wartość podatności magnetycznej w profilu glebowym
$\kappa_{Ol-}$	podatność magnetyczna mierzona bez podpoziomu organicznego ściółki Ol
$\kappa_{Ol+}$	podatność magnetyczna mierzona bez usuwania podpoziomu organicznego ściółki Ol
$\mu$	mnożnik Lagrange'a
$\rho(\mathbf{h})$	korelogram
$\sigma^2$	wariancja
$\sigma^2(\mathbf{x})$	wariancja krigingu
$\chi$	masowa podatność magnetyczna