ACTA AGROPHYSICA

Bogusław Usowicz, Mieczysław Hajnos,
Zofia Sokołowska, Grzegorz Józefaciuk,
Grzegorz Bowanko, Jan Kossowski

PRZESTRZENNA ZMIENNOŚĆ FIZYCZNYCH I CHEMICZNYCH WŁAŚCIWOŚCI GLEBY W SKALI POLA I GMINY

103

Instytut Agrofizyki
im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
w Lublinie

Rozprawy i Monografie
2004 (3)

Komitet Redakcyjny

Redaktor Naczelny
Ryszard T. Walczak, czł. koresp. PAN

Zastępca Redaktora Naczelnego
Józef Horabik

Sekretarz Redakcji
Wanda Woźniak

Rada Redakcyjna
Tomasz Brandyk, czł. koresp. PAN - przewodniczący

Ryszard Dębicki
Bohdan Dobrzański
Danuta Drozd
Franciszek Dubert
Tadeusz Filipek
Józef Fornal
Jan Gliński, czł. rzecz. PAN
Grzegorz Józefaciuk
Eugeniusz Kamiński
Andrzej Kędziora
Tadeusz Kęsik
Krystyna Konstankiewicz
Janusz Laskowski
Jerzy Lipiec
Piotr P. Lewicki
Stanisław Nawrocki, czł. rzecz. PAN
Edward Niedźwiecki
Viliam Novák, Słowacja
Josef Pecen, Czechy
Tadeusz Przybysz
Stanisław Radwan, czł. koresp. PAU
Jan Sielewiesiuk
Witold Stępniewski
Zbigniew Ślipek
Bogusław Szot

Opiniował do druku
prof. dr hab. Ryszard Dębicki

Adres redakcji

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, P.O. Box 201
20-290 Lublin 27, tel. (0-81) 744-50-61, e-mail: editor@demeter.ipan.lublin.pl
http: //www.ipan.lublin.pl

Publikacja indeksowana przez
Polish Scientific Journals Contents - Life Sci. w sieci Internet
pod adresem http://www.psjc.icm.edu.pl

Pracę wykonana w ramach projektu badawczego No. 6 P06H 029 20 finansowanego
przez Komitet Badań Naukowych w latach 2001-2003

© Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 2004

ISSN 1234-4125

Wydanie I. Nakład 200 egz. Ark. wyd. 7,0
Skład komputerowy: Bogusław Usowicz
Druk: Drukarnia *ALF-GRAF*, ul. Kościuszki 4, 20-006 Lublin

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP 5

1.1. Cel pracy 6

2. METODY GEOSTATYSTYCZNE 6

2.1. Wprowadzenie 6
2.2. Semiwariogram 7
2.3. Kriging 11

3. OBIEKT I METODYKA BADAŃ 13

3.1. Położenie obiektu badań 13
3.2. Charakterystyka klimatu (wybrane cechy) 15
3.3. Warunki atmosferyczne podczas okresu wegetacyjnego 2002 w rejonie badań terenowych 17
3.4. Rozpatrywane parametry i metody ich określania 22
3.5. Gęstość i wilgotność gleb 24
3.6. Skład granulometryczny gleb 25
3.6.1. Zasada metody 25
3.6.2. Oznaczanie składu granulometrycznego gleb 25
3.6.3. Wyznaczenie czasu pomiaru areometrem 26
3.6.4. Wykonanie analizy składu granulometrycznego 26
3.7. Zawartość węgla organicznego w glebach 27
3.7.1. Wykonanie pomiaru zawartości węgla organicznego w glebie 28
3.8. Odczyn i kwasowość gleb 29
3.8.1. Oznaczanie odczynu gleb 29
3.8.2. Wykonanie pomiarów odczynu gleb mineralnych 30
3.9. Pojemność jonowymienna gleby 31
3.9.1. Pomiary pojemności kationowymiennej gleby 32
3.9.2. Pomiar PWK badanych gleb 33
3.10. Normy i standardy 34

4. WYNIKI 36

4.1. Wyniki analizy statystycznej 36
4.2. Wyniki analizy korelacyjnej 39
4.3. Wyniki analizy geostatystycznej 53
4.4. Estymacja map i ich wstępna analiza 57
4.5. Wykorzystanie map 77

5. PODSUMOWANIE 78

6. PIŚMIENNICTWO 81

7. STRESZCZENIE 86

8. SUMMARY 88

1. WSTĘP

Zmienność przestrzenna cech środowiska glebowego (w sensie opisu matematyczno-fizycznego) jest – jak dotąd – najmniej poznana. Równocześnie nie jest wystarczająco rozróżniana naturalna i antropogeniczna składowa zmienności przestrzennej gleby. Do tej ostatniej należy zaliczyć między innymi nadmierne zagęszczenie gleby w obrębie warstwy ornej i poniżej niej, będące ubocznym skutkiem stosowania maszyn rolniczych, w istotny sposób wpływające na hydrofizyczne, termiczne i powietrzne stosunki w glebie. Podobnie jest z właściwościami chemicznymi gleby, w tym jej odczynem (pH) i pojemnością kationowymienną. Konsekwencją nieuwzględnienia zmienności przestrzennej środowiska glebowego, a zatem warunków wzrostu i rozwoju roślin może być nieracjonalność zabiegów uprawowych (niedostosowanych do panujących warunków), mniej niż optymalny rozwój roślin, znaczące straty plonu, nadmierne koszty nawożenia i wapnowania gleby, długotrwała retencja składników chemicznych, ich uwalnianie w postaci gazów lub soli, itd., wykazywane w badaniach prowadzonych między innymi w USA, Szwecji, Wielkiej Brytanii, Australii, a także w Polsce [1,2,12,16,29,30,32,35,36,37,53,56,57,61,63,66,71,73,95-98,100,105,111]. Należy podkreślić, że badanie przestrzennej zmienności fizycznych i chemicznych właściwości gleby leży u podstaw precyzyjnego rolnictwa, aktualnie propagowanego i wdrażanego w najbardziej gospodarczo rozwiniętych krajach.

W odróżnieniu od dotychczasowych badań prowadzonych w Polsce nad wpływem właściwości fizycznych i chemicznych gleby na plonowanie roślin uprawnych (prowadzonych z reguły na jednolicie przygotowanych poletkach doświadczalnych i przy odnoszeniu wyników do pola stanowiącego jednorodny obiekt), proponowane jest inne podejście metodyczne do tego zagadnienia, uwzględniające naturę środowiska pola uprawnego. Polega ono na określaniu zmienności przestrzennej właściwości fizycznych i chemicznych gleby oraz plonowania roślin na polach, przy liczbie i usytuowaniu przejazdów maszyn rolniczych wynikającym jedynie ze sposobu uprawy oraz nawożenia. Pozwoli to ocenić rzeczywiste (a nie potencjalne) zmiany właściwości gleby w wyniku stosowania maszyn rolniczych przy zabiegach uprawowych i pielęgnacyjnych na danym polu. Naturalna zmienność przestrzenna właściwości fizycznych i chemicznych gleby określona zostanie w oparciu o pomiary na polu nieuprawianym (wieloletni ugór).

Rodzaje gleb (z uwzględnieniem ich genezy i podstawowych cech) w skali kraju, regionu lub danej jednostki administracyjnej dokumentowane są na mapach glebowych o różnym stopniu generalizacji [8,22,21,67,85,87,89,91,101], a także

– choć w mniejszym zakresie – poprzez banki danych [28,42,90]. Pozwalają one wnioskować o większej lub mniejszej zmienności glebowej na danym obszarze. Zmienność właściwości gleby w obrębie pola uprawnego, mimo iż występuje [3,94-98], jest często niedoceniana nie tylko przez rolników, ale i naukę. Z reguły, gleba na danym polu traktowana jest jako homogeniczna, co pozwala na ograniczenie badania jej cech fizycznych i chemicznych do jednego punktu pomiarowego, a jednocześnie sugeruje ujednolicenie wszelkich zabiegów agrotechnicznych na tym polu. Podejście takie sprawia, iż w zakresie badań zmienności przestrzennej cech gleby – jak dotąd – nie ma znaczących opracowań naukowych. Najmniej poznana jest zmienność przestrzenna właściwości środowiska glebowego w sensie opisu matemetyczno-fizycznego, a ponadto nie jest wystarczająco rozróżniana naturalna i antropogeniczna składowa zmienności przestrzennej gleb [12,48, 63,72,99,104].

Wśród cech gleby można wyróżnić cechy stosunkowo stabilne (mało zmienne w czasie) oraz dynamiczne, zmieniające się wraz z wystąpieniem czynników zewnętrznych (uprawa gleby, warunki meteorologiczne). Stosunkowo stabilnymi cechami gleby są skład granulometryczny i skład mineralogiczny; do zmiennych w czasie należy pH czy zawartość materii organicznej (zwłaszcza na polach uprawnych), a jako przykład cechy o dużej dynamice można wymienić wilgotność gleby.

1.1. Cel pracy

Celem pracy było zbadanie i opisanie zmienności przestrzennej właściwości gleby (naturalnej i antropogenicznej) w skali pola i gminy, określenie jej wielkości i znaczenia jako czynnika różnicującego warunki wzrostu i plonowania roślin uprawnych, a także wyznaczenie obszarów wymagających zróżnicowanej uprawy gleby, nawożenia, siewu itp. w oparciu o analizę zmienności przestrzennej podstawowych właściwości fizycznych i chemicznych gleby.

2. METODY GEOSTATYSTYCZNE

2.1. Wprowadzenie

Geostatystyka reprezentuje metodologię, która pozwala na analizę przestrzenną czy też czasową skorelowanych danych. Podstawowym jej narzędziem jest analiza wariogramów. Wiąże się ona z badaniem funkcji wariogramu określonej zmiennej (wielkości fizycznej czy też badanej cechy). Funkcja wariogramu z określonymi parametrami (tj. wartością samorodka, progiem i zakresem zależ-

ności), przedstawia zachowanie badanej zmiennej zregionalizowanej [12-17, 29,30,79,84], a tym samym pozwala nam wnioskować o obszarach, które nie są reprezentowane przez jakiekolwiek dane pomiarowe [1-6,19,34-37,62,88].

W badaniach naukowych szczególną uwagę należy zwrócić na metodykę prowadzenia pomiarów, w tym, aby otrzymane wyniki były reprezentatywne dla badanego obiektu zarówno w odniesieniu do określonej przestrzeni jak i zmienności w czasie. Rzeczywiste obiekty glebowe badane w naturalnych warunkach wygodnie jest traktować jako układy powiązane z otoczeniem, dające się opisać za pomocą odpowiednich funkcji czasu lub też będące funkcjami czasu i współrzędnych przestrzennych. Przy nieznanej (na ogół) w pełni strukturze fizycznej badanych układów, można analizować ich reakcje oraz kontakty z otoczeniem (wejścia, wyjścia) w kategoriach stacjonarnych procesów losowych, bądź też traktować je jako formę współzależności pól losowych. Metody statystyczne szeroko stosowane do opisu obiektu glebowego już na początku zakładają, że obserwacje są niezależne od siebie, co stanowi przeszkodę w dokładnym ich opisie i analizie. W badaniach środowiska mamy do czynienia z obserwacjami, które ze swej natury są zależne. Zależność ta jest interesująca sama w sobie (z poznawczego punktu widzenia). W takim przypadku, podstawowe znaczenie w badaniach zmienności parametrów glebowych mają wybrane metody analizy pól losowych, na których opiera się między innymi aparat matematyczny geostatystyki. Wiemy dobrze, że nasza wiedza o zjawisku czy badanych cechach ośrodka jest fragmentaryczna, gdyż odnosi się do obszarów, a raczej punktów, które zostały opróbkowane. Nie wiemy, co się dzieje w obszarze pomiędzy punktami pomiarowymi. Potrzeba poznania tych obszarów zaowocowała powstaniem nowej dziedziny nauki – geostatystyki.

2.2. Semiwariogram

Geostatystyka bazuje na założeniu (potwierdzonym w wielu obserwacjach), że obok punktu, do którego przypisana jest określona wartość pewnej zmiennej, występują punkty o podobnych wartościach, a przez to wartości te muszą być ze sobą skorelowane. Podstawą obliczeń tej metody jest funkcja wariogramu, a dokładniej połowa wartości oczekiwanej różnic wartości $Z(x)$ zmiennej w punkcie x i wartości $Z(x+h)$ w punkcie oddalonym od niego o wektor h. Semiwariogram przedstawia zatem przestrzenne lub czasowe zachowanie danej zmiennej, noszącej też nazwę zmiennej „zregionalizowanej". Zmienna ta wykazuje aspekt losowy, który uwzględnia lokalne nieprawidłowości oraz aspekt strukturalny, który odzwierciedla wieloskalowe tendencje zjawiska (trend [31]). Analiza zmiennej

polega na identyfikacji struktury zmienności. Można wyróżnić trzy fazy analizy: wstępne badanie zebranych danych i wykonanie oceny podstawowych statystyk, obliczenie wariogramu empirycznego rozważanej zmiennej zregionalizowanej oraz dopasowanie modelu matematycznego do przebiegu wariogramu empirycznego. Wymagana jest przy tym znajomość pierwszych dwóch momentów statystycznych funkcji losowych przypisanych do danego zjawiska: momentu pierwszego (średniej) [71],

$$E[Z(x)] = m(x) \tag{1}$$

i drugiego (wariancji, kowariancji, semiwariogramu – semiwariancji)

$$Var\{Z(x)\} = E\left\{[Z(x) - m(x)]^2\right\}. \tag{2}$$

Jeśli zmienne losowe $Z(x_1)$ $Z(x_2)$ mają wariancję, to również mają kowariancję, która jest funkcją położenia x_1, x_2:

$$C(x_1, x_2) = E\{[Z(x_1) - m(x_1)] \cdot [Z(x_2) - m(x_2)]\} = E\{Z(x_1) \cdot Z(x_2)\} - m(x_1) \cdot m(x_2) \tag{3}$$

Semiwariogram $\gamma(x_1,x_2)$ jest definiowany jako połowa wariancji z różnicy zmiennych losowych $\{Z(x_1) - Z(x_2)\}$ [71,103,104]:

$$\gamma(x_1, x_2) = \frac{1}{2} Var\{Z(x_1) - Z(x_2)\}. \tag{4}$$

Wymaga się również, aby badany proces był stacjonarny, tzn. nie zmieniał swoich właściwości przy zmianie początku skali czasowej lub skali przestrzennej. W przypadku spełnienia stacjonarności funkcja losowa $Z(x)$ jest określana jako stacjonarna drugiego rzędu. Ponadto oczekuje się, że [71]:
- wartość oczekiwana istnieje i nie zależy od położenia x

$$E[Z(x)] = m, \qquad \forall x \tag{5}$$

- dla każdej pary zmiennych losowych $\{Z(x),Z(x+h)\}$ istnieje kowariancja, zależna tylko od wektora separacji h

$$C(h) = E\{Z(x+h) \cdot Z(x)\} - m^2, \qquad \forall x \tag{6}$$

- stacjonarność kowariancji implikuje stacjonarność wariancji i semiwariogramu

$$Var\{Z(x)\} = E\{[Z(x)-m]^2\} = C(0) \qquad \forall x. \tag{7}$$

Można wykazać, że istnieje powiązanie kowariancji z semiwariogramem [71]:

$$\begin{aligned} 2C(h) &= 2E\{Z(x+h\cdot Z(x))\} - 2m^2 = \left[E\{Z(x+h)^2\} - m^2\right] + \left[E\{Z(x)^2\} - m^2\right] \\ &- \left[E\{Z(x+h)^2\} - 2E\{Z(x+h)\cdot Z(x)\} + E\{Z(x)^2\}\right] \\ 2C(h) &= 2C(0) - 2\gamma(h) \\ C(h) &= C(0) - \gamma(h) \end{aligned} \tag{8}$$

- dla wszystkich wartości wektora h różnica $\{Z(x+h) - Z(x)\}$ ma skończoną wariancję i nie zależy od x

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} Var\{Z(x+h) - Z(x)\} = \frac{1}{2} E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\}, \qquad \forall x. \tag{9}$$

Kiedy wartość wektora h równa jest zero, to wartość semiwariancji jest również równa zero. Semiwariogram jest symetryczny względem h:

$$\gamma(h) = \gamma(-h). \tag{10}$$

Eksperymentalny semiwariogram $\gamma(h)$ dla odległości h obliczany jest z równania [71,103]:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \tag{11}$$

gdzie: $N(h)$ oznacza liczbę par punktów odległych o h. Równanie to ilustruje zróżnicowanie odchyleń wartości danej cechy czy wielkości fizycznej z od równania trendu w zależności od odległości między punktami pomiarowymi. Wyróżniane są trzy charakterystyczne parametry dla semiwariogramu: efekt samorodka, próg i zakres.

W przypadku gdy semiwariogram jest wzrastającą funkcją nie od zera a od pewnej wartości, wartość ta nazywana jest efektem samorodka. Wyraża ona zmienność badanej wielkości fizycznej przy skali mniejszej niż przedział próbkowania (może być też spowodowana niską dokładnością pomiaru). Osiągnięta przez funkcję semiwariogramu wartość, przy której nie obserwuje się dalszego wzrostu funkcji (w przybliżeniu równa wariancji próby) nazywana jest progiem,

natomiast przedział odległości od zera do osiągnięcia przez semiwariogram 95% wartości stałej nazywany jest zakresem. Ten ostatni wyraża największą odległość, przy której próbkowane wartości są ze sobą skorelowane.

Do empirycznie wyznaczonych semiwariogramów dopasowywane są modele matematyczne [27,71]:

- model liniowy

$$\gamma(h) = c_0 + wh \tag{12}$$

- model sferyczny

$$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c \cdot \left[1.5\frac{|h|}{a} - 0.5\left(\frac{|h|}{a}\right)^3 \right] & \text{jeśli } |h| \le a \\ c & h > a \end{cases}, \tag{13}$$

- model wykładniczy (eksponencjalny)

$$\gamma(h) = c_0 + c \cdot \left[1 - e^{-\frac{|h|}{a}} \right] \qquad |h| > 0 \tag{14}$$

- model Gaussa

$$\gamma(h) = c \cdot \left[1 - e^{-\frac{3|h|^2}{a^2}} \right] \qquad |h| > 0 \tag{15}$$

w których: c_0 – wartość samorodka, w – współczynnik kierunkowy prostej, c – semiwariancja strukturalna, $c_0 + c$ – wysycenie, a – zakres autokorelacji, h – wielkość kroku próbkowania. Przy dopasowaniu modelu do empirycznych danych korzysta się najczęściej z metody najmniejszych kwadratów.

Otrzymane funkcje matematyczne semiwariogramów mogą być wykorzystywane do analizy przestrzennej (czasowej) autokorelacji lub do wizualizacji poprzez estymację rozpatrywanej wielkości fizycznej w przestrzeni metodą krigingu [25,71].

2.3. Kriging

Szacowanie wartości w miejscach nieopróbkowanych może być prowadzone za pomocą metody estymacji zwanej metodą krigingu. Metoda ta daje najlepsze nieobciążone oszacowanie wartości punktowych lub blokowych badanej zmiennej regionalizowanej $Z(x)$. Otrzymujemy również minimalną wariancję podczas procesu estymacji za pomocą tej metody. Wartości wariancji krigingu zależą od położenia próbek względem szacowanej lokalizacji, od wag przypisanych próbkom oraz od parametrów modelu semiwariogramu.

Estymatorem krigingu jest równanie liniowe wyrażone wzorem [103]:

$$z^*(x_o) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i z(x_i) \tag{16}$$

gdzie N jest liczbą pomiarów, $z(x_i)$ – zmierzona wartość w punkcie x_i, $z^*(x_o)$ – wartość estymowana w punkcie estymacji x_o, λ_i – wagi. Jeśli $z(x_i)$ jest realizacją funkcji losowej $Z(x_i)$ to estymator funkcji losowej można zapisać jako:

$$Z^*(x_o) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i Z(x_i). \tag{17}$$

Wagi przydzielone próbkom są nazywane współczynnikami krigingu. Ich wartości zmieniają się odpowiednio do tego, jak zmienia się obraz opróbkowania i jak zachodzą przestrzenne zmiany wyrażone przez zmienną podlegającą szacowaniu. Przydzielone próbkom wagi są tak dobierane, że średniokwadratowy błąd jest minimalny. Błąd ten nazywany jest wariancją krigingu σ_k^2 i może być obliczany dla każdego obrazu opróbkowania i konfiguracji obszaru estymacji. Zasadniczym problemem w określeniu funkcji losowej jest znalezienie wag λ_i. Wagi te są wyznaczane z układu równań po uwzględnieniu warunku nieobciążalności estymatora:

$$E\{Z^*(x_o) - Z(x_o)\} = 0 \tag{18}$$

i jego efektywności:

$$\sigma_k^2(x_o) = Var\{Z^*(x_o) - Z(x_o)\} = \min. \tag{19}$$

Po podstawieniu estymatora średniej ważonej do wartości oczekiwanej otrzymujemy:

$$E\{Z^*(x_o)-Z(x_o)\}=\sum_i \lambda_i E\{Z(x_i)\}-E\{Z(x_o)\}=m\sum_i \lambda_i - m=0. \quad (20)$$

Jak widać z powyższego równania, wartość oczekiwana jest równa zero kiedy:

$$\sum_{i=1}^{N} \lambda_i = 1. \quad (21)$$

Natomiast podstawiając do wariancji estymator funkcji losowej można wykazać, że:

$$\sigma_k^2(x_o)=\sum_i\sum_j \lambda_i\lambda_j C(x_i,x_j)+C(0)-2\sum_i \lambda_i C(x_i,x_o) \quad (22)$$

lub (poprzez semiwariancję):

$$\sigma_k^2(x_o)=-\sum_i\sum_j \lambda_i\lambda_j \gamma(x_i,x_j)+2\sum_i \lambda_i \gamma(x_i,x_o). \quad (23)$$

Minimalizacji wariancji można dokonać techniką Lagrangina, w których N równań różniczek cząstkowych jest równych zero:

$$\frac{\partial\left[\sigma_k^2(x_o)-2\mu\sum_i \lambda_i\right]}{\partial\lambda_i}=0, \quad (24)$$

gdzie μ oznacza mnożnik Lagrangina. Po zróżniczkowaniu i redukcji równania można dojść do rozwiązania:

$$-2\sum_j \lambda_j \gamma(x_i,x_j)+2\gamma(x_i,x_o)-2\mu=0. \quad (25)$$

Uwzględniając warunek na sumę wag krigingu otrzymamy układ równań:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{N} \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_i, x_o) \;\; i = 1 do N \\ \sum_{i=1}^{N} \lambda_i = 1 \end{cases} \tag{26}$$

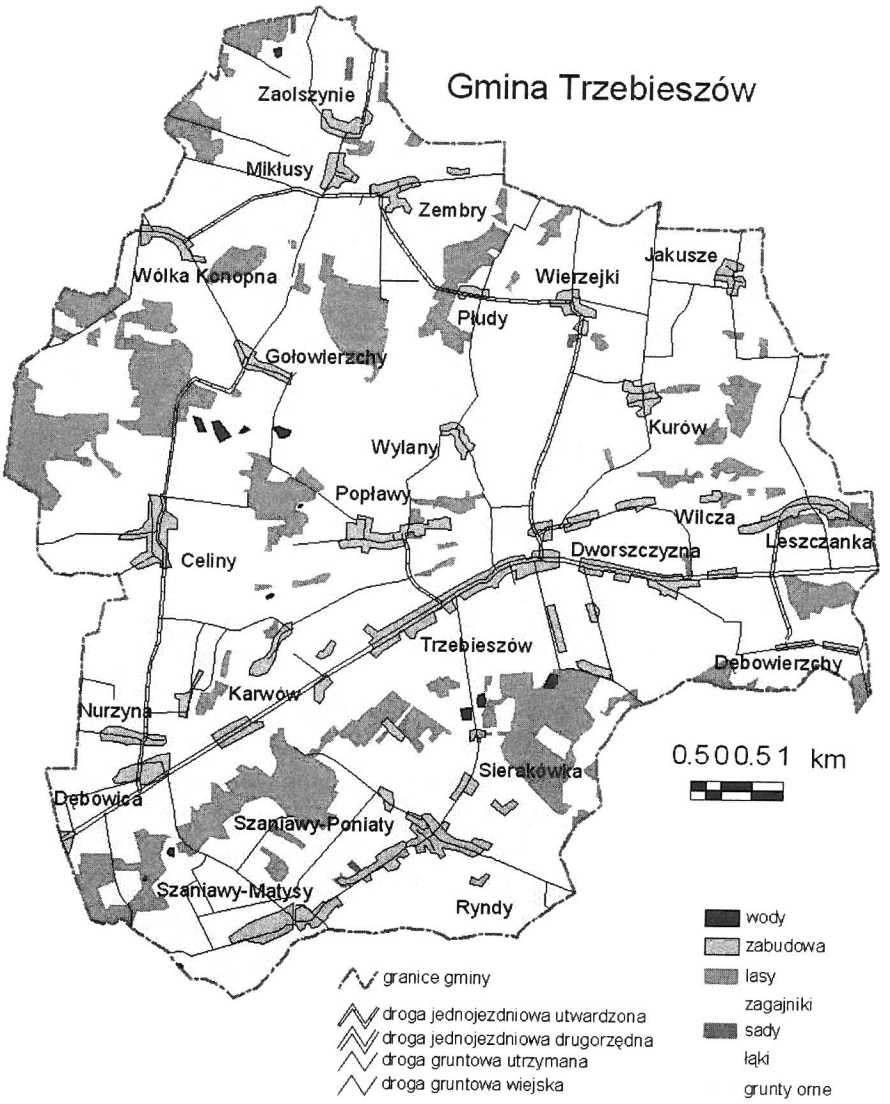
Rozwiązując powyższy układ równań wyznaczamy wagi krigingu – λ_i. Wagi te pozwalają wyznaczyć również estymowana funkcje losową Z^* i jej wariancję ze wzoru:

$$\sigma_k^2(x_o) = \mu + \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \gamma(x_i, x_o). \tag{27}$$

3. OBIEKT I METODYKA BADAŃ

3.1. Położenie obiektu badań

Gmina Trzebieszów (o powierzchni 140 km^2) położona jest w środkowej części Równiny Łukowskiej, stanowiącej jeden z mezoregionów Niziny Południowopodlaskiej [70]. Równina Łukowska obejmuje około 2570 km^2 powierzchni [49], rozpościerającej się (w kształcie pasa o różnej szerokości) we wschodniej i południowowschodniej części tej Niziny. Równinę otaczają: Wysoczyzna Siedlecka (od strony północno-zachodniej), Wysoczyzna Żelechowska (od zachodu), Pradolina Wieprza (od południa), Podlaski Przełom Bugu (w części północnowschodniej), a od strony wschodniej Zaklęsłość Łomazka, zaliczana już do innego makroregionu – Polesia Zachodniego. W aktualnym podziale administracyjnym, gmina Trzebieszów wchodzi w skład powiatu łukowskiego i województwa lubelskiego (rys. 1).



Rys. 1. Mapa przeglądowa gminy Trzebieszów
Fig. 1. Map of Trzebieszów commune

Teren gminy, jak i całej Równiny Łukowskiej jest płaski, o deniwelacjach nieprzekraczających na ogół 10 m, z płytkimi i często podmokłymi dolinami rzek (Krzna Południowa i Północna). Równinę budują w znacznym procencie rozmyte pokrywy sandrowe, toteż przeważają tu gleby wytworzone z piasków luźnych, słabogliniastych, naglinowych i gliniastych [91].

W opisie warunków środowiskowych gminy Trzebieszów, należy podkreślić wybitnie rolniczy jej charakter. Użytki rolne obejmują 80,5% powierzchni gminy, z czego na grunty orne przypada 62,3%, a na użytki zielone 18,2% powierzchni [108]. Lasy zajmują tylko 13,5% powierzchni, przy czym największe kompleksy leśne znajdują się w części południowo-wschodniej i zachodniej gminy.

3.2. Charakterystyka klimatu (wybrane cechy)

W literaturze klimatologicznej brak jest jak dotąd opracowania poświęconego klimatowi Niziny Południowopodlaskiej, jak również położonych w jej obrębie mezoregionów, bądź miejscowości. Powodem jest zapewne niewielka liczba stacji meteorologicznych zbierających dane w pełnym zakresie (pomijając posterunki opadowe), jak i to, że Nizina ta – jako makroregion fizycznogeograficzny o określonej odrębności krajobrazowej wobec sąsiednich regionów (Nizina Północnopodlaska, Polesie Lubelskie, Wyżyna Lubelska, Nizina Południowomazowiecka), pod względem cech klimatu odrębności właściwie nie wykazuje.

W podziałach Polski na regiony klimatyczne dokonanych przez uznanych autorów (głównie w oparciu o stosunki termiczne i opadowe), teren Niziny Południowopodlaskiej leży w obrębie o wiele większych obszarowo jednostek: według Romera [80] – rozległej Krainie Chełmsko-Podlaskiej, według Wiszniewskiego i Chełchowskiego [107] – w Regionie Mazowiecko-Podlaskim, a Okołowicza [69] – w krainie 2 Regionu Mazowiecko-Podlaskiego. W podziale na dzielnice rolniczo-klimatyczne Gumińskiego [33], Nizina Południowopodlaska znalazła się wraz z Polesiem Lubelskim i Niziną Północnopodlaską w Dzielnicy IX Wschodniej. Również w regionalizacjach opracowanych na podstawie innych kryteriów – struktury bilansu cieplnego [75], czy częstości występowania określonych typów pogody [109] – wykazywano brak zróżnicowania klimatycznego obszaru Niziny Południowo- i Północnopodlaskiej oraz Polesia Lubelskiego. Warto jednak dodać, że zachodnia granica Niziny Południowopodlaskiej stanowi w przybliżeniu granicę regionów (lub podregionów) klimatycznych wydzielonych przez Paszyńskiego i Krawczyk [75] oraz Okołowicza [69], a na odcinku Wysoczyzny Siedleckiej – również Wosia [109]. W jednej tylko regionalizacji Polski – na regiony termiczne [82,83] – wyodrębniony został obszar odpowiadający w przybliżeniu Nizinie Południowopodlaskiej jako oddzielny Region Siedlecki.

Na tle innych regionów Polski, obszar obejmujący Nizinę Mazowiecko-Podlaską oraz Wyżynę Lubelską wyróżnia się zwiększonym kontynentalizmem klimatu [7,46,47]. Chociaż – jak cała Polska – pozostaje pod przeważającym wpływem cyrkulacji zachodniej, a masą powietrza napływającą najczęściej jest

powietrze polarnomorskie (około 65% dni w roku) [9,43], to jednocześnie notowano tu największą liczbę dni z typem sytuacji synoptycznej antycyklonalnej (wyżowej) przy zaleganiu masy powietrza kontynentalnego [50,51]. Uwarunkowane głównie cyrkulacją atmosfery cechy świadczące o zwiększonym kontynentaliźmie klimatu tego obszaru to przede wszystkim duże, należące do najwyższych w Polsce, wartości amplitudy rocznej temperatury powietrza (kontynentalizm termiczny), a także znaczna przewaga opadów letnich nad zimowymi (kontynentalizm pluwialny) [43,54,80].

Pod względem warunków solarnych – drugiego obok cyrkulacji atmosferycznej podstawowego czynnika kształtującego klimat – obszar Niziny Południowopodlaskiej oraz sąsiednie regiony (zwłaszcza Polesie i Wyżyna Lubelska) należą do najbardziej uprzywilejowanych w Polsce. Notowane są tu jedne z najwyższych sum rocznych usłonecznienia rzeczywistego (średnio ponad 1600 godzin) [18,55,65], jak i promieniowania słonecznego całkowitego (rzędu 3700-3800 $MJ \cdot m^{-2}$) [64,74,77]. Jeszcze wyraźniej obszar ten wyróżnia się przy rozpatrywaniu sum całkowitego promieniowania słonecznego w okresie wegetacyjnym [78], gdzie w średnich wieloletnich wynoszą one ponad 3100 $MJ \cdot m^{-2}$.

Warunki termiczne, będące wypadkową różnych czynników klimatotwórczych (geograficznego, astronomicznego, solarnego i cyrkulacyjnego), charakteryzowane w oparciu o wieloletnie dane dotyczące średniej rocznej oraz średnich miesięcznych i sezonowych wartości temperatury powietrza – są na Nizinie Południowopodlaskiej mało zróżnicowane i zbliżone do występujących w sąsiednich regionach. Wskazywano na to w wielu wcześniejszych opracowaniach [44,45,102,112]. Różnice średnich rocznych wartości temperatury między stacjami położonymi na Nizinie Południowopodlaskiej wynoszą zaledwie 0,4°C, a w poszczególnych miesiącach i porach roku – najwyżej 0,6°C. Średnia roczna temperatura powietrza w regionie wynosi około 7,3°C, przy czym nieco niższe wartości notowano w jego części północnej, a wyższe w części południowej i południowo-zachodniej.

Przebieg roczny temperatury powietrza (także innych elementów meteorologicznych) charakteryzują dane z położonej niemal w centrum regionu i najbardziej dla niego reprezentatywnej stacji w Siedlcach (tab. 1). Wobec znacznych wahań temperatury powietrza z roku na rok, warto zwrócić również uwagę na zakres występowania ich wartości zanotowany w trakcie 50-letniego (1949-1998) ciągu obserwacji. Według tych wieloletnich danych, miesiącem najcieplejszym był lipiec (17,7°C), a najchłodniejszym styczeń (–3,6°C). Dodać jednak należy, że najchłodniejszym miesiącem w poszczególnych latach był nie tylko styczeń

(44% przypadków), ale i luty (34%), grudzień (14%) oraz marzec i listopad (po 4%), a najcieplejszym – obok lipca (62% przypadków) – również czerwiec (16%) i sierpień (22%). Amplituda roczna temperatury powietrza w Siedlcach obliczona ze średnich miesięcznych stycznia i lipca wynosiła 21,3°C, ale z różnic średniej temperatury miesiąca najcieplejszego i najchłodniejszego w poszczególnych latach 23,4°C.

Dane odnośnie rozkładu opadów atmosferycznych w ciągu roku w Siedlcach (tab. 1), wskazują na występowanie najwyższych opadów w miesiącach czerwcu i lipcu (ponad 70 mm), najniższych (poniżej 30 mm) w miesiącach styczeń, luty i marzec, a co za tym idzie – znaczną przewagę opadów letnich (212 mm) nad zimowymi (83 mm). Suma opadów w okresie wegetacyjnym (IV-IX) – 350,9 mm – stanowiła 65,4% sumy rocznej, ale w ciągu rozpatrywanych 50 lat wahała się od 224 do 530 mm.

Zróżnicowanie przestrzenne sum miesięcznych i rocznych opadów na obszarze Niziny Południowopodlaskiej (a zwłaszcza jej części wschodniej) jest małe [45], rzędu 70 mm w sumach opadów rocznych, a do 20 mm w sumach opadów miesięcznych (w średnich wieloletnich). Jako uzupełnienie powyższej charakterystyki stosunków opadowych, w tabeli 2 zestawiono dane odnoszące się bezpośrednio do rejonu przeprowadzonych badań, tj. miejscowości Trzebieszów i jego okolic (z najbliższych posterunków opadowych i stacji meteorologicznych). Wykazują one bardzo niewielkie zróżnicowanie, za wyjątkiem opadów w Międzyrzecu Podlaskim (najwyższych spośród rozpatrywanych miejscowości), które mogą być wynikiem wpływów lokalnych (położenia stacji).

Należy dodać, że wykorzystane w niniejszej pracy dane meteorologiczne z różnych okresów lat 1949-1998 zostały zestawione na podstawie materiałów IMGW (dawniej PIHM) opublikowanych w Rocznikach Meteorologicznych, Miesięcznych Przeglądach Agrometeorologicznych, Atlasie Klimatycznym Polski (zeszyt 2a i 3), Biuletynach Agrometeorologicznych oraz poszczególnych rocznikach Opadów Atmosferycznych.

3.3. Warunki atmosferyczne podczas okresu wegetacyjnego 2002 w rejonie badań terenowych

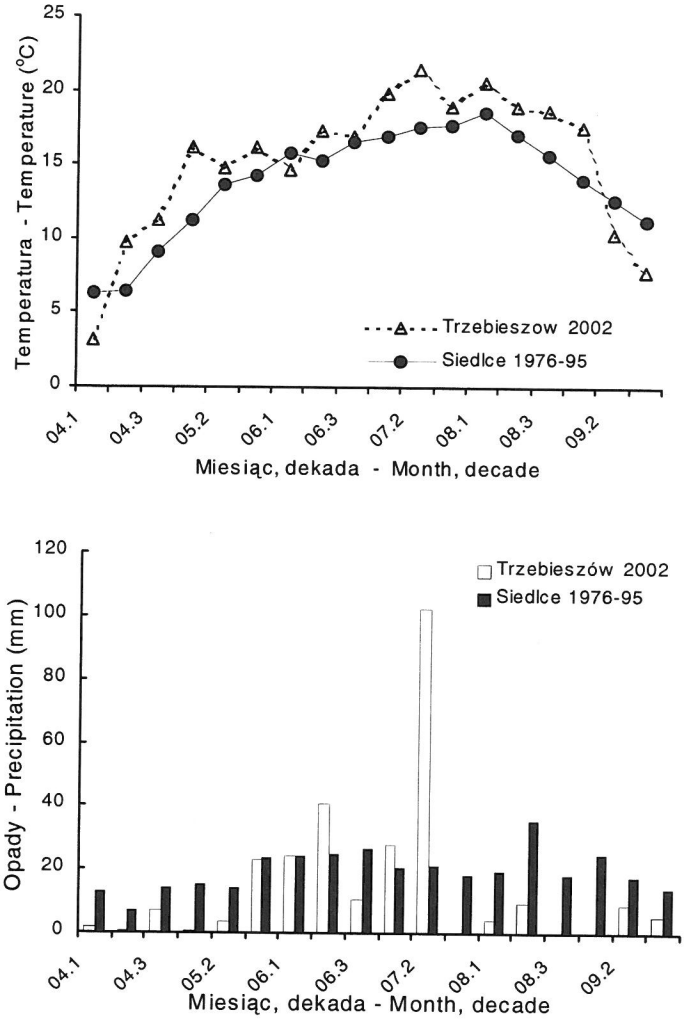
W trakcie prowadzenia badań terenowych prowadzone były własne obserwacje dotyczące przebiegu dwóch elementów meteorologicznych – temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w Trzebieszowie. Temperaturę powietrza rejestrowano za pomocą termografu umieszczonego (na wysokości 2 m) w typowej klatce meteorologicznej, natomiast pomiary wysokości opadu dobowego przy

zastosowaniu standardowego deszczomierza Hellmanna oraz pluwiografu. Uzyskane materiały obserwacyjne pozwalają zorientować się, na ile warunki atmosferyczne w danym roku różniły się od przeciętnych, jaki wpływ wywarły na rozwój i plonowanie roślin uprawnych, a ponadto, stanowiły niezbędny element przy analizie stanu i zróżnicowania przestrzennego wilgotności gleby w dniach jej pomiaru na rozpatrywanych obiektach (wybrane pola).

Przebieg temperatury powietrza oraz rozkład opadów w sezonie 2002 w Trzebieszowie (w oparciu o wartości dekadowe) na tle danych 20-letnich ze stacji Siedlce ilustrują wykresy na rysunku 2. Dodatkowo, dane liczbowe dotyczące Trzebieszowa przedstawiono w tabeli 3.

Sezon wegetacyjny 2002 okazał się jednym z najcieplejszych w minionym półwieczu. Średnia temperatura całego okresu (IV-IX) w Trzebieszowie tylko o 0,5°C była niższa od najwyższej takiej temperatury zanotowanej w ciągu 50-lecia w pobliskich Siedlcach. Za wyjątkiem czerwca i września, średnie miesięczne temperatury powietrza kształtowały się powyżej normy. Suma opadów w okresie wegetacyjnym wyniosła 270 mm i w zestawieniu z wieloletnimi danymi z Siedlec okazała się nie tylko poniżej normy, ale i jedną z najniższych. Mniejsze niż przeciętne opady obserwowano na wiosnę (do drugiej dekady maja włącznie) i od trzeciej dekady lipca do końca września. Liczba dni z opadem $\geq 0{,}1$ mm i $\geq 1{,}0$ mm wynosiła w całym okresie odpowiednio 56 i 34, a najwyższy opad dobowy to 39,3 mm (w dniu 15.VII). Warto przy tym dodać, że spośród pięciu trwających ponad tydzień ciągów dni bezopadowych, jakie zanotowano w sezonie 2002, po dwa wystąpiły w miesiącu maju i lipcu, a najdłuższy z nich, obejmujący aż 30 dni – między 15 sierpnia a 13 września. O ile jednak w miesiącu lipcu ciągi te nie odbiły się zbytnio na stanie uwilgotnienia gleby (z uwagi na przeplatanie się ze znaczącymi opadami głównie o charakterze burzowym), to niedostatek opadów w okresie wiosennym oraz na przełomie sierpnia i września spowodował wystąpienie zjawiska suszy atmosferycznej i glebowej (zwłaszcza na glebach lekkich).

Należy podkreślić, że zebrane dane meteorologiczne, wykorzystane następnie przy charakteryzowaniu warunków atmosferycznych podczas sezonu wegetacyjnego 2002 w rejonie Trzebieszowa, ściśle korespondują z wynikami badań Demidowicza i Łykowskiego [20], dotyczących klimatycznego bilansu wodnego oraz prawdopodobieństwa i zasięgu wystąpienia suszy na obszarze Polski.



Rys. 2. Temperatura powietrza (średnie dekadowe) oraz opady atmosferyczne (sumy dekadowe) podczas okresu wegetacyjnego 2002 w Trzebieszowie w porównaniu do danych 20-letnich z Siedlec

Fig. 2. Air temperature (average for decade) and precipitation (decade sum) during vegetation period 2002 in Trzebieszów as compared to 20 – year data from Siedlce

Tabela 1. Średnie wieloletnie, a także najniższe i najwyższe średnie miesięczne i roczne wartości temperatury powietrza oraz sumy miesięczne i roczne opadów atmosferycznych i usłonecznienia rzeczywistego w Siedlcach

Table 1. Average and extreme (for month and year) values of air temperature, sum of precipitation and sunshine duration in Siedlce

Parametr, okres Parameter, period	Wartość Value	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok Year
Temperatura Temperature (°C) 1949-1998	średnia average	–3,6	–2,8	0,9	7,3	13,1	16,3	17,7	17,1	12,7	7,7	2,6	–1,2	7,3
	najniższa lowest	–14,2	–13,4	–4,9	3,9	9,2	13,9	14,5	14,9	10,2	4,8	–3,4	–8,7	5,5
	najwyższa highest	2,5	4,4	5,9	10,3	15,9	19,9	20,7	20,8	16,2	11,0	6,0	2,7	8,9
Opady Precipitation (mm) 1949-1998	średnia average	24,8	23,5	26,0	35,5	53,1	73,9	71,3	66,5	50,5	37,4	38,7	35,1	536,5
	najniższa lowest	2	1	5	6	14	30	18	3	12	1	8	5	364
	najwyższa highest	59	53	59	91	114	194	179	195	141	180	88	90	721
Usłonecznienie Sunshine duration (godz. – hours) 1984-1998	średnia average	51,5	75,0	117,6	167,4	248,3	233,2	258,6	241,3	135,7	114,7	52,6	35,9	1731,7
	najniższa lowest	17	52	63	121	173	155	188	199	72	64	18	16	1542
	najwyższa highest	87	130	169	222	299	309	396	300	186	179	84	67	1869

Tabela 2. Średnie miesięczne i roczne sumy opadów atmosferycznych (w mm) w latach 1961-80 w Trzebieszowie oraz najbliżej położonych posterunkach opadowych i stacji meteorologicznej w Siedlcach

Table 2. Average (for month and year) sums of precipitation in Trzebieszów, near observation points and in meteorological station Siedlce

Miejscowość Locality	Współrzędne Coordinates	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok Year
Trzebieszów	φ 51° 59' λ 22° 33'	32,7	29,0	27,8	42,0	59,6	67,3	71,3	67,8	42,3	45,7	44,0	36,0	565,4
Łuków	φ 51° 55' λ 22° 22'	24,9	23,0	24,9	43,9	55,9	64,3	81,1	73,2	48,3	48,6	41,6	32,6	562,1
Wólka Kam.	φ 52° 04' λ 22° 31'	38,0	35,1	28,5	42,3	58,9	66,6	74,3	72,8	48,1	46,8	45,6	41,3	597,7
Międzyrzec	φ 51° 59' λ 22° 47'	39,7	36,0	31,8	46,1	61,4	69,8	76,6	73,3	50,7	45,9	47,4	44,5	622,8
Kąkolewnica	φ 51° 54' λ 22° 41'	35,2	33,6	28,6	41,1	56,0	65,3	68,9	58,4	45,9	45,5	45,6	41,5	565,3
Siedlce	φ 52° 11' λ 22° 16'	27,0	25,0	24,4	38,2	56,4	71,1	67,5	68,4	47,6	44,5	43,3	32,7	546,1

Tabela 3. Średnie dekadowe i miesięczne wartości temperatury powietrza oraz dekadowe i miesięczne sumy opadów atmosferycznych w Trzebieszowie podczas okresu wegetacyjnego 2002
Table 3. Average (for decade and month) air temperatures and sums of precipitation in Trzebieszów during vegetation period 2002

Wyszczególnienie Specification		IV	V	VI	VII	VIII	IX
		Temperatura – Temperature (°C)					
Dekada – Decade	I	3,0	16,2	14,6	19,8	20,6	17,6
	II	9,7	14,8	17,3	21,5	19,0	10,3
	III	11,3	16,2	16,9	19,0	18,7	7,8
Miesiąc – Month		8,0	15,7	16,2	20,0	19,4	11,9
		Opady – Precipitation (mm)					
Dekada – Decade	I	1,5	0,4	24,3	27,6	4,4	0
	II	0,5	3,8	40,5	102,2	9,3	9,0
	III	6,8	22,8	10,9	0,1	0	5,5
Miesiąc – Month		8,8	27,0	75,7	129,9	13,7	14,5

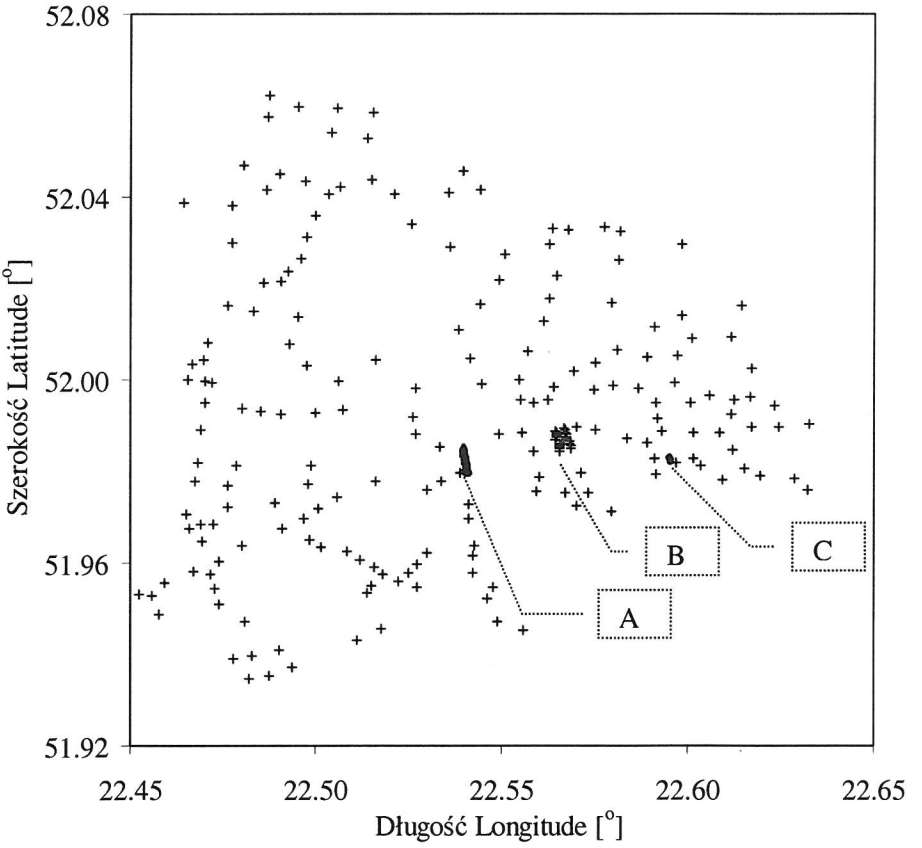
3.4. Rozpatrywane parametry i metody ich określania

Podstawowe dane, rozpatrywane w pracy, pochodziły z pomiarów składu granulometrycznego, pH, materii organicznej i pojemności wymiennej kationów (CEC) w powierzchniowej (1-10 cm) i podornej (30-40 cm) warstwie gleby na polach uprawnych w gminie Trzebieszów. Próbki gleby pobierano do płóciennych woreczków (po około 1,5 kg). Na wybranych obiektach określano również gęstość i wilgotności gleby w warstwie powierzchniowej. Analiz próbek glebowych dokonano metodami powszechnie stosowanymi w gleboznawstwie. Ze względu na przewidywane wykorzystanie wyników badań przez służby rolne i rolników gminy Trzebieszów, metody określania poszczególnych cech gleby zostały opisane szczegółowo w następnych podrozdziałach.

Współrzędne przestrzenne punktów pobierania próbek gleby określano za pomocą globalnego systemu pozycjonowania (Global Positioning System – GPS) oraz nanoszono na mapy pochodne ewidencji gruntów. Rozmieszczenie tych punktów na terenie gminy było nieregularne, natomiast w obrębie pól – w siatce regularnej (rys. 3, 4). Przy wyznaczaniu współrzędnych punktów pomiarowych na terenie gminy (z dokładnością od 1 do 5 m) korzystano z miernika Trimble's GPS GeoExplorer 3. Na rozpatrywanych polach regularną siatkę punktów wyznaczano

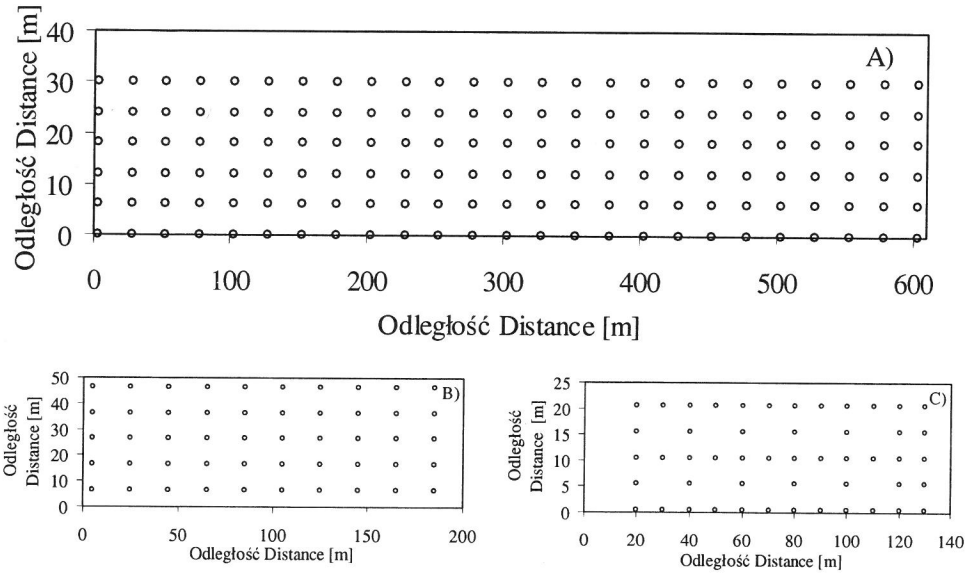
przy użyciu taśmy mierniczej, natomiast współrzędne wybranych punktów reperowych – za pomocą GPS.

Przestrzenny rozkład plonu zbóż analizowano na przykładzie mieszanki zbóż (pole A) i żyta (pole B). Rozkład ten wyznaczano na bazie prób pobieranych z kwadratów o powierzchni 1 m^2, usytuowanych w siatce w miarę równomiernie pokrywającej dane pole. W przypadku pola A było 72 kwadratów, a pola B 30 kwadratów. Rośliny z poszczególnych kwadratów zbierano ręcznie, młócono, a uzyskane ziarno – wiano, suszono i ważono.



Rys. 3. Rozkład punktów pomiarowych na obszarze gminy Trzebieszów. Literami A i B zaznaczono położenie pól uprawnych, literą C – nieużytku

Fig. 3. Position of sampling points in Trzebieszów commune. Abbreviations: A, B location of cultivated fields, C uncultivated field



Rys. 4. Rozkład punktów pomiarowych na polach uprawnych A i B oraz nieużytku C
Fig. 4. Position of sampling points in cultivated fields A, B and in uncultivated field C

Dla każdego obiektu (gmina, pole) określono podstawowe parametry statystyczne, tj. wartość średnią, standardowe odchylenie, współczynnik zmienności (CV), wartość maksymalną i minimalną oraz wartości charakteryzujące rozkład danej cechy tj. skośność i kurtozę. Przestrzenną charakterystykę rozpatrywanych danych przeprowadzono metodami geostatystycznymi. Statystyki, semiwariogramy, estymację badanych cech gleby i ich mapowanie otrzymywano za pomocą programów komputerowych GeoEas, Statistica 6, Variowin 2.21, GS+5 Demo, Surfer 8 Demo i ArcGIS 8.2.

3.5. Gęstość i wilgotność gleb

Wilgotność gleby mierzona była za pomocą miernika reflektometrii domonowo-czasowej (Time Domain Reflectometry – TDR) produkcji Easy Test Ltd., Lublin, Polska [60]. Równocześnie, w tych samych punktach pobierane były próbki gleby do cylinderków o objętości 100 cm^3 i wysokości 5 cm, celem określenia gęstości i wilgotności gleby metodą grawimetryczną. Ten drugi sposób pomiaru posłużył do weryfikacji danych uzyskanych metodą reflektometryczną (TDR) [96]. Próbki glebowe na wilgotność i gęstość z gminy oraz z wybranych pól uprawnych były pobierane wyłącznie z warstwy ornej na wiosnę i w lecie (zaraz po żniwach).

3.6. Skład granulometryczny gleb

3.6.1. Zasada metody

Oznaczenie składu granulometrycznego obejmuje zarówno metody sitowe jak i sedymentacyjne. W przedstawianych badaniach zastosowano metodę sedymentacyjną Bouyoucos'a w modyfikacji Casagrande'a i Prószyńskiego. Metoda ta polega na pomiarze areometrem gęstości zawiesiny glebowej, w odstępach czasu odpowiadających opadaniu kolejnych frakcji cząstek analizowanego materiału glebowego. Procent cząstek obliczany jest z różnicy odczytów na areometrach zanurzonych w zawiesinie glebowej i roztworze poprawkowym. Prószyński modyfikując metodę Bouyoucos'a opracował dla poszczególnych utworów glebowych tablice czasów sedymentacji. Znając zawartość części spławialnych w badanej próbce wybiera się odpowiednią tablicę czasów sedymentacji, z której (po uwzględnieniu temperatury) oznacza się dokładnie procentowy udział poszczególnych frakcji granulometrycznych w analizowanej glebie.

3.6.2. Oznaczanie składu granulometrycznego gleb

W celu przeprowadzenia analizy zawartości części ziemistych (<1 mm) należy odważyć około 40 g gleby (dokładna naważka jest podana na każdym areometrze) powietrznie suchej, przesianej przez sito o średnicy oczek 1 mm, wsypać do zlewki i zalać wodą destylowaną (około 0,5 l). Do zawiesiny dodawany jest peptyzator, np. calgon (metaheksafosforan sodu) w ilości 25 cm^3 (gleby bezwęglanowe) albo 50 cm^3 (gleby zawierające węglany) roztworu o zawartości odczynnika 35,7g·dm^{-3}. Dodawany peptyzator powoduje rozpad agregatów glebowych na pojedyncze elementy składowe i utrzymanie się ich w stanie rozdrobnienia przez czas trwania analizy.

Efekt peptyzacji uzyskuje się przez mieszanie zawiesiny glebowej z dodatkiem calgonu w mieszadle rotacyjnym przez około 10-30 minut w zależności od składu granulometrycznego gleby i liczby obrotów mieszadła. Dla gleb lekkich pełna dyspersja uzyskiwana jest po około 10 minutach. W glebach o cięższym składzie granulometrycznym (gliny czy utwory pyłowe) mieszanie należy przedłużyć do około 20 minut. Natomiast w przypadku gleb bardzo ciężkich (iły) czas mieszania powinien sięgać około 30 minut.

Zawiesina glebowa jest przenoszona do cylindra o pojemności jednego litra i średnicy 6 cm i poziom zawiesiny w cylindrze uzupełniany wodą destylowaną do pojemności pełnego litra. Pomiar wykonuje się w odniesieniu do cylindra kon-

trolnego, w którym umieszcza się taką samą ilość peptyzatora jaka była dodana do cylindra z zawiesiną. Sprawdzana jest temperatura otoczenia i obu cylindrów. Jeżeli występują znaczne różnice temperatur pomiędzy cylindrami należy je wyrównać. Następnie wykonywany jest pomiar wstępny mający na celu określenie przedziałów czasowych (według odpowiednich tabel), w jakich należy dokonywać odczytów na areometrze w czasie właściwego badania. Dokładniejszy opis wykonania pomiarów przedstawiony jest w pracy Turskiego [92].

3.6.3. Wyznaczenie czasu pomiaru areometrem

Podstawą określenia właściwych czasów pomiarów areometrem w trakcie analizy granulomterycznej jest wybranie właściwej (z opracowanych przez Prószyńskiego) tabeli. Każda z powyższych tabel opracowana jest pod kątem zawartości części spławianych gleby, stąd konieczne jest wstępne określenie ich zawartości w badanej próbce. W tym celu cylinder z zawiesiną glebową zamyka się szczelnie korkiem i miesza przez odwrócenie dnem do góry i odwrotnie 30 razy. Następnie ustawia się go na stole i jednocześnie uruchamia stoper. Po upływie 10-12 minut od chwili postawienia cylindra (opadną w tym czasie cząstki > 0,02 mm) wykonuje się pomiar areometrem Prószyńskiego, następnie wykonuje się pomiar tym samym areometrem w cylindrze z roztworem poprawkowym. Różnica dwóch odczytów daje przybliżoną zawartość w badanej glebie cząstek spławialnych (< 0,02 mm).

3.6.4. Wykonanie analizy składu granulometrycznego

Po wyznaczeniu czasów opadania frakcji o różnym uziarnieniu w danej temperaturze wykonuje się właściwy pomiar polegający na ponownym wymieszaniu zawartości cylindra pomiarowego, umieszczeniu w zawiesinie areometru i jednoczesnym włączeniu stopera. Wskazania areometru odczytywane są w czasie wyznaczonym we wstępnym pomiarze.

Uwzględniając analizę sitową, podział na frakcje granulometryczne o konkretnych wielkościach ziaren można przedstawić w oparciu o zalecane normy.

Międzynarodowe Towarzystwo Gleboznawcze (ISSS)	Żwir >2 mm	Piasek 2-0,02 mm		Pył 0,02 – 0,002 mm	Ił <0,002 mm
PN 79/9180-11 (z roku 1979)	Kamienie >25 mm	Żwir 1- 25 mm	Piasek 1-0,1 mm	Pył 0,1-0,02 mm	Ił <0,02 mm

3.7. Zawartość węgla organicznego w glebach

W preparatyce gleboznawczej istnieją dwie grupy metod służących do oznaczania zawartości węgla organicznego. Pierwsza grupa to metody polegające na utlenianiu związków organicznych tlenem z atmosfery lub utleniaczem, np. H_2O_2 i wyliczeniu zawartości związków organicznych z ubytku masy próbki po doświadczeniu. W tej grupie metod najczęściej stosowana jest metoda wagowa wykorzystująca spalenie materiału glebowego w temperaturze 500°C i następnie z różnicy mas wyznaczenie zawartości substancji organicznej. Druga grupa metod polega na określeniu charakterystycznych składników związków organicznych (z założeniem niezmienności ich udziału). W tej grupie metod przyjęto za podstawę oznaczenie węgla, a z niego po pomnożeniu przez współczynnik 1,724 wyliczenie zawartości związków organicznych, które odpowiadają zawartości próchnicy zawierającej 58% C. Również w drugiej grupie metod podstawą oznaczenia jest utlenianie związków organicznych. Jako utleniaczy używa się: czystego tlenu, lub związków utleniających w roztworze [58]. W pierwszym wypadku najczęściej oznacza się zawartość związków organicznych z objętości wydzielonego CO_2 lub jego ilości po wychwyceniu w aparatach sorpcyjnych. W przypadku drugim stosowane są metody objętościowe lub wagowe, ale najczęściej oblicza się zawartość węgla organicznego z ubytku środka utleniającego. Pomiar ten wykonywany jest metodą kolorymetryczną lub metodą miareczkową.

W przeprowadzonych pracach doświadczalnych zastosowano metodę miareczkową znaną jako metoda Tiurina [92]. Polega ona na utlenieniu węgla organicznego (C) do CO_2 w środowisku silnie kwaśnym przy użyciu $K_2Cr_2O_7$ (w obecności katalizatora Ag_2SO_4). Utlenianie węgla przebiega ilościowo zgodnie z reakcją:

$$3C + 2\,K_2Cr_2O_7 + 8H_2SO_4 \longrightarrow 2K_2SO_4 + 2Cr_2(SO_4)_3 + 8H_2O + 3CO_2$$

W tych warunkach utlenieniu ulega ok. 95% węgla w stosunku do metod suchego spalania. Nadmiar niezredukowanego utleniacza, $K_2Cr_2O_7$, pozostającego w roztworze po utlenieniu związków organicznych miareczkuje się solą Mohra – $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ w obecności wskaźnika kwasu N-fenyloantranilowego, zgodnie z reakcją:

$$K_2Cr_2O_7 + 7\,H_2SO_4 + 6FeSO_4 \longrightarrow Cr_2(SO_4)_3 + K_2SO_4 + 3\,Fe_2(SO_4)_3 + 7\,H_2O$$

Z różnicy między ilością $K_2Cr_2O_7$ wziętą do utleniania a jego pozostałością, określoną w drodze miareczkowania, wyznacza się ilość zużytego tlenu w reakcji utleniania węgla.

Stosując metodę Tiurina do oznaczania zawartości węgla organicznego w próbkach zawierających duże ilości związków redukcyjnych, jak Fe^{2+}, Mn^{2+}, Cl^- otrzymane wyniki są zawyżone. Wyniki metody Tiurina dla próbek glebowych o zawartości 7% węgla organicznego i więcej, jest traktowana jako metoda dająca wyniki orientacyjne zawartości węgla organicznego.

Dokładna receptura pomiaru zawartości węgla organicznego jest szczegółowo opisana w pracy Turskiego [92].

3.7.1. Wykonanie pomiaru zawartości węgla organicznego w glebie

Ilość odważanego materiału glebowego zawarta jest w przedziale od 0,1 do 1 g, w zależności od spodziewanej zawartości próchnicy. Badany materiał glebowy winien być powietrznie suchy, przetarty i przesiany przez sito o średnicy oczek 0,25 mm. Tak przygotowana gleba jest odważana do kolb Erlenmayera o pojemności 100 cm^3. Do naważki dodaje się około 0,1 g katalizatora (Ag_2SO_4) i 10 cm^3 roztworu $K_2Cr_2O_7$ o stężeniu 0,07 M, w kwasie siarkowym. Po założeniu na kolbę chłodniczki zwrotnej, zawartość ogrzewa się do wrzenia i utrzymuje się w takim stanie przez 5 minut. Następnie po ochłodzeniu spłukuje się chłodniczkę wodą destylowaną i bezpośrednio przed miareczkowaniem dodaje się 2-3 krople kwasu N-fenyloantranilowego i miareczkuje roztworem soli Mohra o stężeniu 0,2 M. Zabarwienie roztworu podczas miareczkowania zmienia się z ciemnowiśniowo brunatnego na ciemnofioletowe, a następnie ciemnozielone. Od momentu pojawienia się zabarwienia ciemnofioletowego należy miareczkować bardzo ostrożnie (po jednej kropli). Dla każdej serii oznaczeń węgla przeprowadza się trzy oznaczenia „zerowe", w których miareczkuje się roztwór $K_2Cr_2O_7$ z dodatkiem katalizatora ale bez gleby. Procentową zawartość węgla organicznego w próbce oblicza się wg wzoru:

$$C = \frac{(a-b)n \cdot 0{,}0006 \cdot 100}{c} \ [\%] \qquad (28)$$

gdzie: a – ilość soli Mohra zużyta na miareczkowanie 10 cm^3 roztworu $K_2Cr_2O_7$ o stężeniu 0,07 M, b – ilość soli Mohra zużyta do miareczkowania nadmiaru $K_2Cr_2O_7$ pozostałego po utlenieniu węgla w naważce gleby, n – poprawka na

miano soli Mohra, c – naważka gleby pobranej do analizy oraz przy założeniu, że 1 cm^3 soli Mohra o stężeniu 0,2 M jest równoważny 0,0006 g węgla organicznego.

3.8. Odczyn i kwasowość gleb

Odczyn gleby określany jest przez ilość aktywnych jonów wodorowych (H^+) w roztworze glebowym. Kwasowość gleby pochodzi zarówno od jonów wodorowych H^+ obecnych w roztworze glebowym, jak i od zawartości jonów czy grup o charakterze kwaśnym w kompleksie sorpcyjnym gleby. Wyróżnia się dwa rodzaje kwasowości glebowej: czynną i potencjalną. Kwasowość czynna wyrażana jest poprzez pH roztworu glebowego (pH jest ujemnym logarytmem z aktywności H^+ w roztworze glebowym). Najczęściej pH gleby mierzy się w zawiesinie wodnej o stosunku fazy stałej do ciekłej równym 1:2,5, w roztworze nad osadem. Na kwasowość potencjalną składają się kwasowość wymienna oraz kwasowość zależna od pH (hydrolityczna). Kwasowość wymienna to suma jonów o charakterze kwaśnym związanych elektrostatycznie z aktualnym ładunkiem ujemnym gleby. Ujawnia się ona po potraktowaniu gleby roztworami soli obojętnych np. chlorkiem potasu (KCl) i oznaczana jest najczęściej w ekstraktach solnych gleb. Kwasowość hydrolityczna ujawnia się podczas wzrostu odczynu gleby, kiedy (poza zobojętnianiem kwaśnych jonów wymiennych) neutralizacji ulegają powierzchniowe grupy funkcyjne o charakterze kwaśnym. Stąd często kwasowość zależną od pH oznacza się poprzez dodanie do gleby roztworów buforowych bądź soli hydrolizujących zasadowo np. octanu wapnia $(CH_3COO)_2Ca$, po odjęciu udziału kwasowości wymiennej.

3.8.1. Oznaczanie odczynu gleb

W gleboznawstwie metodą najczęściej stosowaną do pomiaru odczynu gleby (pomiar pH gleby) jest metoda elektrometryczna. Metoda ta polega na pomiarze różnicy potencjałów w ogniwie składającym się z elektrody porównawczej (tj. elektrody o stałym potencjale) oraz elektrody pomiarowej, zanurzonych w zawiesinie glebowej (najlepiej w roztworze nad osadem po sedymentacji zawiesiny) powstałej po wymieszaniu gleby i roztworu w stosunku 1:2,5. Taki stosunek gleby do roztworu zalecany jest dla gleb mineralnych już od 1926 r (Komisja do Spraw Odczynu Gleb Międzynarodowego Towarzystwa Gleboznawczego) zarówno przy oznaczeniach pH w H_2O oraz pH w 1 M roztworze KCl. Takie warunki prowadzenia pomiarów zalecane są dla gleb w "Procedures for Soil Analysis" [110] oraz dla gruntów w "Laboratoryjne badania gruntów" [68]. Zalecenia

PTG przy pomiarze odczynu (pH) gleb obejmują: stosunek gleby do roztworu jak 1:2,5; dokładne wymieszanie składników suspensji, pozostawienia mieszaniny przez okres 24 godz. celem ustalenia się równowagi w układzie oraz pomiar pH w roztworze nad osadem.

Pomiar pH w niezsedymentowanej zawiesinie obarczony jest błędem wynikającym z występowania tzw. efektu suspensji. Jest on spowodowany oddziaływaniem naładowanych cząstek koloidalnych i makrocząsteczek zawiesiny na klucz elektrolityczny elektrody odniesienia. Stawiński, Wierzchoś i Józefaciuk [86] zaproponowali nowy sposób pomiaru pH pozwalający na wyeliminowanie błędu pochodzącego od efektu suspensji i bezpośredniego kontaktu fazy stałej gleby ze złączem elektrolitycznym elektrody odniesienia. Proponują oni takie umieszczanie elektrody w suspensji, aby złącze elektrolityczne znajdowało się ok. 1 mm nad powierzchnią badanej suspensji. Na wpływ sposobu umieszczania elektrody w układzie na pomiar pH zwracał także uwagę Peech [76]. Jako elektrodę porównawczą najczęściej stosuje się elektrodę kalomelową, a jako elektrodę pomiarową – elektrodę szklaną. Niekiedy zamiast dwóch elektrod stosuje się pojedynczą elektrodę, tzw. elektrodę kombinowaną (elektroda szklana + elektroda chlorosrebrowa). Różnicę potencjałów w ogniwie odczytuje się na galwanometrze, wyskalowanym w jednostkach pH, w zakresie 1-14 jednostek.

Niektórzy autorzy jak Schoefield i Taylor, [81]; Peech [76], proponowali stosowanie roztworu chlorku wapnia zamiast chlorku potasu. Ostatnio podjęto próby wprowadzenia pomiaru pH w 0,01 mol/litr roztworze chlorku wapnia $CaCl_2$ również w Polsce. Metoda pH-$CaCl_2$ została objęta normą międzynarodową ISO 10390 i propagowana jest jako metoda oficjalna. Badania Fotymy i Jadczyszyna [26] wykazały, że wyniki pomiarów w wyciągu 0,01 M $CaCl_2$ są ściśle skorelowane z wynikami uzyskanymi metodą tradycyjną w 1 M KCl. Zależność pomiędzy pH-$CaCl_2$ (zmienna zależna y) i pH-KCl (zmienna niezależna x) najlepiej opisuje równanie regresji kwadratowej $y = 1{,}339x - 0{,}051x^2$. Autorzy ci uważają, że model regresyjny jest dobrze dopasowany do danych doświadczalnych w całym zakresie pH badanych gleb i jest możliwe dokonanie kalibracji metody oznaczania pH-0,01M $CaCl_2$ w oparciu o dobrze skalibrowaną metodę pH-1 M KCl.

3.8.2. Wykonanie pomiarów odczynu gleb mineralnych

Do polietylenowych zlewek o pojemności 25-50 ml odważano po 10 g powietrznie suchej i przesianej przez sito o średnicy oczek 1 mm gleby. Do jednej zlewki dodawano 25 ml wody destylowanej (uprzednio przegotowanej i ostudzonej), a do drugiej 25 ml 1M roztworu chlorku potasu (KCl). Zawartość zlewek

dokładnie wymieszano i pozostawiano w termostatowanym pokoju w temperaturze 20°C. Po 24 godzinach dokonywano pomiaru pH w roztworze nad osadem gleby. Pomiary wykonywano w trzech powtórzeniach przy użyciu pH-metru firmy Radiometr Copenhagen oraz elektrody zespolonej firmy Orion Research.

3.9. Pojemność jonowymienna gleby

Pojemność jonowymienna gleby pochodzi od ładunku elektrycznego obecnego na powierzchniach składników glebowych. Ładunek ten można podzielić na dwa zasadnicze typy: ładunek stały i ładunek zmienny [10].

Ładunek stały występuje głównie w glebowych minerałach ilastych i pochodzi on od defektów sieci krystalicznej minerałów. Kationy o wyższej wartościowości (na przykład krzem w warstwach krzemowo-tlenowych) zastępowane są, podczas procesów genezy, przez kationy o wartościowości niższej (na przykład przez glin), w wyniku czego pojawia się nadmiar ładunku ujemnego, pochodzącego od niewysyconych wiązań tlenu.

Wielkość ładunku stałego jest charakterystyczna dla typu minerału i warunków jego genezy. Często nie jest ona ilościowo równa sumarycznemu ładunkowi defektów sieciowych, gdyż jego część może być kompensowana przez specyficznie wiązane kationy w przestrzeniach między warstwowych minerałów. Ładunek stały najczęściej spotykanych minerałów glebowych wynosi od kilku (minerały grupy kaolinu) poprzez kilkadziesiąt (illity) do ponad stu (smektyty, zeolity) milimoli na sto gramów minerału (1 milimol = 96,5 kulomba = $6{,}023 \times 10^{20}$ ładunków elementarnych).

Ładunek zmienny występuje na powierzchniach bardzo wielu składników gleby: materii organicznej, tlenków glinu, żelaza i krzemu [59], czy też na powierzchniach krawędzi bocznych minerałów ilastych. Na powierzchni glebowej materii organicznej dominują grupy funkcyjne o charakterze kwaśnym. Wzrost pH roztworu glebowego powoduje neutralizację aktywnych jonów wodorowych tych grup, a pozostałe ujemnie naładowane reszty tworzą ładunek powierzchni. Kwaśne grupy funkcyjne glebowej materii organicznej (grupy karboksylowe alifatyczne i aromatyczne, grupy fenolowe i wiele innych) mają bardzo zróżnicowane właściwości kwasowe. Zależą one nie tylko od rodzaju grupy funkcyjnej, ale i od jej położenia w makromolekule materii organicznej. Im słabszy jest charakter kwasowy danych grup funkcyjnych, tym wyższa wartość pH potrzebna jest do ich zobojętnienia. Dlatego im wyższe jest pH roztworu glebowego, tym wyższy jest ładunek materii organicznej.

W zależności od odczynu, powierzchnia niektórych mineralnych składników gleby (składniki stałopotencjałowe) może posiadać ładunek dodatni, zerowy, albo ujemny, powstały w wyniku reakcji asocjacji-dysocjacji jonów potencjałotwórczych, głownie jonów wodorowych powierzchniowych grup hydroksylowych [93].

Naładowana powierzchnia przyciąga z roztworu glebowego jony o przeciwnym znaku (przeciwjony) oraz odpycha jony o znaku tym samym (kojony). Ilość zaadsorbowanych wymiennie przeciwjonów w warstwie dyfuzyjnej (pojemność jonowymienna) jest praktycznie równa wielkości ładunku powierzchni (niewielka część tego ładunku kompensowana jest poprzez odpychanie kojonów). Na pojemność wymienną gleby, oprócz opisanego już wyraźnego wpływu pH, wpływa również stężenie soli w roztworze glebowym. Wzrost stężenia soli powoduje wzrost ładunku powierzchni składników stałopotencjałowych oraz materii organicznej gleby.

W zależności od rodzaju ładunku powierzchni, a więc od rodzaju składników tworzywa glebowego oraz warunków środowiska (głównie pH roztworu glebowego), gleba może wykazywać pojemność wymienną względem kationów (PWK, CEC) lub anionów (PWA, AEC). Przewaga ujemnie naładowanych składników w glebach naszego klimatu powoduje, że wiążą one głównie kationy. Wielkość PWK zależy od składu mineralogicznego gleby i udziału materii organicznej. Z reguły jest ona większa w górnych niż w dolnych poziomach gleby. Najwyższe wartości PWK obserwuje się w glebach o przewadze smektytów, a najniższe kaolinitu. Pokrycie powierzchni minerałów hydroksytlenkami glinu i żelaza również wpływa na wielkość PWK, która maleje ze wzrostem stopnia pokrycia powierzchni ze względu na blokowanie ładunku powierzchniowego.

3.9.1. Pomiary pojemności kationowymiennej gleby

Ze względu na jej zależność od pH i stężenia roztworu glebowego, już sama definicja pojemności wymiennej gleby stanowi poważny problem [24]. Wielkość PWK gleby w warunkach panujących aktualnie w środowisku glebowym przyjęto nazywać efektywną (aktualną) pojemnością kationowymienną. Jest ona oczywiście zależna od wszystkich czynników wpływających na skład roztworu glebowego, a więc od opadów, sezonu wegetacyjnego, nawożenia, wapnowania, szaty roślinnej itd. Pomimo tego, iż to właśnie aktualna wielkość PWK odpowiada za warunki wzrostu i rozwoju roślin, w celach porównawczych stosowana jest najczęściej wielkość potencjalnej pojemności wymiennej, która mierzona jest w warunkach ściśle określonego pH i stężenia roztworu równowagowego.

Liczba obecnie stosowanych metod oznaczania PWK gleby jest bardzo duża, a w literaturze pojawiają się wciąż nowe propozycje. Generalnie, większość stosowanych obecnie metod pomiaru PWK można podzielić na dwie zasadnicze grupy, mające zastosowanie do pomiarów zarówno efektywnej jak i potencjalnej wielkości PWK: metody sumacyjne oraz metody bezpośrednie [38-41].

Idea pomiaru PWK metodami sumacyjnymi polega na sporządzeniu ekstraktu glebowego poprzez zalanie gleby lub przepuszczanie przez nią stężonego roztworu soli obojętnej i oznaczenie jakościowe i ilościowe wyekstrahowanych kationów glebowych. Sól użyta do wypierania nie powinna zawierać kationów obecnych w glebie (najczęściej stosuje się więc sole baru, czasem lantanu, cezu i litu). Wyparte jony o charakterze zasadowym oznacza się metodami standardowymi (najczęściej ASA). Ilość kationów o charakterze kwaśnym (kwasowości wymiennej) oznacza się poprzez miareczkowanie ekstraktu zasadą do punktu końcowego (pH około 7). Wielkość tak mierzonej kwasowości wymiennej zależy od stężenia użytego roztworu oraz od natury kationu i anionu soli. W przypadku obecności ładunku zmiennego w glebie, z uwagi na jego reakcje zachodzące przy wzroście mocy jonowej roztworu, stosowanie powyższej metodyki może być niepoprawne.

Idea pomiaru PWK metodami bezpośrednimi polega na zamianie kationów glebowego kompleksu sorpcyjnego na kationy indeksowe oraz oznaczeniu kationów indeksowych. Glebę nasyca się kationem indeksowym (najczęściej wybranym kationem I bądź II grupy układu okresowego) i odmywa nadmiar soli nasycającej. Ilość pozostałych w glebie kationów indeksowych można oznaczyć po ich wyrugowaniu, bądź też bezpośrednio w próbce glebowej.

3.9.2. Pomiar PWK badanych gleb

Wielkość PWK badanych próbek określono metodą bezpośrednią. Z uwagi na znaczną ilość próbek, jako kation indeksowy zastosowano jon wodorowy, gdyż można go oznaczyć stosunkowo szybko, prosto i dokładnie. Po wyrugowaniu glebowych jonów macierzystych poprzez przemycie próbek glebowych roztworem kwasu, odmyto jego nadmiar przez przepłukanie woda destylowaną i tak otrzymane próbki miareczkowano roztworem zasady do stałego punktu końcowego.

Próbki gleby o masie m_g równej 2,0 g umieszczano na sączku i przemywano 20 cm^3 roztworu HCl o stężeniu 0,1 $mol \cdot dm^{-3}$, a następnie 100 cm^3 wody destylowanej. Osady po przemyciu przenoszono ilościowo poprzez spłukiwanie do polietylenowych pojemników (o znanej masie) i dopełniano wodą do masy zawiesiny równej 22 g (stosunek fazy stałej do ciekłej 1:10). Po określeniu pH tak przygotowanych zawiesin (pH_z), dodawano do nich po 10 g roztworu NaCl

o stężeniu 2 mol·kg^{-1} i następnie miareczkowano roztworem NaOH o stężeniu C równym 0,01 mol·dm^{-3} sporządzonym na bazie 1 mol·dm^{-3} roztworu NaCl do wartości pH równej 8,1. Znaczne stężenie soli obojętnej (NaCl) podczas pomiaru stosowano, aby użyta metodyka była lepiej porównywalna z metoda standardową, w której również występuje wysokie stężenie soli ($BaCl_2$).

Wartość PWK gleby obliczano na podstawie ilości jonów wodorowych obecnych w fazie stałej zawiesiny. Ilość ta jest równa ilości moli zasady, N_z, zużytej na miareczkowanie zawiesiny pomniejszonej o ilość zasady zużytej na miareczkowanie jonów wodorowych obecnych w roztworze równowagowym, N_r:

Wielkość N_z obliczana jest na podstawie znajomości objętości zasady, V_z, zużytej do miareczkowania zawiesiny:

$$N_z = V_z C, \tag{29}$$

natomiast jako ilość zasady konsumowanej przez jony wodorowe obecne w roztworze przyjęto ilość jonów wodorowych obecnych w fazie ciekłej zawiesiny przed dodaniem do niej roztworu NaCl. Ilość tę obliczano znając objętość roztworu w zawiesinie (V_r) oraz wartość pH zawiesiny:

$$N_r = V_r 10^{-\mathrm{pHz}}. \tag{30}$$

Zatem:

$$\mathrm{PWK} = (N_z - N_r) / m_s = (V_z C - V_r 10^{-\mathrm{pHz}}) / m_s. \tag{31}$$

Dla 20 próbek glebowych otrzymaną wartość PWK porównano z oznaczeniami według PN ISO 13536:2002, otrzymując korelację liniową o $R^2 = 0{,}76$.

3.10. Normy i standardy

ISO 12 277 – Oznaczanie składu granulometrycznego w mineralnym materiale glebowym. Metoda sitowa i sedymentacyjna.

PN-R-04032: 1998 – Gleby i utwory glebowe – Pobieranie próbek i oznaczenie składu granulometrycznego.

PN-R-04033: 1998 – Gleby i utwory mineralne – Podział na frakcje i grupy granulometryczne.

ISO 14 235 – Oznaczanie zawartości węgla organicznego przez utlenianie dwuchromianem w środowisku kwasu siarkowego.

PN-ISO 10390, 1997. Jakość gleby. Oznaczanie pH.

PN-R-04027, 1997. Analiza chemiczno-rolnicza gleby. Oznaczanie kwasowości hydrolitycznej w glebach mineralnych.

PN-EN 1307, 2002. Środki poprawiające glebę i podłoża uprawowe. Oznaczanie pH.

PN ISO 13536:2002 Oznaczanie potencjalnej pojemności wymiennej kationowej i kationów wymiennych z zastosowaniem zbuforowanego roztworu chlorku baru o pH = 8,1.

PN ISO 11260:1999 Oznaczanie efektywnej pojemności wymiennej kationowej i stopnia wysycenia zasadami z zastosowaniem roztworu chlorku baru.

PN-ISO 11461: 2003 Oznaczanie wilgotności objętościowej gleby z zastosowaniem pierścienia. Metoda wagowa.

PN-EN 13041: 2002 Oznaczanie właściwości fizycznych. Gęstość objętościowa suchej próbki, pojemność powietrzna, pojemność wodna, kurczliwość i porowatość ogólna.

4. WYNIKI

4.1. Wyniki analizy statystycznej

Parametry statystyczne badanych cech gleby obliczono i zestawiono jak następuje: w tabeli 4 podano statystykę obejmującą wszystkie dane łącznie (tj. z obszaru gminy i wybranych pól w całej warstwie 0-40 cm); w kolejnych tabelach - dla obszaru gminy przy uwzględnieniu pól (tab. 5, 6) oraz z ich pominięciem (tab. 7, 8), dla pola uprawnego A (tab. 9, 10), pola B (tab. 11, 12) i nieużytku (tab. 13, 14), osobno dla warstwy przypowierzchniowej (0-10 cm) i podornej (30-40 cm).

Wartość średnia jest szczególnie istotną miarą tendencji centralnej rozkładu danej zmiennej. Tym bardziej jest ona niezawodna im większa jest liczebność próby. Wiadomo, że wraz ze wzrostem wariancji danych średnia staje się mniej pewna. Wyznaczone odchylenia standardowe rozpatrywanych zmiennych (tab. 4-14) w większości przypadków są znacząco niższe od wartości średnich, co wskazuje, że otrzymane średnie są reprezentatywne dla rozpatrywanych obiektów.

Analiza całości zebranych danych z obszaru gminy Trzebieszów dotyczących składu granulometrycznego gleby (tab. 4) wykazała, że średnio w warstwie 0-40 cm najwięcej było piasku (55,2%), następnie pyłu (31,5%), najmniej zaś iłu (13,3%). Minimalne zawartości tych frakcji (w zbiorze 928 danych) wynosiły odpowiednio 29, 3 i 1%, a maksymalne 94, 56 i 36%. Rozpatrując te całościowe dane (z gminy i pól łącznie) oddzielnie dla warstwy 0-10 i 30-40 cm (tab. 5, 6) można zauważyć wyraźne różnice zawartości frakcji granulometrycznych między warstwami (zwłaszcza iłu i piasku), a porównując je z danymi otrzymanymi przy pominięciu pól (tab. 7, 8) – na ile uwzględnienie (dodatkowo) danych z wybranych pól waży na wynikach dotyczących obszaru gminy. W każdym przypadku notowano większą zawartość piasku w warstwie wierzchniej niż w podornej, odwrotnie jak zawartość iłu (w warstwie podornej była ona większa niż przy powierzchni). Zawartość pyłu była zawsze mniejsza niż piasku, a większa niż iłu.

Zawartość frakcji granulometrycznych na rozpatrywanych obiektach w skali pola była znacząco zróżnicowana. Najmniejszą ilość piasku zawierała gleba na polu uprawnym A (48,8%), największą zaś na nieużytku (średnio 62%). Zawartości frakcji pyłu kształtowały się w przedziale 26,7 (nieużytek) – 37,2% (pole uprawne A), a iłu od 8,8% (nieużytek, warstwa 0-10 cm) do 16,2% (pole A, warstwa 30-40 cm). Na dwóch obiektach (pole B i nieużytek) zawartość pyłu była

większa w warstwie podornej, na polu A (oraz w całej gminie) w warstwie powierzchniowej.

Zawartość materii organicznej w glebie na terenie gminy, polach uprawnych jak i nieużytku była niewielka i wynosiła około 0,8% w warstwie powierzchniowej, a 0,3% w warstwie podornej. Najmniejsza i największa zawartość materii organicznej jaką zanotowano w pojedynczym punkcie pomiarowym w warstwie powierzchniowej to 0,002 i 3,75%.

Odczyn gleb – generalnie – był kwaśny lub obojętny, średnia wartość pH w warstwie 0-40 cm mierzona w KCl wynosiła 4,42, a w H_2O około 5. Minimalne wartości pH próbek gleby wynosiły 3,47 (KCl) i 3,88 (H_2O), a maksymalne odpowiednio 6,98 i 7,29 (tab. 4). Na wszystkich rozpatrywanych obiektach odczyn gleby w warstwie podornej (w średnich) był nieco wyższy niż w warstwie powierzchniowej. Najniższy odczyn (pH w KCl) zaobserwowano na nieużytku w warstwie powierzchniowej (średnio 3,59), zaś najwyższy (4,92) rozpatrując obszar gminy bez pól (warstwa 30-40 cm).

Średnia wartość pojemności kationowymiennej wynosiła około 10 $cmol \cdot kg^{-1}$, choć w poszczególnych próbkach zmieniała się znacznie (w przedziale od 1,7 do 27,6 $cmol \cdot kg^{-1}$). W badanych warstwach na poszczególnych obiektach wynosiła ona od 7,8 $cmol \cdot kg^{-1}$ (pole B, warstwa podorna) do 11,8 $cmol \cdot kg^{-1}$ (pole A, warstwa powierzchniowa), przy czym zawsze była ona większa w warstwie powierzchniowej.

Porównanie wartości odchylenia standardowego poszczególnych frakcji granulometrycznych i zawartości materii organicznej (tab. 5-14) pozwala stwierdzić, że na obszarze gminy wykazywały one większy rozrzut niż na polach, przy czym największe różnice między gminą a polami zaznaczyły się w zawartości piasku. Rozrzut wartości pH (KCl) na terenie gminy był dwa lub trzy razy większy niż na polach uprawnych, a ośmiokrotnie większy jak na nieużytku. Rozrzut wartości pojemności kationowymiennej (CEC) w gminie i na polach był zbliżony (tylko na nieużytku wyraźnie mniejszy). Zanotowano niższe wartości standardowego odchylenia zawartości frakcji granulometrycznych w warstwie powierzchniowej niż podornej (za wyjątkiem iłu na polu B), a odwrotną sytuację odnośnie zawartości materii organicznej i pH gleby w tych warstwach.

Współczynnik zmienności (CV) wartości pH gleby był na wszystkich obiektach wyższy w warstwie ornej, natomiast pojemności kationowymiennej, zawartości materii organicznej oraz frakcji piasku i pyłu w warstwie podornej. W trzech na pięć przypadkach wyższe współczynniki zmienności zawartości iłu zanotowano warstwie ornej. Z porównania współczynników zmienności otrzymanych dla

pól i obszaru gminy wynika, że z reguły większą zmienność analizowanych cech gleby obserwowano w przypadku gminy (wyjątkiem była zawartość iłu oraz CEC na polu B w warstwie 0-10 cm). Największą zmiennością charakteryzowała się zawartość materii organicznej w warstwie podornej na obszarze gminy (CV około 121%), najmniejszą zaś odczyn gleby na nieużytku w obu badanych warstwach (tylko 2-3%). Spośród frakcji granulometrycznych największą zmienność wykazywała zawartość iłu (CV od 28% w warstwie podornej na polu A do około 46% w gminie), najmniejszą zaś (od 8 do 24%) zawartość piasku. CV pojemności kationowymiennej kształtował się między 25% (nieużytek warstwa 0-10 cm) a 41,5% (obszar gminy warstwa 30-40 cm), a więc w zakresie zbliżonym do zmienności iłu.

Skośność, która charakteryzuje stopień asymetrii rozkładu wokół jego średniej, w przypadku rozpatrywanych zmiennych była w większości dodatnia, część z raczej umiarkowaną asymetrią i część ze znaczną asymetrią (głównie pH gleby i materia organiczna). Pył, gęstość gleby i sporadycznie ił i pH wykazywały lekką ujemną asymetrię.

Kurtoza, która charakteryzuje względną smukłość lub płaskość rozkładu w porównaniu z rozkładem normalnym (kurtoza rozkładu normalnego wynosi 3), wykazywała dla większości zmiennych wartość zbliżoną do rozkładu normalnego. Stosunkowo niewielką wysmukłość (kurtoza >3) rozkładu obserwowano dla frakcji granulometrycznych gleby dla wszystkich danych z gminy, pól uprawnych i nieużytku w warstwie 0-40 cm. Znacznie większą wysmukłością rozkładu charakteryzował się odczyn gleby, zawartość materii organicznej i pojemność kationowymienna.

Różnice między wartościami średnimi a medianami dla poszczególnych zmiennych jak i wartości asymetrii i kurtozy wskazują, że z reguły badane zmienne z dość dobrą dokładnością można opisywać rozkładem normalnym.

Dane statystyczne dotyczące plonowania roślin uprawnych na polu A (mieszanka owsa, pszenicy i jęczmienia) i B (żyta) przedstawiono w tabeli 15 wraz z danymi o gęstości gleby na tychże polach na początku i końcu okresu wegetacyjnego. Zestawienie tych danych nie jest przypadkowe, gdyż z jednej strony daje informację o zmianie jednego z czynników siedliskowych roślin w czasie, a z drugiej, wartość (poziom) i zmienność gęstości gleby występująca w obrębie danego pola – w powiązaniu z innymi właściwościami gleby oraz warunkami meteorologicznymi podczas okresu wegetacyjnego – może stanowić element wpływający na wielkość i zróżnicowanie plonu na rozpatrywanym obszarze [52].

Średnia gęstość gleby na obu polach uprawnych była zbliżona (nieco większa na polu B) i tylko nieznacznie wzrosła w okresie od wiosny do końca lata (o 2-6 %). Zróżnicowanie gęstości gleby w obrębie pól było jednak znaczne. Nawet po żniwach jej wartości zawierały się w przedziale 1,13-1,58 (pole A) i 1,16-1,69 (pole B). Współczynnik zmienności gęstości gleby wynosił na wiosnę 8-10%, pod koniec lata około 7%. Na jednym polu (A) obserwowano nieznaczną płaskość rozkładu gęstości gleby (kurtoza <3), a na drugim nieznaczną wysmukłość jej rozkładu.

Średni plon mieszanki (owies, pszenica, jęczmień) z 1 m^2 na polu uprawnym A był ponad 100 g mniejszy niż średni plon żyta na polu uprawnym B; podobnie jak rozstęp wielkości plonu, który był o 100 g mniejszy dla mieszanki (tab. 15). Plon żyta w poszczególnych punktach pola kształtował się między 117 a 556 $g \cdot m^{-2}$, a plon mieszanki w przedziale 55 a 325 $g \cdot m^{-2}$. Współczynnik zmienności plonu na obu polach był zbliżony (23-28%). Plon mieszanki charakteryzował się większą wysmukłością rozkładu niż plon żyta.

4.2. Wyniki analizy korelacyjnej

Dokonano obliczeń korelacji liniowej rozpatrywanych cech gleby na poziomie istotności $p<0,05$, których wyniki zawarto w tabeli 16 (korelacje istotne statystycznie zaznaczono pogrubieniem). Wysokie i istotne współczynniki korelacji pomiędzy zawartościami poszczególnych frakcji granulometrycznych w danej warstwie jak i między warstwami wskazują na współzależność tych zmiennych między sobą. Odczyn gleby (pH w KCl i pH w H_2O) był wysoko skorelowany między sobą, nieco gorzej z frakcją pyłu w obu warstwach, a z materią organiczną tylko w warstwie ornej, natomiast między warstwami – odczyn pH w KCl był skorelowany z frakcją pyłu, a odczyn pH w H_2O z frakcją iłu oraz z materią organiczną w warstwie ornej. Nie stwierdzono korelacji pomiędzy zawartością materii organicznej w warstwach, natomiast materia organiczna korelowała z frakcją pyłu i pojemnością kationowymienną w warstwach oraz z pH w warstwie ornej. Materia organiczna w warstwie ornej korelowała również z frakcją piasku, pyłu, iłu, pH i CEC w warstwie podornej. Pojemność kationowymienna w warstwie podornej korelowała ze wszystkimi zmiennymi w obu warstwach, a jednocześnie CEC w warstwie ornej nie korelowała z pH w tej samej warstwie oraz pyłem i materią organiczną w warstwie podornej.

Tabela 4. Statystyka zawartości frakcji granulometrycznych, odczynu (pH), zawartości materii organicznej (OM) i pojemności kationowymiennej (CEC) w warstwie 0-40 cm z obszaru gminy Trzebieszów, pól uprawnych i nieużytku

Table 4. Summarical statistic of granulometric fraction, acidity (pH), organic mater content (OM) and cation exchange capacity (CEC) in 0-40 cm layer for area of Trzebieszów commune, cultivated and uncultivated field

Parametr – Parameter	Gmina łącznie z polami – Commune with fields						
	% zawartość frakcji % content of fractions			pH [KCl]	pH [H_2O]	OM	CEC
	1-0,1 (mm)	0,1-0,02 (mm)	<0,02 (mm)	(–)	(–)	(%)	(cmol·kg^{-1})
	Warstwa – layer 0-40 cm						
Liczba punktów Number of points	928	928	928	928	928	928	928
Średnia – Mean	55,2	31,5	13,3	4,42	4,98	0,561	10,1
Wariancja – Variance	130,4	74,1	30,4	0,476	0,480	0,195	13,2
Odchylenie standardowe Standard deviation	11,4	8,6	5,5	0,690	0,693	0,441	3,6
Współczynnik zmienności Coefficient of variation	20,7	27,3	41,5	15,6	13,9	78,7	36,0
Asymetria – Skewness	0,562	0,292	0,430	1,383	1,010	1,121	0,874
Kurtoza – Kurtosis	3,279	3,276	3,243	4,606	3,668	6,553	4,638
Minimum – Minimum	29	3	1	3,47	3,88	0,002	1,74
25th %tile	47	26	9	3,94	4,48	0,19	7,6
Mediana – Median	54	32	13	4,25	4,81	0,52	9,6
75th %tile	62	37	17	4,64	5,34	0,865	12
Maksimum – Maximum	94	56	36	6,98	7,29	3,75	27,6

Tabela 5. Statystyka zawartości frakcji granulometrycznych, odczynu (pH), zawartości materii organicznej (OM) i pojemności kationowymiennej (CEC) w warstwie 0-10 cm z obszaru gminy Trzebieszów, pól uprawnych i nieużytku

Table 5. Summarical statistic of granulometric fraction, acidity (pH), organic mater content (OM) and cation exchange capacity (CEC) in 0-10 cm layer for Trzebieszów commune area, cultivated and uncultivated field

Parametr – Parameter	Gmina łącznie z polami – Commune with fields						
	% zawartość frakcji % content of fractions			pH [KCl]	pH [H_2O]	OM	CEC
	1-0,1 (mm)	0,1-0,02 (mm)	<0,02 (mm)	(–)	(–)	(%)	(cmol·kg^{-1})
	Warstwa – layer 0-10 cm						
Liczba punktów Number of points	464	464	464	464	464	464	464
Średnia – Mean	56,1	32,0	11,9	4,25	4,82	0,843	10,9
Wariancja – Variance	110,5	64,4	23,0	0,519	0,511	0,158	12,5
Odchylenie standardowe Standard deviation	10,5	8,0	4,8	0,720	0,715	0,398	3,5
Współczynnik zmienności Coefficient of variation	18,7	25,1	40,4	16,9	14,8	47,2	32,5
Asymetria – Skewness	0,588	–0,376	0,433	1,713	1,308	1,457	0,887
Kurtoza – Kurtosis	3,117	3,229	2,924	5,466	4,323	11,05	4,411
Minimum – Minimum	34	6	1	3,47	3,88	0,002	3,69
25th %tile	49	27	8	3,81	4,33	0,64	8,54
Mediana – Median	55	33	11	4,00	4,63	0,83	10,39
75th %tile	63	38	15	4,48	5,08	1,01	12,74
Maksimum – Maximum	89	54	28	6,91	7,24	3,75	27,60

Tabela 6. Statystyka zawartości frakcji granulometrycznych, odczynu (pH), zawartości materii organicznej (OM) i pojemności kationowymiennej (CEC) w warstwie 30-40 cm z obszaru gminy Trzebieszów, pól uprawnych i nieużytku

Table 6. Summarical statistic of granulometric fraction, acidity (pH), organic mater content (OM) and cation exchange capacity (CEC) in 30-40 cm layer for Trzebieszów commune area, cultivated and uncultivated field

Parametr – Parameter	Gmina łącznie z polami – Commune with fields						
	% zawartość frakcji % content of fractions			pH [KCl]	pH [H_2O]	OM	CEC
	1-0,1 (mm)	0,1-0,02 (mm)	<0,02 (mm)	(–)	(–)	(%)	(cmol·kg^{-1})
	Warstwa – layer 30-40 cm						
Liczba punktów Number of points	464	464	464	464	464	464	464
Średnia – Mean	54,2	31,1	14,7	4,58	5,15	0,279	9,26
Wariancja – Variance	148,8	83,4	33,9	0,378	0,396	0,072	12,5
Odchylenie standardowe Standard deviation	12,2	9,1	5,8	0,615	0,629	0,269	3,54
Współczynnik zmienności Coefficient of variation	22,5	29,4	39,5	13,4	12,2	96,4	38,3
Asymetria – Skewness	0,606	–0,197	0,255	1,456	1,011	1,472	1,004
Kurtoza – Kurtosis	3,337	3,235	3,275	4,670	3,604	5,331	5,343
Minimum – Minimum	29	3	2	3,52	3,89	0,003	1,74
25th %tile	46	25	11	4,19	4,67	0,069	7,09
Mediana – Median	53	31	15	4,39	4,97	0,220	8,66
75th %tile	61	37	19	4,76	5,49	0,401	11,00
Maksimum – Maximum	94	56	36	6,98	7,29	1,435	25,60

Tabela 7. Statystyka zawartości frakcji granulometrycznych, odczynu (pH), zawartości materii organicznej (OM) i pojemności kationowymiennej (CEC) w warstwie 0-10 z obszaru gminy Trzebieszów

Table 7. Summarical statistic of granulometric fraction, acidity (pH), organic mater content (OM) and cation exchange capacity (CEC) in 0-10 cm layer for Trzebieszów commune area

Parametr – Parameter	Gmina – Commune						
	% zawartość frakcji % content of fractions			pH [KCl]	pH [H_2O]	OM	CEC
	1-0,1 (mm)	0,1-0,02 (mm)	<0,02 (mm)	(–)	(–)	(%)	(cmol·kg^{-1})
	Warstwa – layer 0-10 cm						
Liczba punktów Number of points	214	214	214	214	214	214	214
Średnia – Mean	59,6	29,0	11,4	4,7	5,2	0,861	10,6
Wariancja – Variance	118,1	63,1	23,7	0,673	0,599	0,238	12,5
Odchylenie standardowe Standard deviation	10,9	7,9	4,9	0,821	0,774	0,488	3,5
Współczynnik zmienności Coefficient of variation	18,2	27,4	42,8	17,6	14,8	56,6	33,2
Asymetria – Skewness	0,620	–0,537	0,556	0,983	0,757	1,584	0,979
Kurtoza – Kurtosis	2,947	3,030	3,342	2,994	2,729	9,644	5,073
Minimum – Minimum	38	6	1	3,59	4,04	0,002	3,7
25th %tile	52	25	8	4,02	4,65	0,571	8,2
Mediana – Median	58	30	11	4,37	5,05	0,832	10,0
75th %tile	65	34	15	5,09	5,67	1,09	12,6
Maksimum – Maximum	89	44	28	6,91	7,24	3,75	27,6

Tabela 8. Statystyka zawartości frakcji granulometrycznych, odczynu (pH), zawartości materii organicznej (OM) i pojemności kationowymiennej (CEC) w warstwie 30-40 cm obszaru gminy Trzebieszów

Table 8. Summarical statistic of granulometric fraction, acidity (pH), organic mater content (OM) and cation exchange capacity (CEC) in 30-40 cm layer for Trzebieszów commune area

Parametr – Parameter	Gmina – Commune						
	% zawartość frakcji % content of fractions			pH [KCl]	pH [H_2O]	OM	CEC
	1-0,1 (mm)	0,1-0,02 (mm)	<0,02 (mm)	(–)	(–)	(%)	(cmol·kg^{-1})
	Warstwa – layer 30-40 cm						
Liczba punktów Number of points	214	214	214	214	214	214	214
Średnia – Mean	57,5	27,8	14,7	4,915	5,474	0,245	9,2
Wariancja – Variance	191,3	82,5	45,2	0,511	0,488	0,088	14,7
Odchylenie standardowe Standard deviation	13,8	9,1	6,7	0,715	0,698	0,297	3,8
Współczynnik zmienności Coefficient of variation	24,0	32,7	45,7	14,5	12,8	121,1	41,5
Asymetria – Skewness	0,408	–0,31	0,343	0,738	0,463	1,867	1,054
Kurtoza – Kurtosis	2,755	3,004	2,951	2,583	2,443	6,246	5,107
Minimum – Minimum	30	3	2	3,52	3,89	0,003	1,7
25th %tile	48	22	10	4,33	4,89	0,031	6,8
Mediana – Median	56,5	29	14	4,65	5,36	0,146	8,6
75th %tile	66	34	19	5,40	5,98	0,320	11,1
Maksimum – Maximum	94	48	36	6,98	7,29	1,435	25,6

Tabela 9. Statystyka zawartości frakcji granulometrycznych, odczynu (pH), zawartości materii organicznej (OM) i pojemności kationowymiennej (CEC) w warstwie 0-10 cm z pola uprawnego A

Table 9. Summarical statistic of granulometric fraction, acidity (pH), organic mater content (OM) and cation exchange capacity (CEC) in 0-10 cm layer for cultivated field A

Parametr – Parameter	Pole uprawne A – Cultivated field A						
	% zawartość frakcji % content of fractions			pH [KCl]	pH [H_2O]	OM	CEC
	1-0,1 (mm)	0,1-0,02 (mm)	<0,02 (mm)	(–)	(–)	(%)	(cmol·kg^{-1})
	Warstwa – layer 0-10 cm						
Liczba punktów Number of points	150	150	150	150	150	150	150
Średnia – Mean	48,8	37,2	14,0	3,905	4,458	0,835	11,8
Wariancja – Variance	50,1	36,9	18,4	0,084	0,099	0,118	12,9
Odchylenie standardowe Standard deviation	7,08	6,08	4,29	0,29	0,314	0,344	3,59
Współczynnik zmienności Coefficient of variation	14,5	16,3	30,6	7,4	7,0	41,2	30,5
Asymetria – Skewness	0,811	–0,419	–0,125	5,307	2,47	0,276	0,628
Kurtoza – Kurtosis	4,298	4,446	2,646	44,47	15,97	3,709	3,672
Minimum – Minimum	34	16	3	3,56	3,93	0,014	3,69
25th %tile	44	34	11	3,78	4,27	0,650	9,22
Mediana – Median	48	38	15	3,86	4,39	0,832	11,40
75th %tile	52	40	17	3,96	4,60	1,003	13,49
Maksimum – Maximum	75	54	25	6,49	6,59	1,800	23,80

Tabela 10. Statystyka zawartości frakcji granulometrycznych, odczynu (pH), zawartości materii organicznej (OM) i pojemności kationowymienej (CEC) w warstwie 30-40 cm z pola uprawnego A

Table 10. Summarical statistic of granulometric fraction, acidity (pH), organic mater content (OM) and cation exchange capacity (CEC) in 30-40 cm layer for cultivated field A

Parametr – Parameter	Pole uprawne A – Cultivated field A						
	% zawartość frakcji % content of fractions			pH [KCl]	pH [H_2O]	OM	CEC
	1-0,1 (mm)	0,1-0,02 (mm)	<0,02 (mm)	(–)	(–)	(%)	(cmol·kg^{-1})
	Warstwa – layer 30-40 cm						
Liczba punktów Number of points	150	150	150	150	150	150	150
Średnia – Mean	48,8	34,9	16,2	4,4	5,002	0,308	10,0
Wariancja – Variance	73,6	59,6	20,8	0,069	0,127	0,069	11,7
Odchylenie standardowe Standard deviation	8,6	7,72	4,56	0,262	0,356	0,263	3,42
Współczynnik zmienności Coefficient of variation	17,6	22,1	28,1	6,0	7,1	85,6	34,3
Asymetria – Skewness	0,476	0,167	–0,169	0,608	0,230	1,035	1,089
Kurtoza – Kurtosis	3,795	2,798	4,263	3,457	2,350	3,913	5,550
Minimum – Minimum	29	17	3	3,85	4,26	0,003	3
25th %tile	43	30	14	4,22	4,72	0,085	7,6
Mediana – Median	49	34	17	34,36	4,97	0,249	9,6
75th %tile	54	40	19	4,55	5,28	0,451	11,6
Maksimum – Maximum	78	54	32	5,20	5,90	1,227	25,6

Tabela 11. Statystyka zawartości frakcji granulometrycznych, odczynu (pH), zawartości materii organicznej (OM) i pojemności kationowymienej (CEC) w warstwie 0-10 cm z pola uprawnego B

Table 11. Summarical statistic of granulometric fraction, acidity (pH), organic mater content (OM) and cation exchange capacity (CEC) in 0-10 cm layer for cultivated field B

Parametr – Parameter	Pole uprawne B – Cultivated field B						
	% zawartość frakcji % content of fractions			pH [KCl]	pH [H_2O]	OM	CEC
	1-0,1 (mm)	0,1-0,02 (mm)	<0,02 (mm)	(–)	(–)	(%)	(cmol·kg^{-1})
	Warstwa – layer 0-10 cm						
Liczba punktów Number of points	50	50	50	50	50	50	50
Średnia – Mean	54,7	34,5	10,8	4,18	4,81	0,804	10,3
Wariancja – Variance	57,1	45,5	23,0	0,143	0,173	0,076	14,6
Odchylenie standardowe Standard deviation	7,56	6,74	4,79	0,378	0,416	0,276	3,82
Współczynnik zmienności Coefficient of variation	13,8	19,5	44,4	9,0	8,6	34,4	37,0
Asymetria – Skewness	0,005	0,273	1,377	1,688	0,918	–0,123	1,164
Kurtoza – Kurtosis	2,618	2,213	5,1	6,616	3,521	4,323	4,429
Minimum – Minimum	39	22	4	3,75	4,21	0,1	4,53
25th %tile	49	30	7,5	3,93	4,51	0,668	7,57
Mediana – Median	55,5	33	9,5	4,09	4,74	0,832	9,63
75th %tile	59,5	40	13	4,26	4,99	0,973	11,6
Maksimum – Maximum	72	49	26	5,69	6,06	1,675	23,2

Tabela 12. Statystyka zawartości frakcji granulometrycznych, odczynu (pH), zawartości materii organicznej (OM) i pojemności kationowymienej (CEC) w warstwie 30-40 cm z pola uprawnego B

Table 12. Summarical statistic of granulometric fraction, acidity (pH), organic mater content (OM) and cation exchange capacity (CEC) in 30-40 cm layer for cultivated field B

Parametr – Parameter	Pole uprawne B – Cultivated field B						
	% zawartość frakcji % content of fractions			pH [KCl]	pH [H_2O]	OM	CEC
	1-0,1 (mm)	0,1-0,02 (mm)	<0,02 (mm)	(–)	(–)	(%)	(cmol·kg^{-1})
	Warstwa – layer 30-40 cm						
Liczba punktów Number of points	50	50	50	50	50	50	50
Średnia – Mean	50,6	36,3	13,2	4,3	4,828	0,313	7,8
Wariancja – Variance	110,2	80,5	18,1	0,114	0,122	0,063	9,5
Odchylenie standardowe Standard deviation	10,5	8,97	4,25	0,337	0,349	0,251	3,1
Współczynnik zmienności Coefficient of variation	20,8	24,7	32,3	7,8	7,2	80,2	39,4
Asymetria – Skewness	0,476	–0,325	–0,067	2,619	1,595	0,766	0,087
Kurtoza – Kurtosis	2,975	3,117	3,178	11,341	5,601	2,882	2,211
Minimum – Minimum	32	14	3	3,81	4,31	0,005	2,2
25th %tile	44	30,5	11	4,15	4,62	0,079	5,3
Mediana – Median	48,5	37	13	4,24	4,76	0,257	7,6
75th %tile	57	42,5	16	4,35	4,90	0,480	10,4
Maksimum – Maximum	77	56	24	5,77	5,99	0,945	13,8

Tabela 13. Statystyka zawartości frakcji granulometrycznych, odczynu (pH), zawartości materii organicznej (OM) i pojemności kationowymienej (CEC) w warstwie 0-10 cm na nieużytku C

Table 13. Summarical statistic of granulometric fraction, acidity (pH), organic mater content (OM) and cation exchange capacity (CEC) in 0-10 cm layer for uncultivated field C

Parametr – Parameter	Nieużytek – Uncultivated field C						
	% zawartość frakcji % content of fractions			pH [KCl]	pH [H_2O]	OM	CEC
	1-0,1 (mm)	0,1-0,02 (mm)	<0,02 (mm)	(–)	(–)	(%)	(cmol·kg^{-1})
	Warstwa – layer 0-10 cm						
Liczba punktów Number of points	50	50	50	50	50	50	50
Średnia – Mean	64,5	26,7	8,8	3,59	4,09	0,831	9,87
Wariancja – Variance	28,8	18,4	9,7	0,01	0,04	0,021	6,19
Odchylenie standardowe Standard deviation	5,37	4,29	3,11	0,102	0,201	0,145	2,49
Współczynnik zmienności Coefficient of variation	8,3	16,1	35,3	2,9	4,9	17,4	25,2
Asymetria – Skewness	0,029	0,174	0,735	1,389	1,358	–0,309	0,687
Kurtoza – Kurtosis	3,139	3,806	3,607	5,372	4,934	2,878	3,173
Minimum – Minimum	53	15	3	3,47	3,88	0,42	4,98
25th %tile	61	24	7	3,51	3,91	0,72	8,51
Mediana – Median	65	27	8	3,57	4,06	0,85	9,48
75th %tile	67,5	29	10	3,64	4,18	0,92	10,88
Maksimum – Maximum	77	39	17	3,97	4,76	1,1	16,13

Tabela 14. Statystyka zawartości frakcji granulometrycznych, odczynu (pH), zawartości materii organicznej (OM) i pojemności kationowymienej (CEC) w warstwie 0-10 cm na nieużytku C

Table 14. Summarical statistic of granulometric fraction, acidity (pH), organic mater content (OM) and cation exchange capacity (CEC) in 0-10 cm layer for uncultivated field C

Parametr – Parameter	Nieużytek – Uncultivated field C						
	% zawartość frakcji % content of fractions			pH [KCl]	pH [H_2O]	OM	CEC
	1-0,1 (mm)	0,1-0,02 (mm)	<0,02 (mm)	(–)	(–)	(%)	(cmol·kg^{-1})
	Warstwa – layer 30-40 cm						
Liczba punktów Number of points	50	50	50	50	50	50	50
Średnia – Mean	59,9	28,3	11,8	3,99	4,48	0,303	8,62
Wariancja – Variance	57,0	39,0	23,9	0,008	0,017	0,017	5,64
Odchylenie standardowe Standard deviation	7,55	6,24	4,89	0,091	0,131	0,131	2,38
Współczynnik zmienności [%] Coefficient of variation	12,6	22,0	41,4	2,3	2,9	43,3	27,5
Asymetria – Skewness	0,092	–0,236	0,958	–0,494	0,476	1,038	0,804
Kurtoza – Kurtosis	3,042	3,098	3,31	2,672	2,925	4,107	3,971
Minimum – Minimum	44,0	13,0	4	3,76	4,24	0,080	4,10
25th %tile	55,0	24,5	8	3,94	4,37	0,205	7,16
Mediana – Median	59,5	28,5	10	4,00	4,48	0,270	8,06
75th %tile	64,0	32,5	14	4,06	4,57	0,375	10,20
Maksimum – Maximum	78,0	42,0	26	4,15	4,84	0,720	16,45

Tabela 15. Statystyka gęstości gleby w warstwie 0-6 cm na wiosnę i po żniwach na polu uprawnym A i B oraz plonu mieszanki owsa, pszenicy i jęczmienia na polu A i plonu żyta na polu B w roku 2002

Table 15. Summarical statistic of bulk density in 0-6cm layer in spring and summer for cultivated field A and B. Statistics for yield in 2002 is given also

Parametr – Parameter	Pole uprawne – cultivated field A			Pole uprawne – cultivated field B		
	Gęstość – bulk density * ($Mg \cdot m^{-3}$)	Gęstość – bulk density ** ($Mg \cdot m^{-3}$)	Plon – Yield (g)	Gęstość – bulk density * ($Mg \cdot m^{-3}$)	Gęstość – bulk density ** ($Mg \cdot m^{-3}$)	Plon – Yield (g)
Liczba punktów Number of points	116	130	72	50	50	30
Średnia – Mean	1,302	1,380	188,0	1,386	1,409	301,7
Wariancja – Variance	0,016	0,009	2747,2	0,013	0,010	4742,2
Odchylenie standardowe Standard deviation	0,128	0,095	52,4	0,112	0,097	68,9
Współczynnik zmienności Coefficient of variation	9,796	6,907	27,9	8,107	6,917	22,8
Asymetria – Skewness	0,158	–0,420	0,140	–0,769	–0,058	1,351
Kurtoza – Kurtosis	2,143	2,741	3,353	3,535	4,356	7,626
Minimum – Minimum	1,025	1,134	55,1	1,051	1,159	177,3
25th %tile	1,214	1,325	153,5	1,321	1,367	269,0
Mediana – Median	1,294	1,388	186,9	1,396	1,400	296,5
75th %tile	1,409	1,450	216,1	1,467	1,458	332,7
Maksimum – Maximum	1,575	1,576	325,1	1,574	1,689	555,7

* wiosna – spring , ** lato – summer.

Tabela 16. Korelacje badanych cech gleby z warstwy 0-10 cm (0) i 30-40 cm (30)
Table 16. Correlation between soil physical properties in 0-10 cm (0) and 30-40 cm (30) layers

	Piasek Sand 0	Pył Silt 0	Ił Clay 0	pH KCl 0	pH H2O 0	OM 0	CEC 0	Piasek Sand 30	Pył Silt 30	Ił Clay 30	pH KCl 30	pH H_2O 30	OM 30	CEC 30
Piasek Sand 0	1,00	**–0,90**	**–0,68**	0,05	0,04	–0,07	**–0,28**	**0,51**	**–0,43**	**–0,41**	0,04	0,00	–0,07	**–0,22**
Pył Silt 0		1,00	**0,30**	**–0,11**	**–0,10**	**0,10**	**0,14**	**–0,50**	**0,48**	**0,30**	**–0,10**	–0,07	0,06	**0,13**
Ił Clay 0			1,00	0,07	0,08	–0,02	**0,40**	**–0,28**	**0,13**	**0,39**	0,08	**0,12**	0,04	**0,28**
pH KCl 0				1,00	**0,98**	**0,14**	0,06	0,06	**–0,17**	**0,13**	**0,77**	**0,74**	–0,01	**0,12**
pH H_2O 0					1,00	**0,12**	0,05	0,05	**–0,16**	**0,14**	**0,74**	**0,73**	–0,02	**0,11**
OM 0						1,00	**0,45**	**–0,16**	**0,09**	**0,18**	**0,11**	**0,11**	0,08	**0,15**
CEC 0							1,00	**–0,15**	0,07	**0,21**	**0,10**	**0,13**	0,01	**0,24**
Piasek Sand 30								1,00	**–0,89**	**–0,70**	0,08	0,06	–0,09	**–0,34**
Pył Silt 30									1,00	**0,30**	**–0,17**	**–0,18**	**0,14**	**0,11**
Ił Clay 30										1,00	**0,10**	**0,14**	–0,03	**0,53**
pH KCl 30											1,00	**0,95**	–0,02	**0,11**
pH H2O 30												1,00	–0,03	**0,13**
OM 30													1,00	**0,22**
CEC 30														1,00

Wyznaczone współczynniki korelacji są istotne z $p < 0,05$; $N = 464$. Istotne korelacje wyróżnione są pogrubieniem.
Correlation coefficients were determined for $p < 0,05$ and $N = 464$. Significant correlations are written in bold letters.

4.3. Wyniki analizy geostatystycznej

Dane pomiarowe z obszaru gminy i pól przeanalizowano pod kątem wykrycia trendu w rozkładzie przestrzennym badanych cech gleby. W przypadku pól stwierdzono, że parametry równań liniowych wskazują na znikomy trend malejący w jednym, a rosnący w drugim kierunku lub jego brak. W obrębie gminy obserwowano niewielki trend rosnący dla zawartości piasku, malejący zaś dla zawartości pyłu i iłu oraz wartości pH. Materia organiczna, pojemność kationowymienna oraz plon również nie wykazywały wyraźnych trendów w danych. W przypadku tych obiektów można przyjąć, że rozpatrywane cechy spełniają warunek stacjonarności procesu lub kwasi-stacjonarności wymagany przy analizie geostatystycznej [31]. Ponadto, rozkłady wartości badanych cech gleby oraz plonu były zbliżone do rozkładu normalnego.

Zmienność przestrzenną każdej z rozpatrywanych cech gleby na danym obiekcie badano przy użyciu semiwariogramów. Określano wartości samorodków, progi i zakresy autokorelacji przestrzennej oraz dopasowywano modele semiwariogramów do empirycznych wartości wraz z określeniem parametrów dopasowania modeli (tab. 17, 18). Jakość dopasowania modeli teoretycznych semiwariogramów do empirycznych danych określano współczynnikiem determinacji R^2 i sumą kwadratów reszt RSS, przy czym pod uwagę brano wartości z modelu i empirycznych danych semiwariogramu. Wysokie wartości współczynników determinacji (dochodzące do $R^2 > 0,85$) oraz niewielkie wartości sumy kwadratów reszt ($RSS<10^{-6}$) stwierdzone w zdecydowanej większości przypadków wskazują, że można z dość dobrą zgodnością dopasować modele teoretyczne do empirycznych semiwariogramów.

Stwierdzono przestrzenną zależność badanych cech prawie na wszystkich obiektach. Kształt zależności przestrzennej w warstwie ornej i podornej w zdecydowanej większości był sferyczny. Zależnością wykładniczą charakteryzowało się o połowę mniej zmiennych niż sferyczną i tylko dwie zmienne miały zależność liniową, gdzie wystąpił czysty efekt samorodka (tj. brak przestrzennej zależności). Na obszarze gminy zdecydowanie przeważał wykładniczy charakter zależności przestrzennej, natomiast na polach sferyczny. Parametry samiwariogramów wskazują, że występuje tu efekt samorodka. Świadczy to o tym, że zmienność badanych cech jest mniejsza niż przyjęta w pomiarach polowych minimalna odległość pobieranych próbek glebowych. Wartości wysycenia semiwariancji są porównywalne z wartościami wariancji wyznaczonej w sposób klasyczny (tab. 4-

15). Z analizy tych wartości można sądzić, że zarówno w obrębie gminy jak i pól nie występują wyraźne trendy zmian badanych cech gleby. Wartości wysycenia semiwariogramów były pochodną zawartości poszczególnych frakcji. Największe ich wartości obserwowano dla frakcji piasku, zdecydowanie mniejsze dla pyłu, a najmniejsze dla iłu. Natomiast porównując warstwę orną i podorną stwierdzono wyższe wartości semiwariancji w warstwie podornej. W przypadku odczynu gleby (pH) i zawartości materii organicznej znacząco wyższe wartości semiwariancji obserwowano w gminie niż na polach uprawnych i nieużytku. Najmniejsze, zbliżone do siebie semiwariancje pojemności kationowymiennej zanotowano na nieużytku i polu uprawnym B. Gmina i pole uprawne A miały podobne semiwariancje, ale znacząco wyższe od poprzednich obiektów (ponad dwukrotnie).

Analizując zakresy przestrzennej zależności cech fizycznych i chemicznych można stwierdzić, że były one związane z wielkością badanego obiektu. Największe wartości zakresu autokorelacji przestrzennej zanotowano dla gminy (od 0,008 do 0,41°), na polu uprawnym A zawierał się on w przedziale od 23,6 do 1002 m, a na polu uprawnym B i nieużytku od 4,9 do 107,6 m.

Zakres zależności przestrzennej dla plonu był podobny na obu polach i wynosił około 27 m. Jednakże, na polu o mniejszej powierzchni (pole B z uprawą żyta) zaobserwowano prawie 1,8-krotnie wyższą semiwariancję dla plonu niż na polu o większej powierzchni, gdzie była uprawiana mieszanka owsa, pszenicy i jęczmienia.

Tabela 17. Parametry semiwariogramów cech gleby z warstwy 0-10 cm i 30-40 cm dla obszaru gminy i pola uprawnego A oraz plonu (2002 r)
Table 17. Semivariogram parameters of soil properties in 0-10 cm and 30-40 cm layers for commune area and cultivated field A, and yield (2002 year)

Parametr Parameter	Piasek Sand (%)	Pył Silt (%)	Ił Clay (%)	pH [KCl]	pH [H_2O]	OM ($m^3 \cdot m^{-3}$)	CEC ($cmol \cdot kg^{-1}$)	Plon Yield (g)
	Gmina – Commune, warstwa – layer 0-10 cm							
Model	Spherical	Spherical	Spherical	Exponential	Exponential	Exponential	Exponential	
Nugget $( )^2$	23,4	14,5	9,8	0,354	0,3134	0,18	6	
Sill $( )^2$	122	64,36	24,53	0,709	0,6278	0,07	6,8	
Range (°)	0,027	0,025	0,41	0,017	0,017	0,02	0,008	
	Gmina – Commune, warstwa – layer 30-40 cm							
Model	Exponential	Spherical	Exponential	Exponential	Exponential	Linear	Exponential	
Nugget $( )^2$	35	34,8	16,4	0,254	0,2519	0,0872	7,23	
Sill $( )^2$	200,1	83,74	49,19	0,527	0,5048	0,0872	17,12	
Range (°)	0,009	0,025	0,017	0,013	0,013	0,145	0,036	
	Pole uprawne – cultivated field A, warstwa – layer 0-10 cm							
Model	Exponential	Spherical	Spherical	Spherical	Spherical	Spherical	Spherical	Spherical
Nugget $( )^2$	27,08	28	11,24	0,07	0,08	0,107	10,5	11
Sill $( )^2$	54,17	38	22,24	0,09	0,1	0,12	15	2599
Range (m)	77,9	350	450	150	150	150	500	26,5
	Pole uprawne – cultivated field A, warstwa – layer 30-40 cm							
Model	Spherical	Spherical	Exponential	Spherical	Spherical	Spherical	Spherical	
Nugget $( )^2$	20,6	25	13,4	0,0253	0,0911	0,06	8,5	
Sill $( )^2$	76,2	62,61	46,8	0,0686	0,2052	0,076	13,5	
Range (m)	23,6	42,7	865,1	41,3	1002	500	500	

Spherical – sferyczny, Exponential – wykładniczy, Linear – liniowy, Nugget – samorodek, Sill – wysycenie, Range – zakres.

Tabela 18. Parametry semiwariogramów cech gleby z warstwy 0-10 cm i 30-40 cm dla pola uprawnego B i nieużytku C oraz plonu (2002 r)
Table 18. Semivariogram parameters of soil properties in 0-10 cm and 30-40 cm layers for cultivated field B and C, and yield (2002 year)

Parametr Parameter	Piasek Sand (%)	Pył Silt (%)	Ił Clay (%)	pH [KCl]	pH [H_2O]	OM ($m^3 \cdot m^{-3}$)	CEC ($cmol \cdot kg^{-1}$)	Plon Yield (g)
	Pole uprawne – cultivated field B, warstwa – layer 0-10 cm							
Model	Spherical	Spherical	Exponential	Spherical	Spherical	Exponential	Spherical	Spherical
Nugget $( )^2$	1,18	0,01	5,66	0,00004	0,0001	0,0161	0,33	10
Sill $( )^2$	28,74	17,42	11,33	0,011	0,042	0,0546	6,33	4596
Range (m)	12,2	13,5	28,4	12	12	310	16,6	28,7
	Pole uprawne – cultivated field B, warstwa – layer 30-40 cm							
Model	Spherical	Spherical	Linear	Spherical	Spherical	Exponential	Spherical	
Nugget $( )^2$	8,2	24,6	23,2	0,00016	0,00008	0,00184	3,014	
Sill $( )^2$	63,72	42	23,2	0,00801	0,01656	0,01718	5,8	
Range (m)	13,3	40	107,6	10,4	10,4	4,9	10	
	Nieużytek – uncultivated field C, warstwa – layer 0-10 cm							
Model	Spherical	Spherical	Exponential	Spherical	Spherical	Spherical	Spherical	
Nugget $( )^2$	2,89	0,92	5,93	0,00107	0,0049	0,0016	0,4	
Sill $( )^2$	30	18,14	14,46	0,01134	0,0443	0,0218	6,41	
Range (m)	8,5	7,4	69,9	12,1	11,7	13,4	17	
	Nieużytek – uncultivated field C, warstwa – layer 30-40 cm							
Model	Spherical	Spherical	Spherical	Spherical	Spherical	Exponential	Spherical	
Nugget $( )^2$	6,2	26,5	1,38	0,00056	0,00058	0,00142	0,4	
Sill $( )^2$	61,47	43	24,13	0,00847	0,01716	0,01684	5,78	
Range (m)	12,4	40	10	11,8	11,3	12,5	8,5	

Spherical – sferyczny, Exponential – wykładniczy, Linear – liniowy, Nugget – samorodek, Sill – wysycenie, Range – zakres.

4.4. Estymacja map i ich wstępna analiza

Wyznaczone dla poszczególnych cech gleby i plonu parametry i modele semiwariogramów oraz zmierzone dane z poszczególnych punktów pomiarowych zostały wykorzystane – przy użyciu metody krigingu – do wykreślenia map rozkładu przestrzennego badanych cech w obrębie danego obiektu (rys. 5-23), jak również do określenia wartości błędu popełnianego przy estymacji. Błąd estymacji dla wszystkich badanych cech gleby i plonu nie był większy niż 10% analizowanej cechy. W okolicach punktów pomiarowych błędy były znacznie mniejsze, około 1-2%, a największe błędy wystąpiły na obrzeżach siatek pomiarowych. Mapy zestawiono parami: górna mapa obrazuje rozkład badanej cechy w warstwie ornej, mapa umieszczona zaraz pod nią obrazuje tą samą cechę w warstwie podornej.

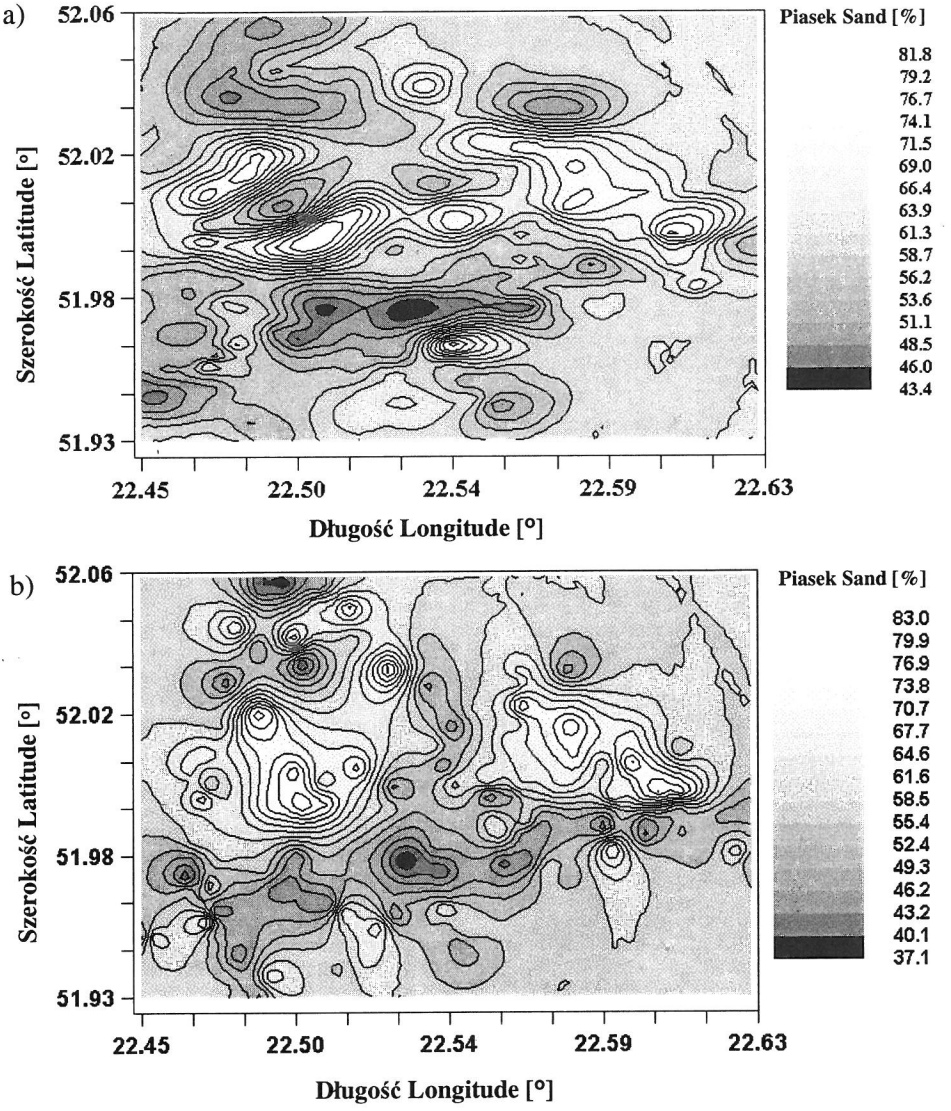
Generalnie można stwierdzić, że występuje ogólne podobieństwo w rozkładach danej cechy między warstwami. Nawet jeśli nie jest to dokładnie taki sam obraz rozkładu, to można znaleźć obszary, które są zbliżone wartościami oraz zachowują mniejsze lub większe podobieństwo jednej warstwy do drugiej. Mapy zawartości frakcji granulometrycznych w związku z tym, że ich suma zawsze musi być równa 100%, wykazują ogólne podobieństwo rozkładu poszczególnych frakcji, z tym, że ich wartości kształtują się odmiennie. Tam gdzie jest więcej piasku tam musi być mniej pyłu i iłu, i na odwrót. Biorąc jednak pod uwagę fakt, że mapy zostały wyestymowane za pomocą metody krigingu z pomiarów punktowych, można z pewnością znaleźć miejsca gdzie suma zawartości frakcji nie zawsze równa jest 100%. Jednak już samo rozpoznanie rozkładu przestrzennego poszczególnych frakcji dostarcza na tyle istotnych informacji (o zasięgu występowania określonych wartości, ukierunkowaniu ich zmian), że może być wykorzystane przy podejmowaniu decyzji o zagospodarowaniu danego obszaru.

Przy przeglądzie map wykonanych dla terenu gminy można zauważyć, że zawartość piasku była najwyższa w części środkowej gminy, pyłu i iłu w części północnej i południowej. Podobny układ zmian można zauważyć w rozkładzie wartości pH i pojemności kationowymiennej (CEC) w warstwie podornej. Zawartość materii organicznej miała układ bardziej wyspowy niż regularny (równoleżnikowy).

Znaczne zróżnicowanie w rozkładach przestrzennych zawartości frakcji granulometrycznych oraz wartości pH zaobserwowano również w przypadku wybranych pól, mimo iż ich powierzchnia wynosiła od 0,25 do 1,8 ha i można było spodziewać się większej jednorodności występującej tu gleby (rys. 12-23). Świadczy to o celowości pobierania większej liczby próbek przy określaniu wła-

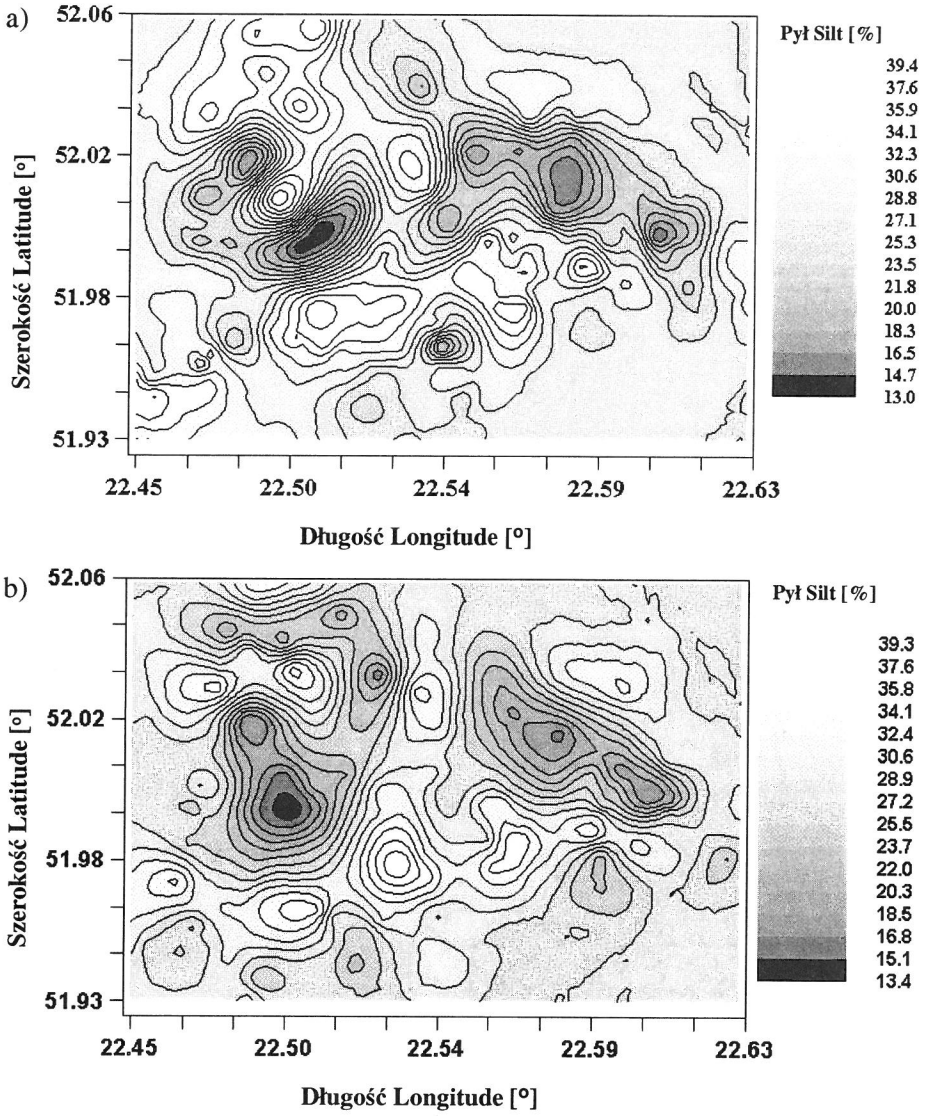
ściwości (cech) gleby na danym polu i konieczności wyznaczania rozkładu przestrzennego tych cech. Rozkład plonu na polach miał związek (w mniejszym lub większym stopniu) z rozkładami wszystkich badanych cech fizycznych i chemicznych gleby. Analizując rozkłady cech gleby na danym polu, mając ogólną wiedzę o wpływie każdej z nich na wzrost, rozwój i plonowanie roślin, można z dużym prawdopodobieństwem wskazać miejsca, gdzie plon będzie najmniejszy, gdzie średni, a gdzie wysoki. Wyestymowane obrazy rozkładu plonu na polach potwierdzają powyższy pogląd (rys. 15, 19).

Należy dodać, że wizualizacja pola wartości cech fizycznych i chemicznych gleby oraz wartości błędu estymacji pozwala wskazać te obszary na polu, w których należy zwiększyć (lub zmniejszyć) liczbę próbkowań w następnych pomiarach, aby uzyskany obraz badanej wielkości był wyznaczony z błędem nie większym niż założony przez eksperymentatora.



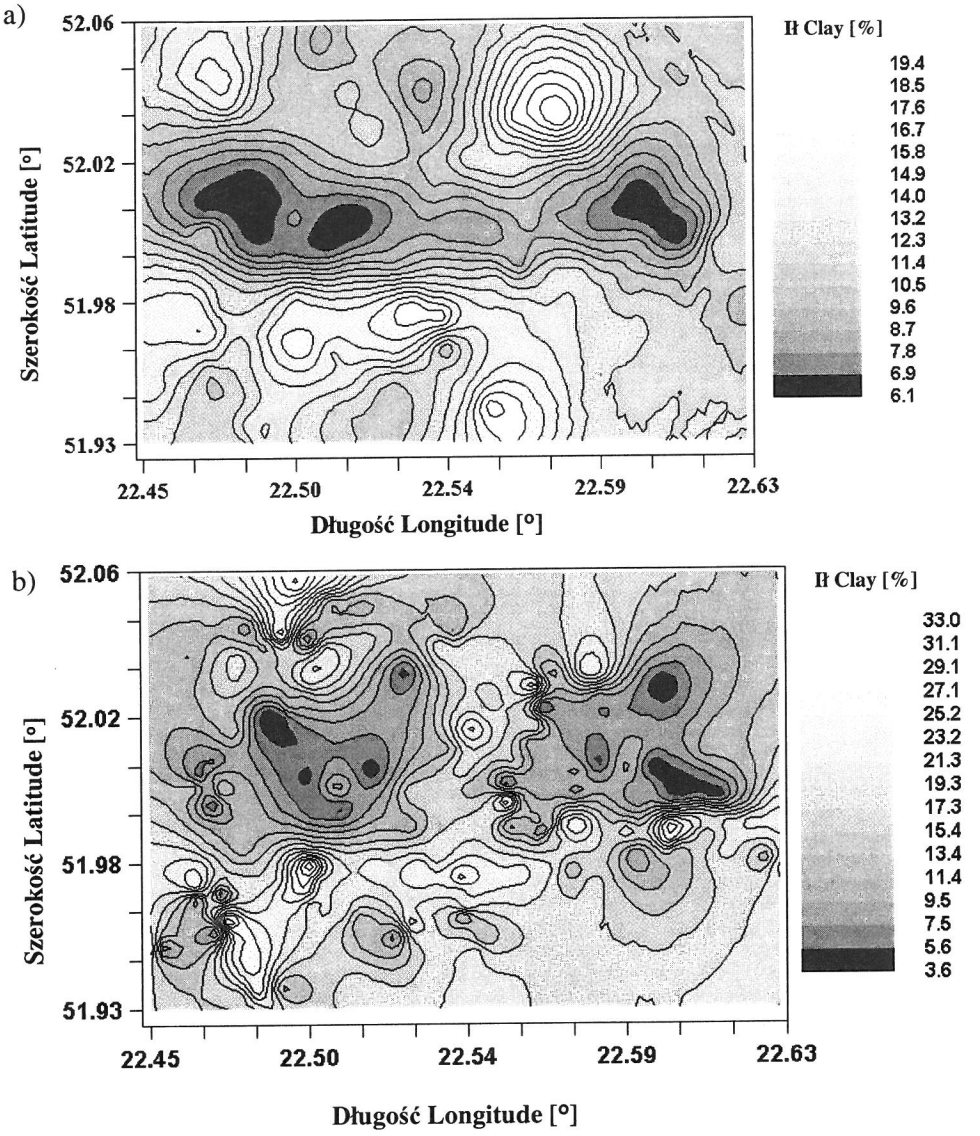
Rys. 5. Przestrzenny rozkład zawartości piasku w warstwie gleby 0-10 cm (a) i 30-40 cm (b) na obszarze gminy Trzebieszów

Fig. 5. Spatial distribution of sand content in the Trzebieszów commune area for 0-10 cm soil layer (a) and for 30-40 cm soil layer (b)



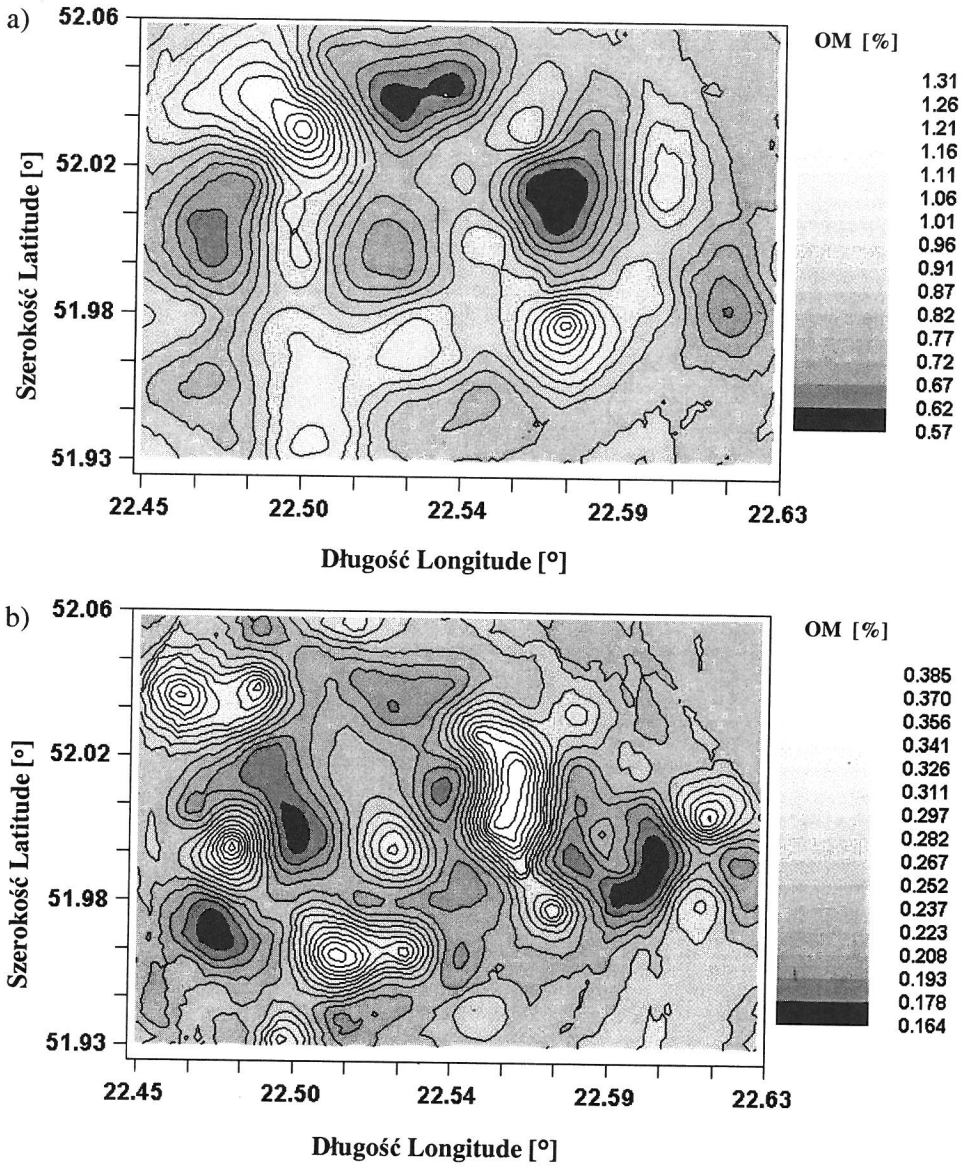
Rys. 6. Przestrzenny rozkład zawartości pyłu w warstwie gleby 0-10 cm (a) i 30-40 cm (b) na obszarze gminy Trzebieszów

Fig. 6. Spatial distribution of silt content in the Trzebieszów commune area for 0-10 cm soil layer (a) and for 30-40 cm soil layer (b)



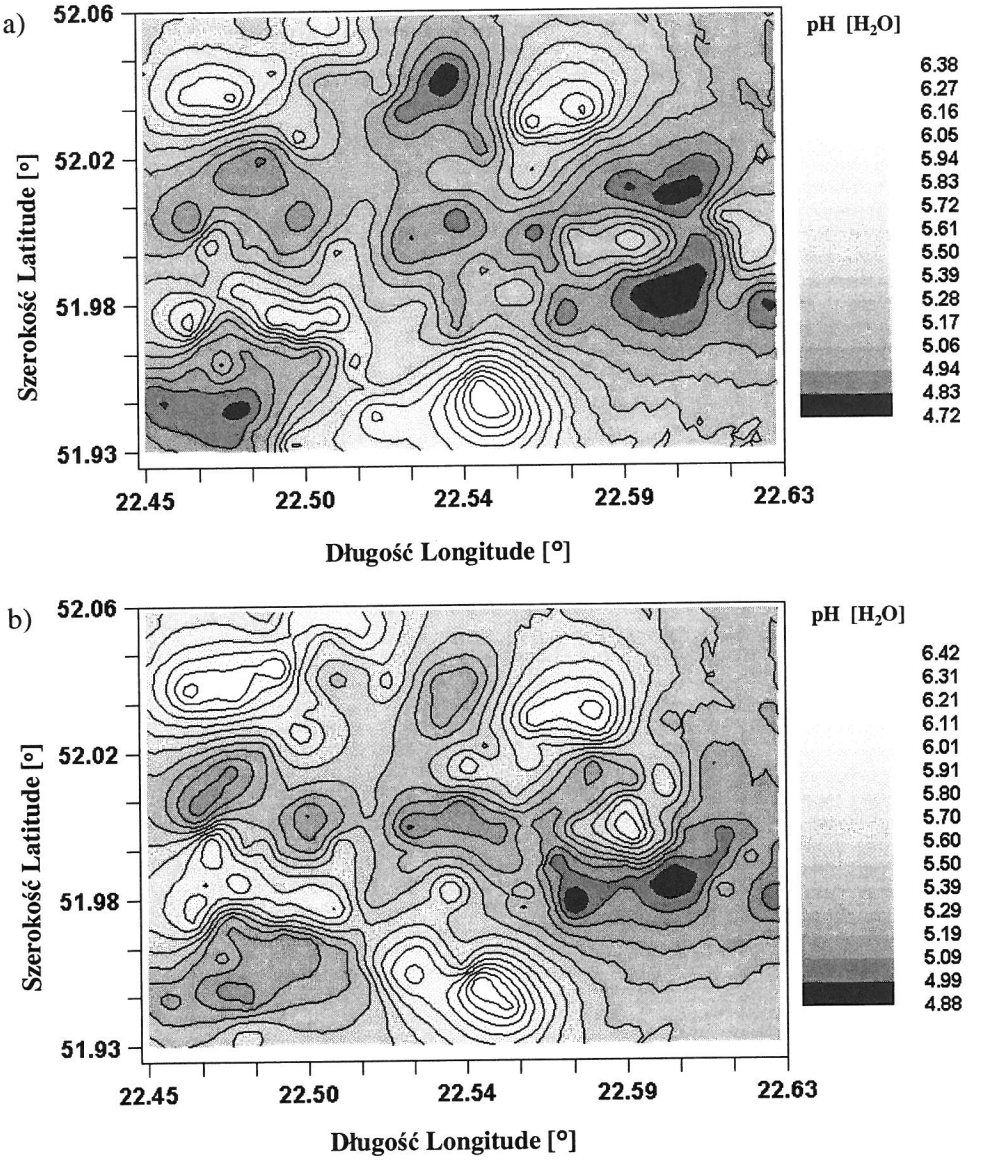
Rys. 7. Przestrzenny rozkład zawartości iłu w warstwie gleby 0-10 cm (a) i 30-40 cm (b) na obszarze gminy Trzebieszów

Fig. 7. Spatial distribution of clay content in the Trzebieszów commune area for 0-10 cm soil layer (a) and for 30-40 cm soil layer (b)



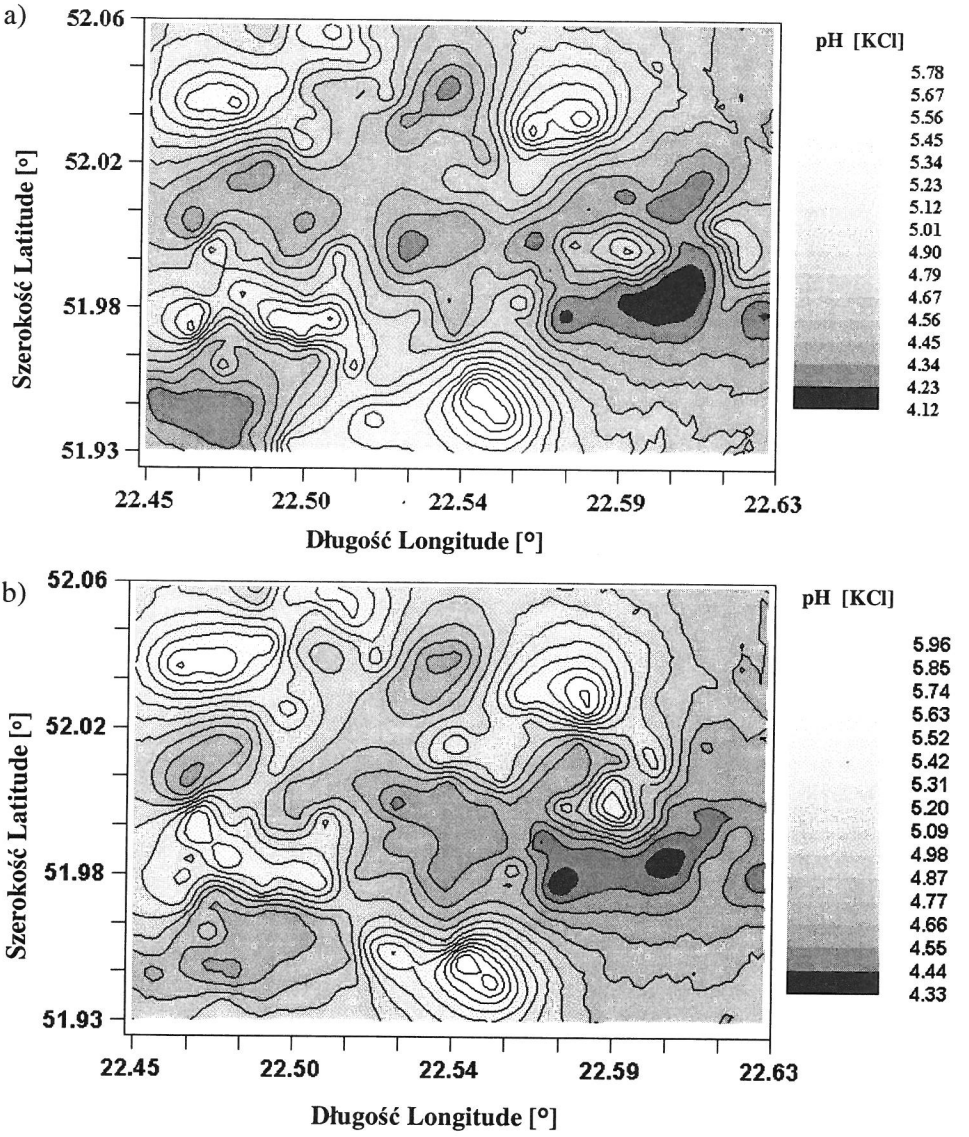
Rys. 8. Przestrzenny rozkład zawartości materii organicznej (OM) w warstwie gleby 0-10 cm (a) i 30-40 cm (b) na obszarze gminy Trzebieszów

Fig. 8. Spatial distribution of organic matter content in the Trzebieszów commune area for 0-10 cm soil layer (a) and for 30-40 cm soil layer (b)



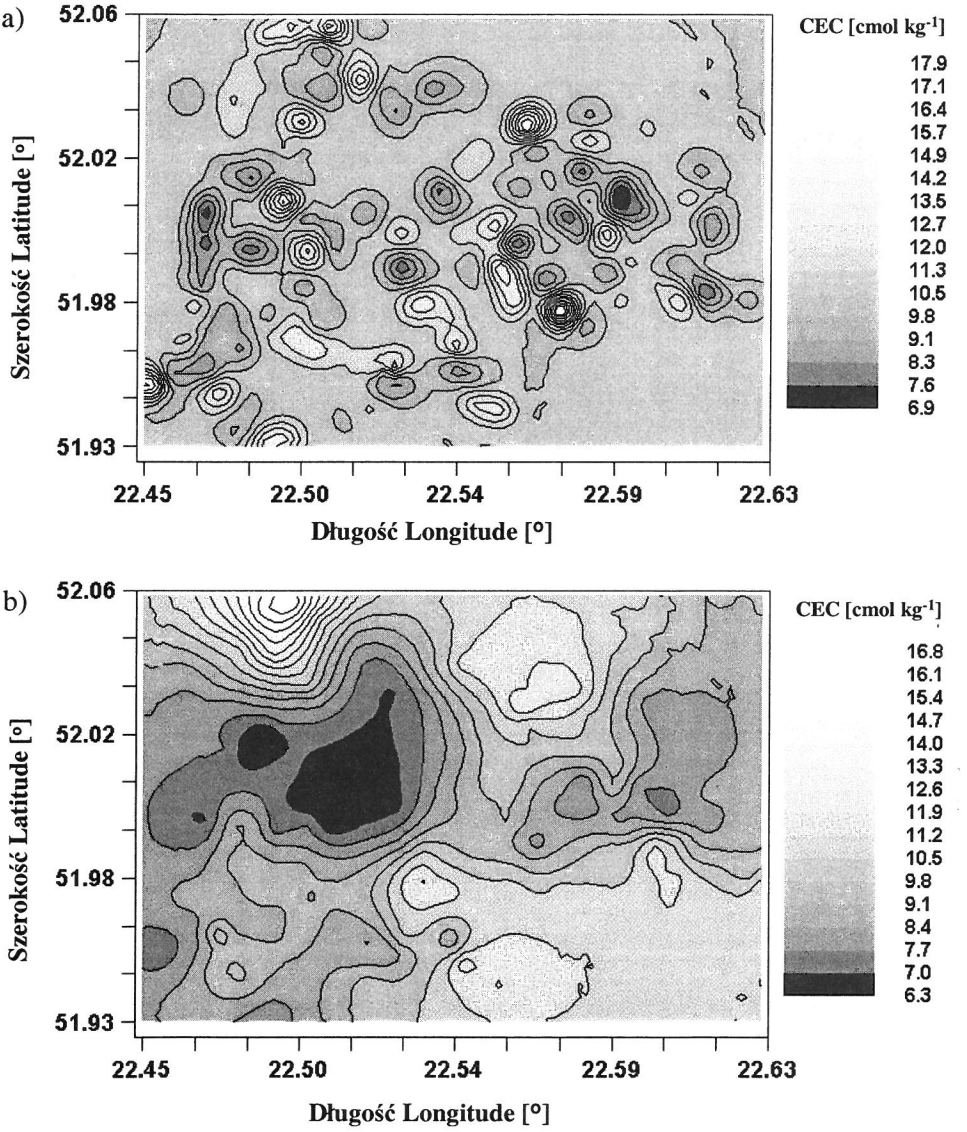
Rys. 9. Przestrzenny rozkład odczynu pH w H_2O w warstwie gleby 0-10 cm (a) i 30-40 cm (b) na obszarze gminy Trzebieszów

Fig. 9. Spatial distribution of pH H_2O in the Trzebieszów commune area for 0-10 cm soil layer (a) and for 30-40 cm soil layer (b)



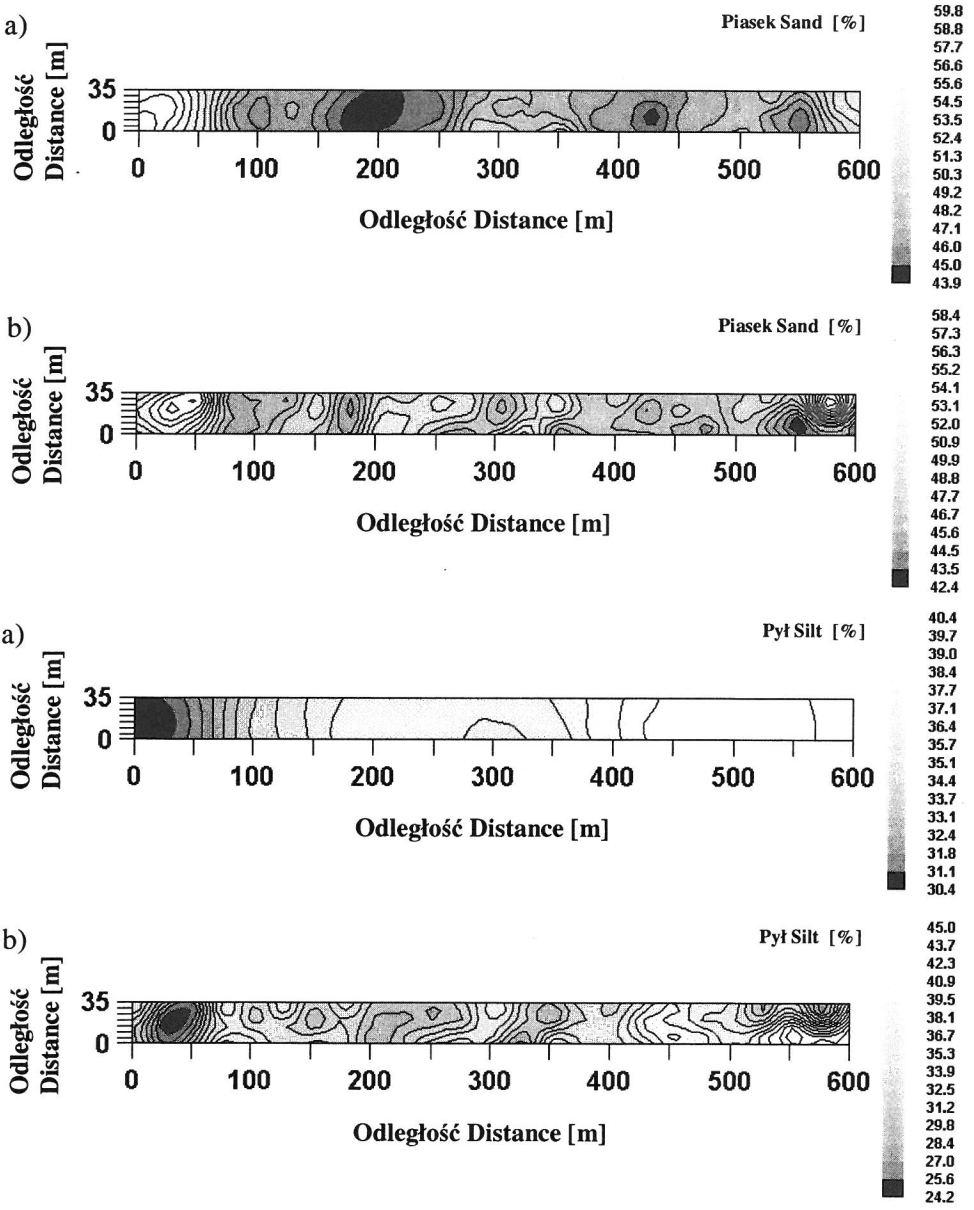
Rys. 10. Przestrzenny rozkład odczynu pH w KCl w warstwie gleby 0-10 cm (a) i 30-40 cm (b) na obszarze gminy Trzebieszów

Fig. 10. Spatial distribution of pH KCl in the Trzebieszów commune area for 0-10 cm soil layer (a) and for 30-40 cm soil layer (b)



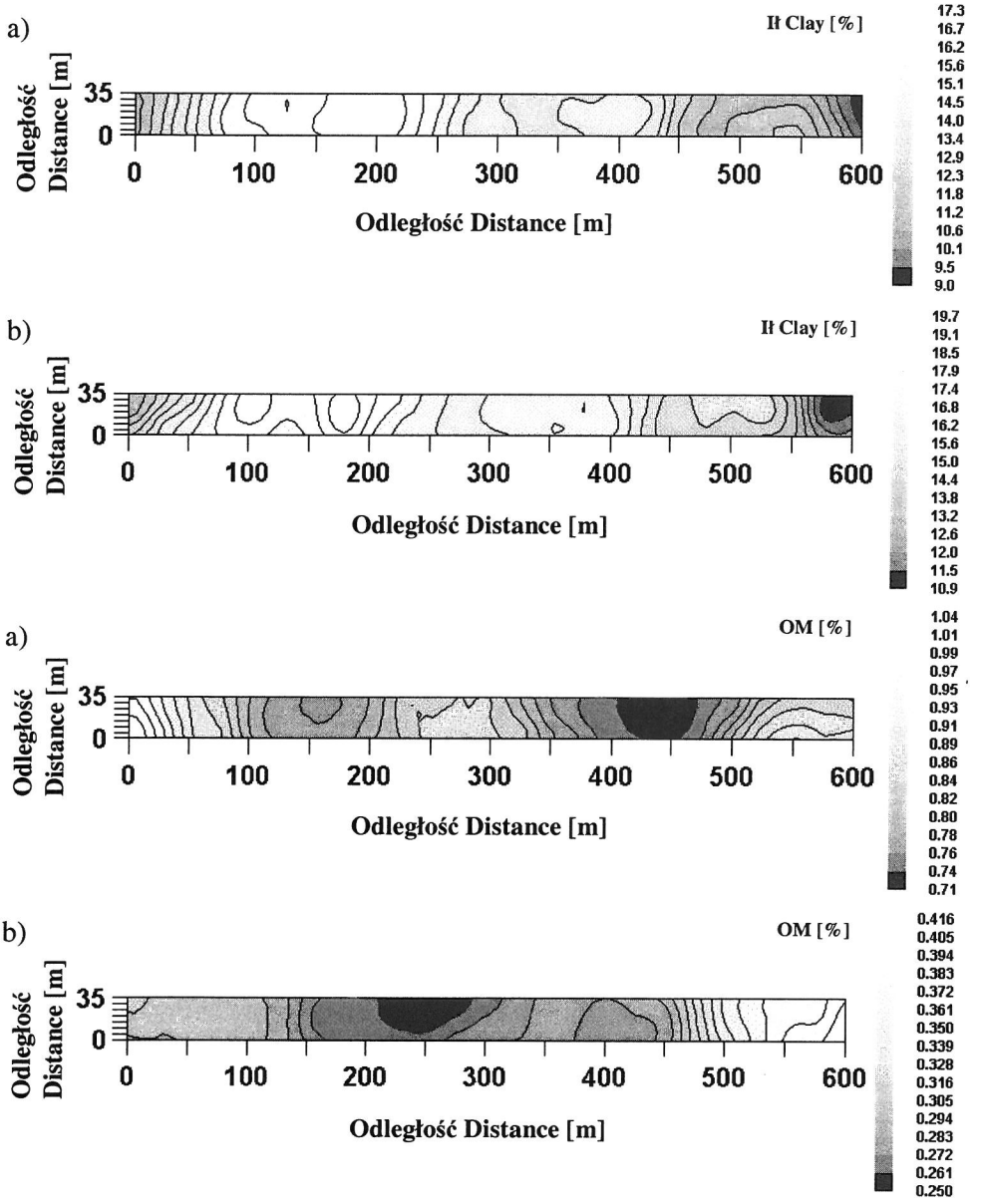
Rys. 11. Przestrzenny rozkład pojemności kationowymiennej (CEC) w warstwie gleby 0-10 cm (a) i 30-40 cm (b) na obszarze gminy Trzebieszów

Fig. 11. Spatial distribution of soil CEC in the Trzebieszów commune area for 0-10 cm soil layer (a) and for 30-40 cm soil layer (b)



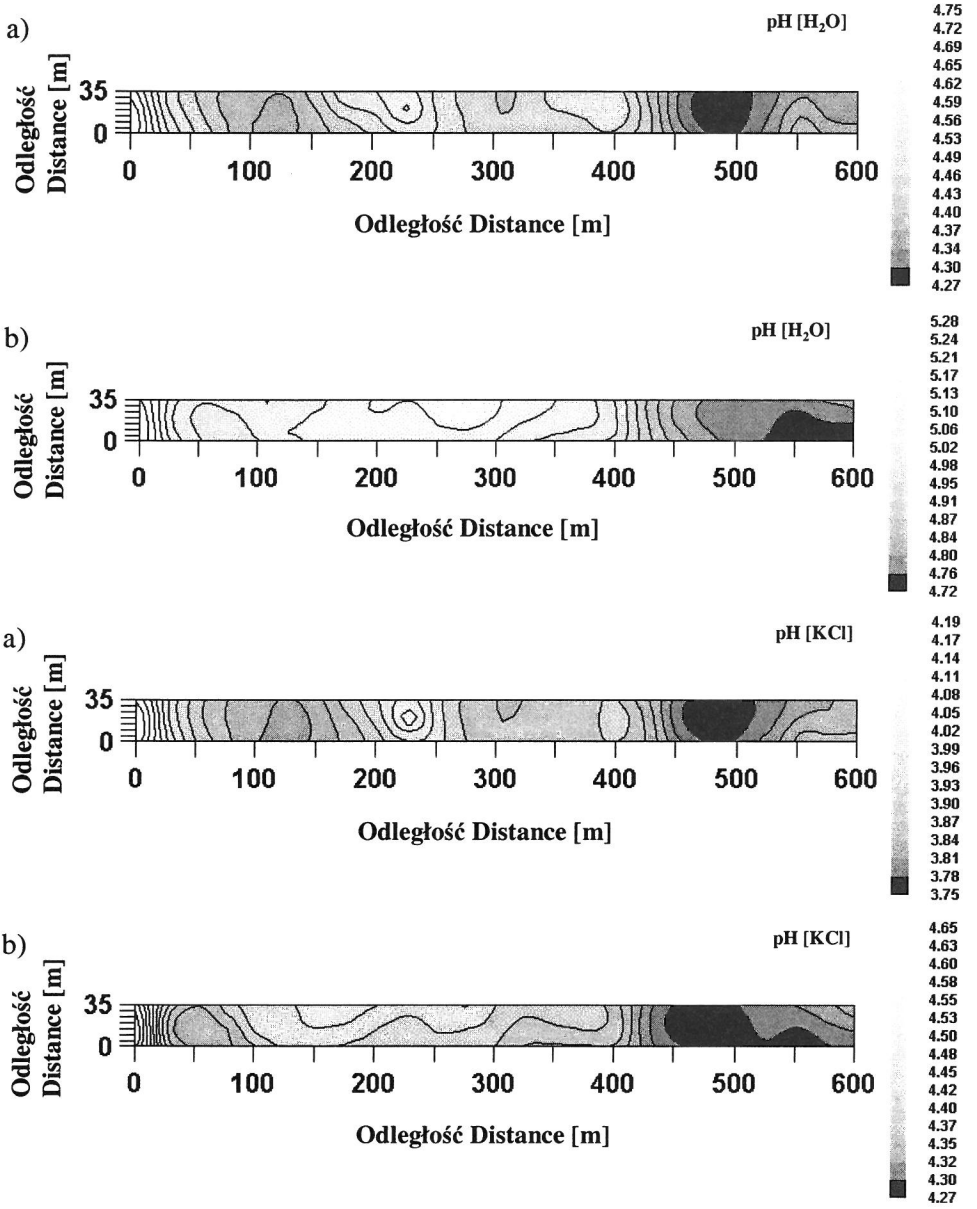
Rys. 12. Przestrzenny rozkład zawartości piasku i pyłu w warstwie gleby 0-10 cm (a) i 30-40 cm (b) na polu uprawnym A

Fig. 12. Spatial distribution of sand content in the cultivated field A for 0-10 cm soil layer (a) and for 30-40 cm soil layer (b)



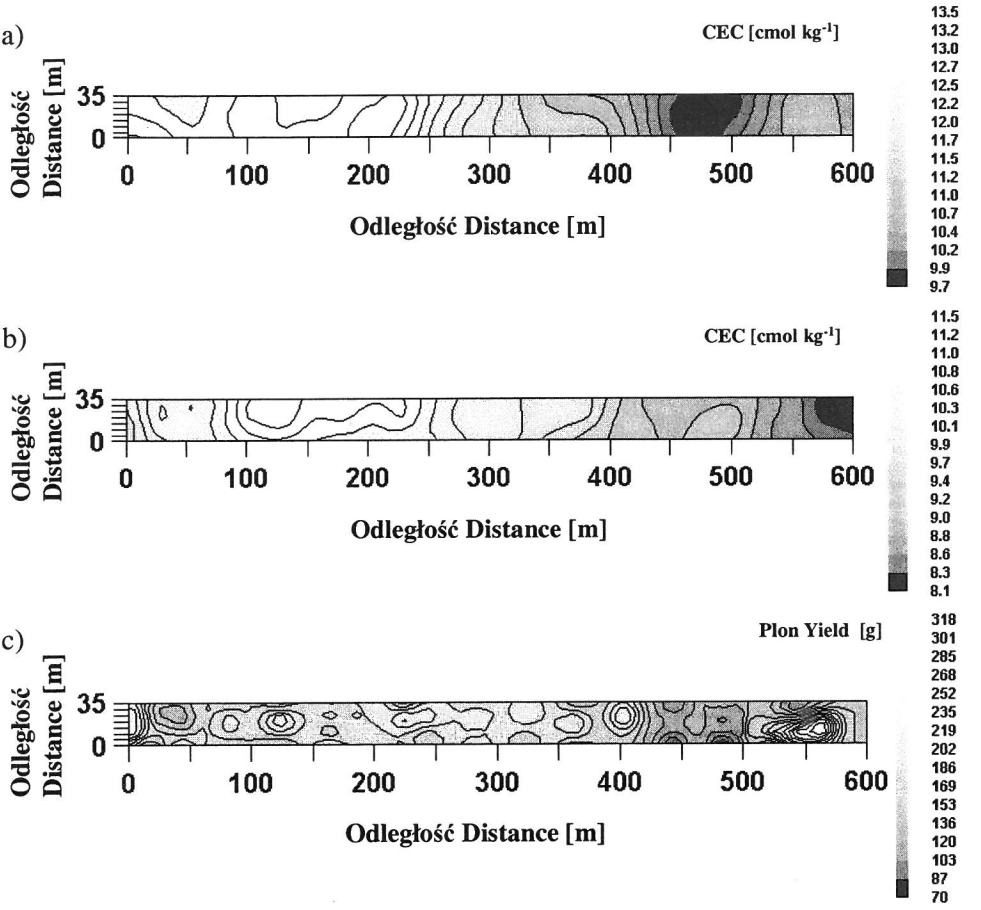
Rys. 13. Przestrzenny rozkład zawartości iłu i materii organicznej (OM) w warstwie gleby 0-10 cm (a) i 30-40 cm (b) na polu uprawnym A

Fig. 13. Spatial distribution of clay and organic matter (OM) content in the cultivated field A for 0-10 cm soil layer (a) and for 30-40 cm soil layer (b)



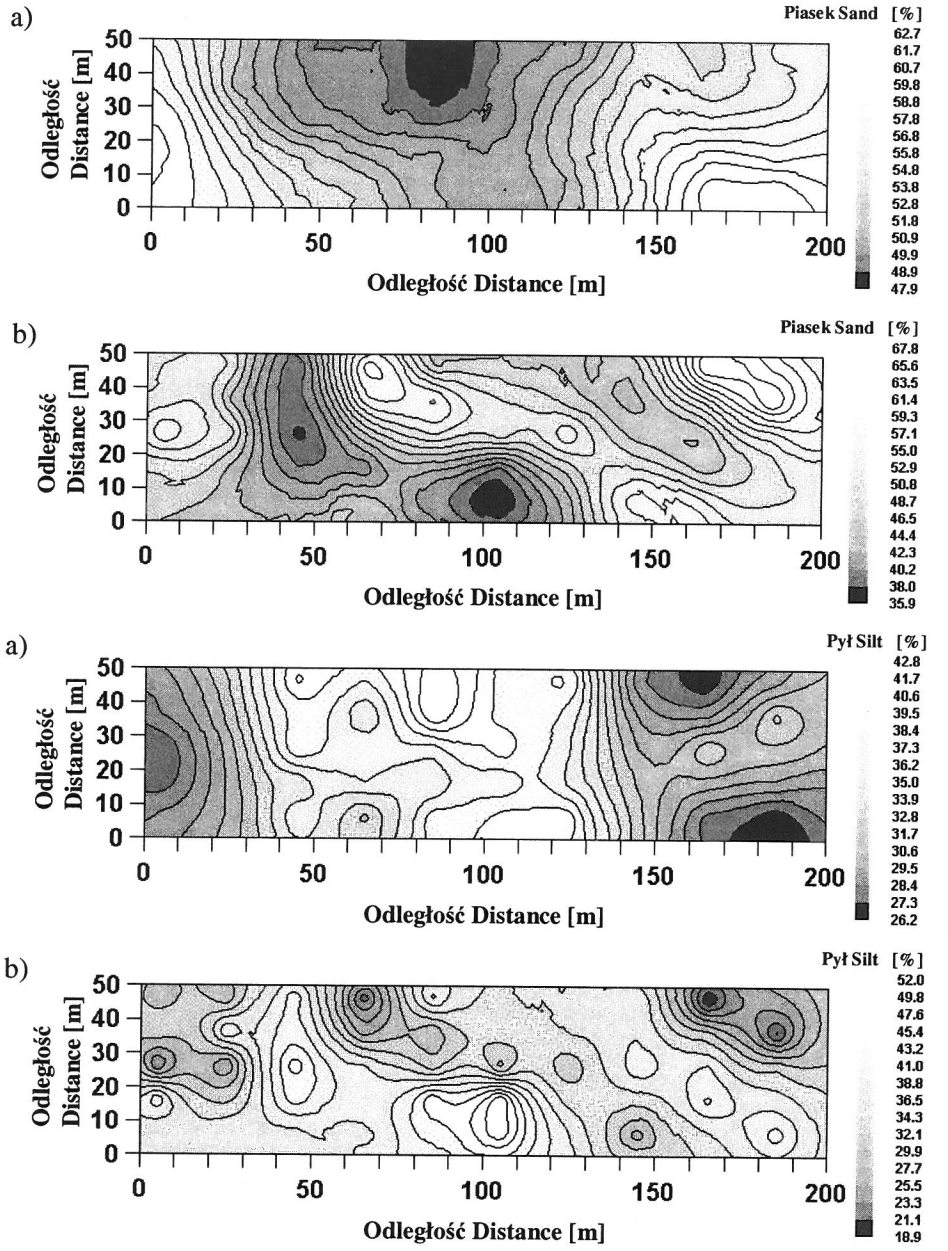
Rys. 14. Przestrzenny rozkład odczynu pH w H_2O i KCl w warstwie gleby 0-10 cm (a) i 30-40 cm (b) na polu uprawnym A

Fig. 14. Spatial distribution of pH H_2O and pH KCl in the cultivated field A for 0-10 cm soil layer (a) and for 30-40 cm soil layer (b)



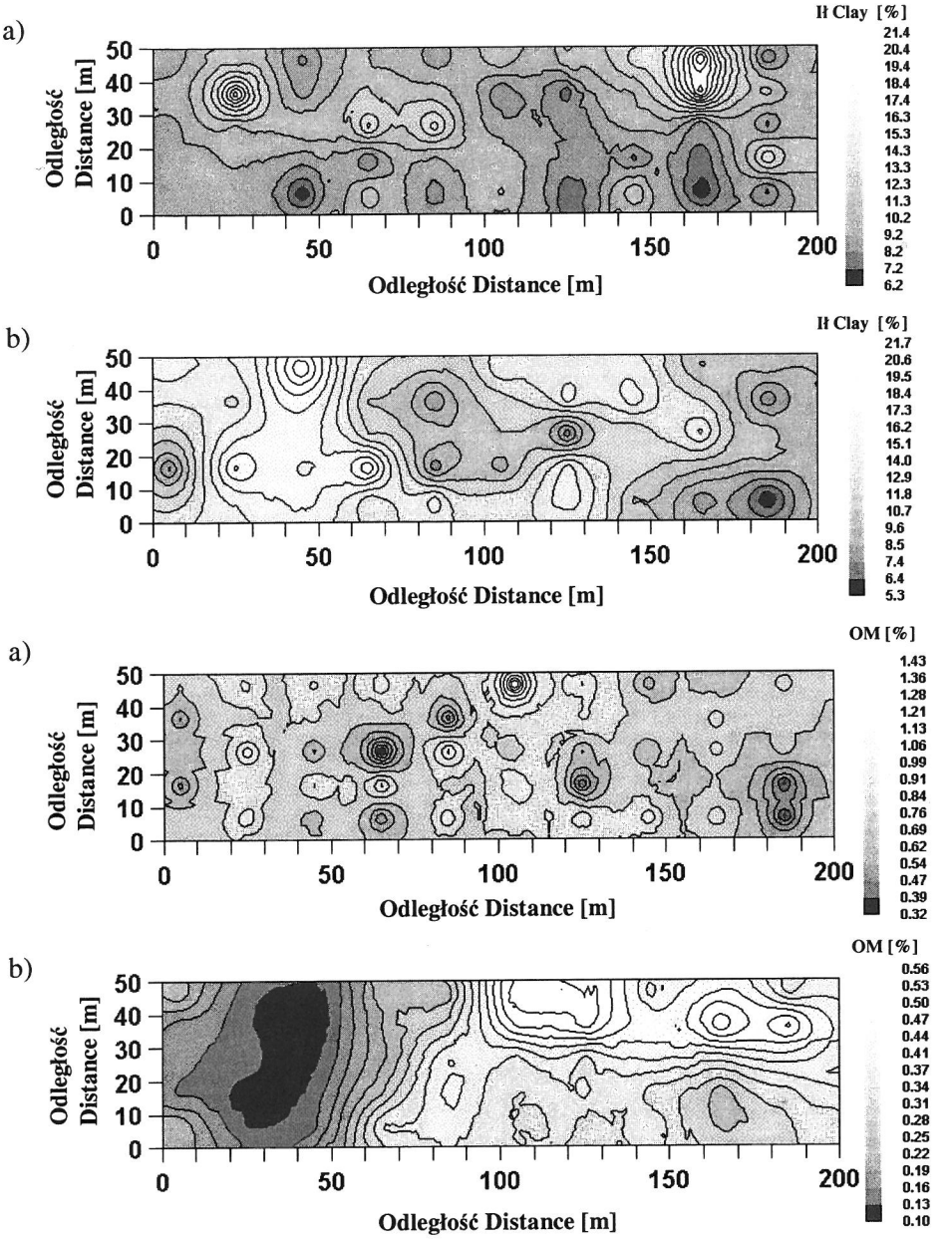
Rys. 15. Przestrzenny rozkład pojemności kationowymiennej (CEC) w warstwie gleby 0-10 cm (a) i 30-40 cm (b) oraz plonu w 2002 r. na polu uprawnym A (c)

Fig. 15. Spatial distribution of soil CEC in the cultivated field A for 0-10 cm soil layer (a) and for 30-40 cm soil layer (b) and of 2002 yield (c)



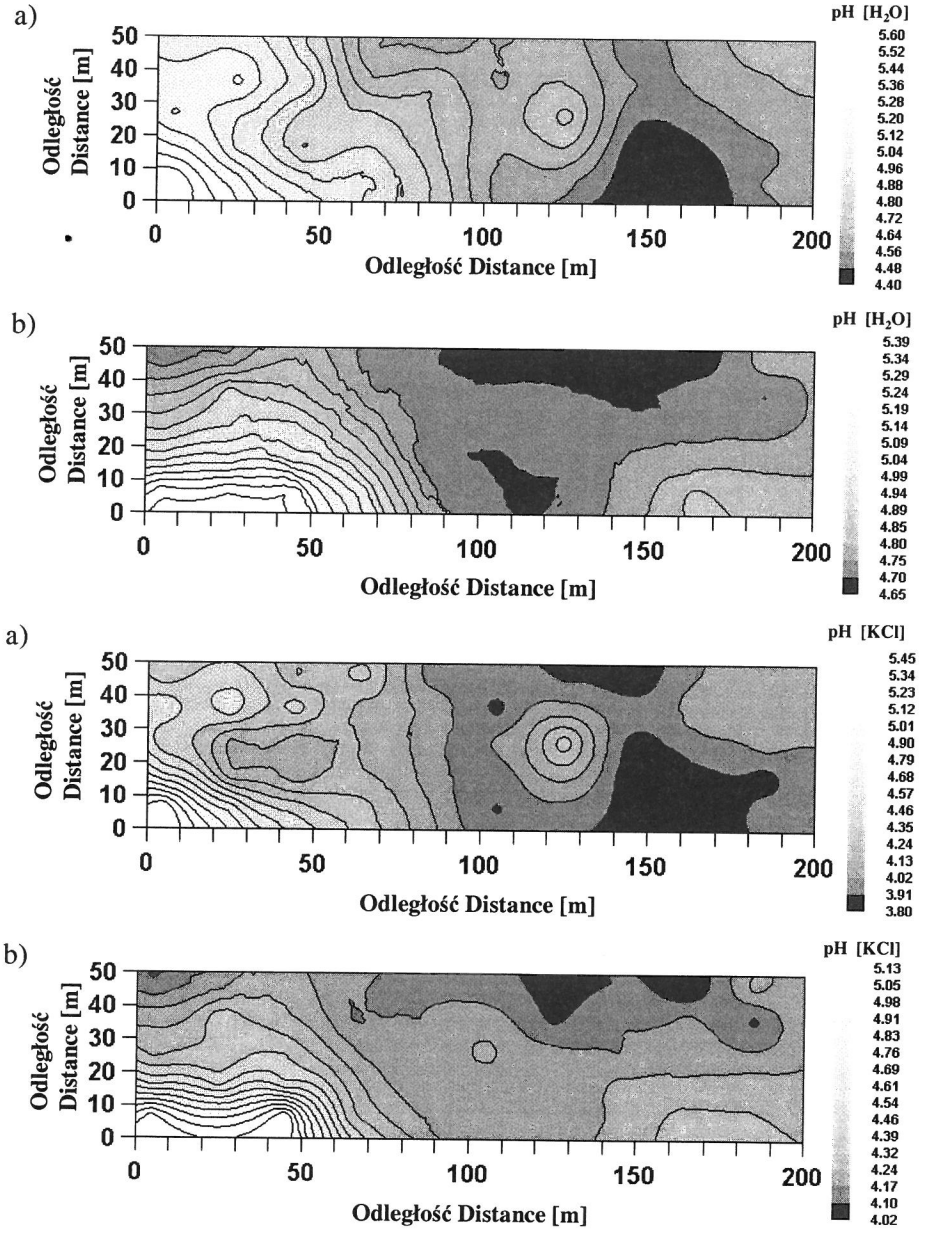
Rys. 16. Przestrzenny rozkład zawartości piasku i pyłu w warstwie gleby 0-10 cm (a) i 30-40 cm (b) na polu uprawnym B

Fig. 16. Spatial distribution of sand and silt content in the cultivated field B for 0-10 cm soil layer (a) and for 30-40 cm soil layer (b)



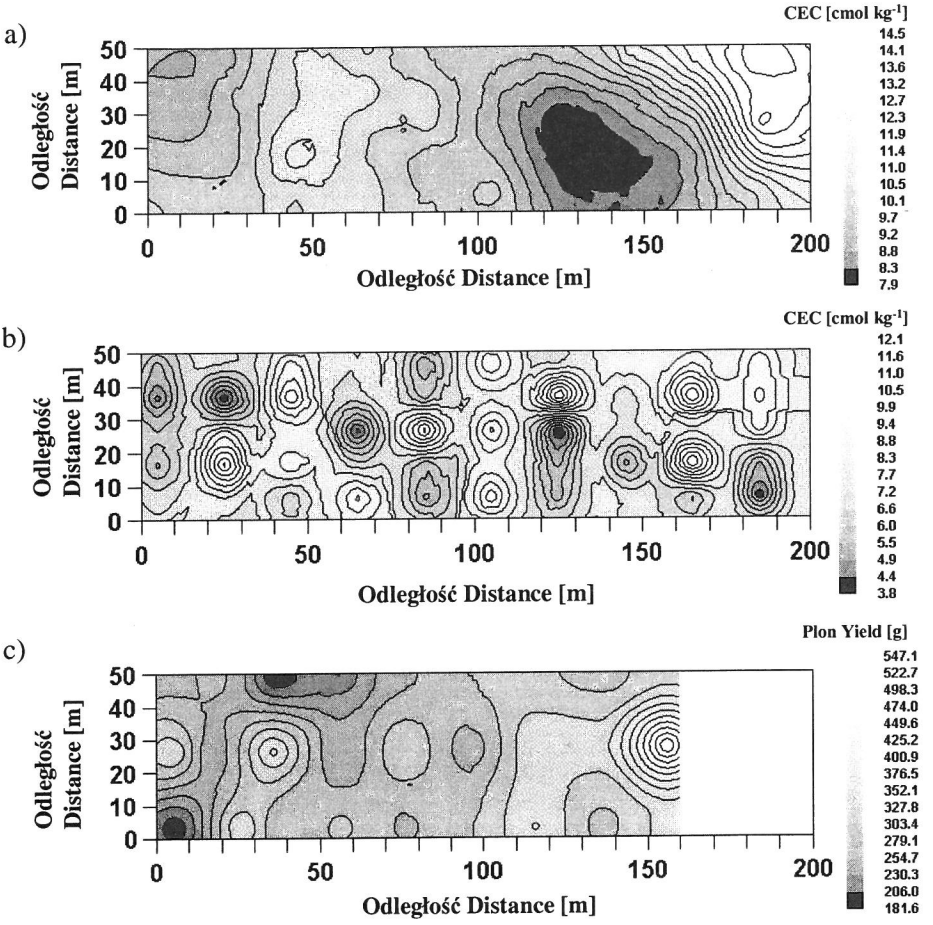
Rys. 17. Przestrzenny rozkład zawartości iłu i materii organicznej (OM) w warstwie gleby 0-10 cm (a) i 30-40 cm (b) na polu uprawnym B

Fig. 17. Spatial distribution of clay and organic matter (OM) content in the cultivated field B for 0-10 cm soil layer (a) and for 30-40 cm soil layer (b)



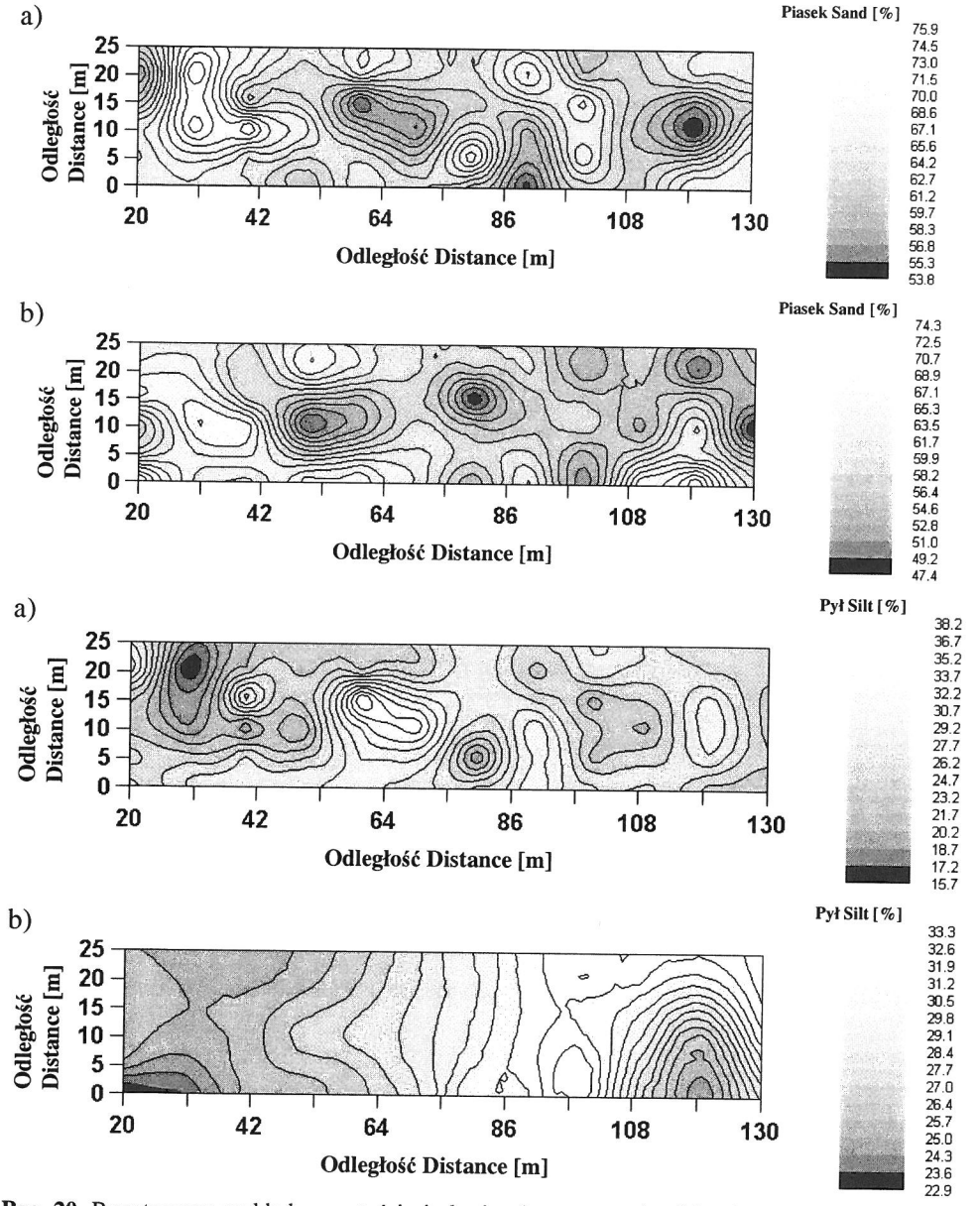
Rys. 18. Przestrzenny rozkład odczynu pH w H_2O i KCl w warstwie gleby 0-10 cm (a) i 30-40 cm (b) na polu uprawnym B

Fig. 18. Spatial distribution of pH H_2O and pH KCl in the cultivated field B for 0-10 cm soil layer (a) and for 30-40 cm soil layer (b)



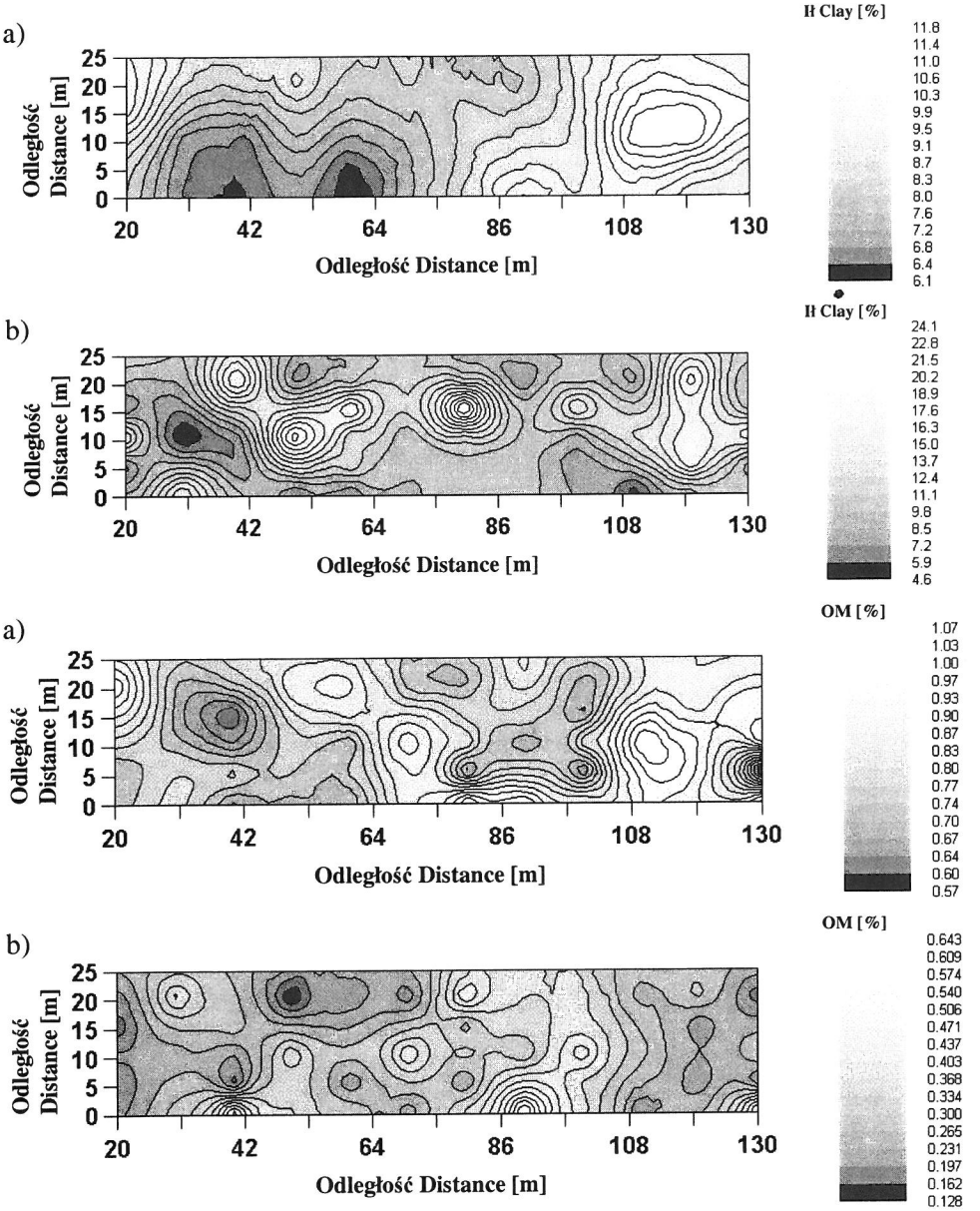
Rys. 19. Przestrzenny rozkład pojemności kationowymiennej (CEC) w warstwie gleby 0-10 cm (a) i 30-40 cm (b) i plonu na polu uprawnym B (a)

Fig. 19. Spatial distribution of soil CEC in the cultivated field B for 0-10 cm soil layer (a) and for 30-40 cm soil layer (b), and of 2002 yield (c)



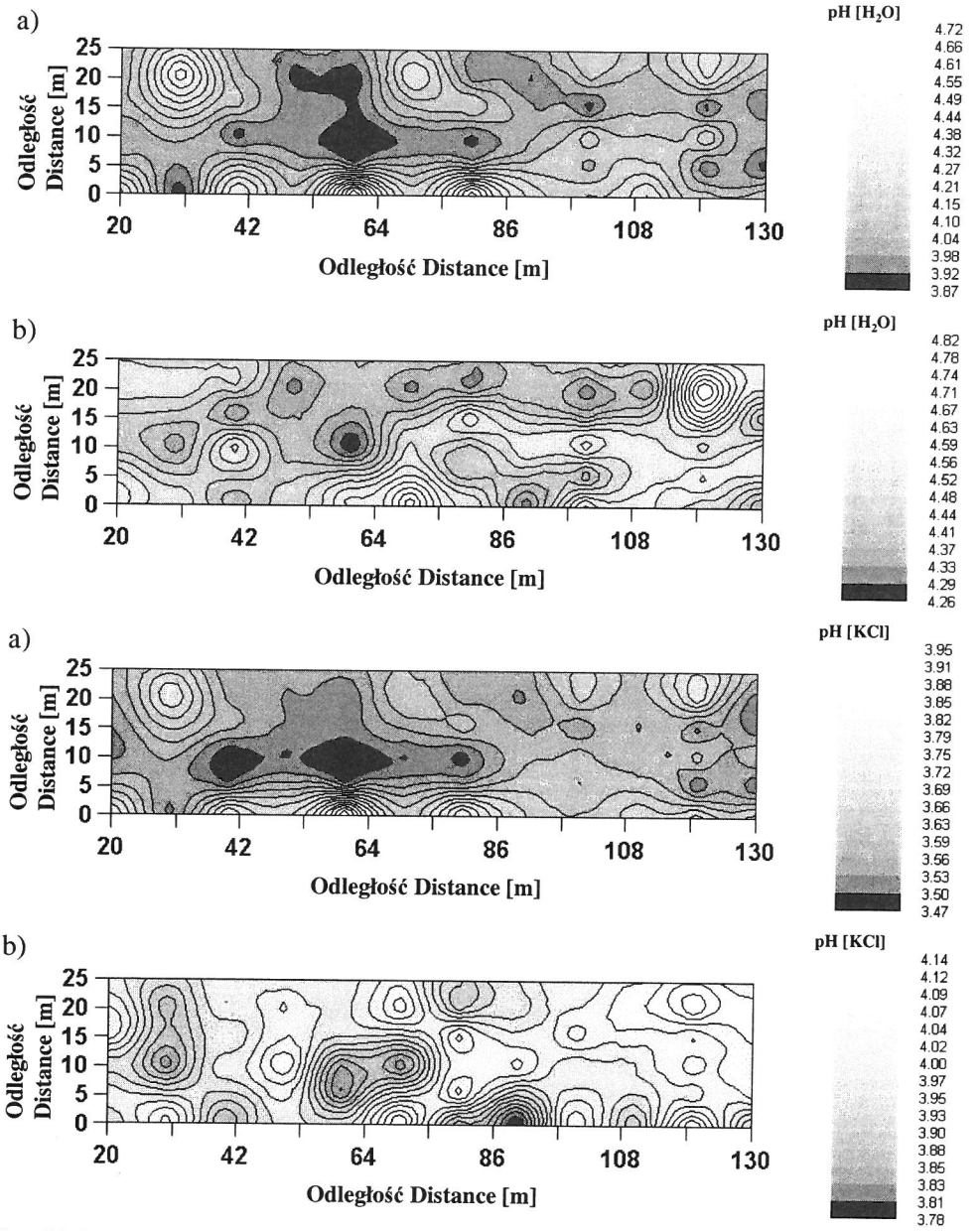
Rys. 20. Przestrzenny rozkład zawartości piasku i pyłu w warstwie gleby 0-10 cm (a) i 30-40 cm (b) na nieużytku C

Fig. 20. Spatial distribution of sand and silt content in the uncultivated field C for 0-10 cm soil layer (a) and for 30-40 cm soil layer (b)



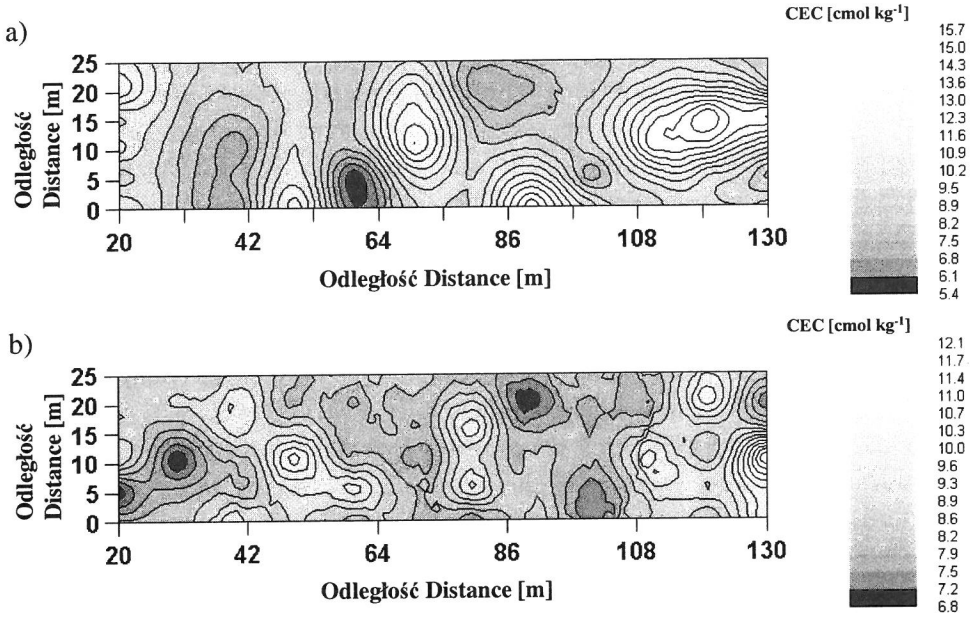
Rys. 21. Przestrzenny rozkład zawartości iłu i materii organicznej (OM) w warstwie gleby 0-10 cm (a) i 30-40 cm (b) na nieużytku C

Fig. 21. Spatial distribution of clay and organic matter (OM) content in the uncultivated field C for 0-10 cm soil layer (a) and for 30-40 cm soil layer (b)



Rys. 22. Przestrzenny rozkład odczynu pH w H_2O i KCl w warstwie gleby 0-10 cm (a) i 30-40 cm (b) na nieużytku C

Fig. 22. Spatial distribution of pH H_2O and pH KCl in the uncultivated field C for 0-10 cm soil layer (a) and for 30-40 cm soil layer (b)



Rys. 23. Przestrzenny rozkład pojemności kationowymiennej (CEC) w warstwie gleby 0-10 cm (a) i 30-40 cm (b) na nieużytku C

Fig. 23. Spatial distribution of soil CEC in the uncultivated field C for 0-10 cm soil layer (a) and for 30-40 cm soil layer (b)

4.5. Wykorzystanie map

Poznanie natury zmienności przestrzennej właściwości fizycznych i chemicznych gleby jak i współzależności pomiędzy cechami stabilnymi i dynamicznymi może w przyszłości pozwolić na regulowanie w sposób świadomy przestrzennego rozkładu cech gleby. Zniwelowanie niepożądanych skutków zmienności wynikających z samej natury środowiska czy też działalności człowieka możliwe będzie poprzez różnego typu zabiegi agrotechniczne, nawożenie i nawodnienia tych obszarów. Jeśli stwierdzono np. niedobór potrzebnych składników na danym obszarze, wówczas należałoby uzupełnić go ograniczając się tylko do tego obszaru. Uzupełnianie niedoboru powinno być prowadzone pod kontrolą tak, by doprowadzić dany obszar do warunków optymalnych, nie degradując jednocześnie środowiska. Sama metoda uzupełniania niedoborów zależeć będzie między innymi od środków technicznych jakimi dysponuje się przy wykonywaniu danego zabiegu. Jeśli cały zabieg uzupełniania niedoboru kontroluje odpowiednio oprogramowany

komputer ze sprzęgniętym systemem pozycjonowania GPS i urządzeniami wykonującymi ten zabieg, to nasza rola sprowadza się do wprowadzenia danych do komputera, wskazania miejsc jakie należy wziąć pod uwagę oraz określenia ilości niezbędnych składników. Tego typu nowoczesnych urządzeń w warunkach Polski z pewnością nie będzie jeszcze przez dłuższy czas, toteż obecnie w grę wchodzą bardziej tradycyjne metody uzupełniania niedoborów składników. Polegałyby one na wydzieleniu obszarów niedoborów, ich oznakowaniu, a następnie dostarczeniu brakujących składników ręcznie lub mechanicznie.

5. PODSUMOWANIE

Podjęta w pracy próba określenia (oceny) zmienności przestrzennej wybranych właściwości gleby w skali pola i gminy (na przykładzie gminy Trzebieszów) wykazała, że w obu przypadkach występuje wyraźna, choć zróżnicowana zmienność wartości rozpatrywanych cech gleby (zawartości frakcji granulometrycznych i materii organicznej oraz odczynu i pojemności kationowymiennej), jak i przestrzenna ich zależność. Znaczące różnice zmienności tych cech gleby stwierdzono również pomiędzy warstwą powierzchniową (0-10 cm) a podorną (30-40 cm).

Skład granulometryczny gleby (procentowa zawartość poszczególnych frakcji), niewielka zawartość materii organicznej, a także – w jakimś stopniu – właściwości chemiczne gleby na terenie całej gminy były związane z występującym tu przeważnie rodzajem gleb (gleby piaszczyste wytworzone z piasków luźnych, słabogliniastych, naglinowych i gliniastych). Średnia zawartość frakcji piasku wynosiła 55%, pyłu 32%, iłu 13%, a materii organicznej 0,7%. Odczyn gleb był kwaśny lub obojętny (średnie pH około 4,4), a średnia wartość pojemności kationowymiennej wynosiła 10 $cmol \cdot kg^{-1}$. Jednakże – przy zachowaniu generalnie podobnego układu i rzędu wartości – obserwowano znaczne ich zróżnicowanie zarówno na obszarze gminy jak i w obrębie wybranych pól, gdzie z uwagi na małą powierzchnię (0,25 do 1,5 ha) można było spodziewać się większej jednorodności gleby.

Spośród frakcji granulometrycznych największym rozrzutem wartości charakteryzowała się zawartość piasku, najmniejszym – iłu, przy czym większy rozrzut każdej z frakcji zanotowano na obszarze gminy niż pól. Również rozrzut zawartość materii organicznej oraz wartości pH na obszarze gminy był większy niż na polach, natomiast rozrzut wartości pojemności kationowymiennej – zbliżony. Jednocześnie zanotowano wyraźne różnice zawartości frakcji granulometrycznych między warstwami (zwłaszcza iłu i piasku). Z reguły zawartość piasku

w warstwie przypowierzchniowej była większa niż w podornej, a zawartość iłu odwrotnie (w warstwie podornej była większa niż przy powierzchni). Na wszystkich rozpatrywanych obiektach (gmina, pola) zawartość materii organicznej była ponad 2-krotnie wyższa w warstwie powierzchniowej, odczyn gleby był nieco wyższy w warstwie podornej, a pojemność kationowymienna w warstwie powierzchniowej.

Przestrzenną zależność stwierdzono w przypadku wszystkich cech gleby, zarówno gdy rozpatrywano obszar gminy i pojedyncze pola, warstwę powierzchniową i podorną (wyjątek stanowiła jedynie zawartość materii organicznej w warstwie 30-40 cm na terenie gminy i zawartość iłu w tej samej warstwie na polu z uprawą żyta). Przestrzenną zależność stwierdzono również dla plonu roślin uprawnych na wybranych polach. Kształt zależności przestrzennej w większości przypadków był sferyczny, w części eksponencjalny. Wykładniczy charakter zależności przestrzennej zdecydowanie przeważał przy opisie zmiennych na obszarze gminy, natomiast sferyczny na polach. Zakresy przestrzennej zależności związane były głównie ze skalą obiektu, ale i z rodzajem zmiennej.

Wyestymowane na podstawie punktowych pomiarów rozkłady przestrzenne (mapy) rozpatrywanych cech gleby ukazują ich zróżnicowanie na danym obiekcie (gmina, pole uprawne) i mogą stanowić podstawę do wydzielenia obszarów wymagających stosowania różnych zabiegów agrotechnicznych (np. wapnowania, czy nawożenia).

W aspekcie metodycznym badania wykazały, że na etapie rozpoznawania zmienności cech gleby (zwłaszcza stabilnych) konieczna jest duża liczebność próbkowań. Rozpoznanie takie pozwoli ustalić niezbędną (optymalną) liczbę pobieranych próbek przy określaniu zmienności również innych cech gleby (mniej stabilnych i dynamicznych), dostosowaną do skali obiektu i zmienności gleby.

Przeprowadzone badania zmienności przestrzennej właściwości fizycznych i chemicznych gleby mają znaczenie zarówno poznawcze jak i praktyczne. Rozpoznanie w skali gminy pozwoliło określić ogólny stan cech i wielkości fizycznych gleby, wyznaczyć parametry opisujące ich zmienność przestrzenną, jak i wykreślić mapy przestrzennego rozkładu tych cech. W przypadku pola uprawnego, poznanie zmienności przestrzennej właściwości fizycznych i chemicznych gleby oraz – w kontekście – zmienności przestrzennej plonu pozwoliło na określenie rzeczywistych warunków rozwoju i plonowania roślin na danym obiekcie. Może to stanowić podstawę do opracowania zaleceń agrotechnicznych zmierzających do optymalizacji zabiegów uprawowych poprzez wyodrębnienie obszarów

wymagających np. dodatkowego wapnowania, nawożenia organicznego czy też mineralnego.

Jeśli znany jest przestrzenny rozkład poszczególnych właściwości fizycznych i chemicznych gleby (mapy rozkładu cech gleby), możemy bardziej racjonalnie gospodarować zasobami naturalnymi i energią potrzebną na przeprowadzenie określonych zabiegów uprawowych. Efekty ekologiczne z takiego rozpoznania zmienności przestrzennej mogą być znaczące. Przede wszystkim można nie dopuścić do nadmiernego nagromadzenia się składników chemicznych (tam gdzie jest ich już pod dostatkiem), tym samym zaoszczędzić wydatki na chemikalia, jak i zmniejszyć koszty rekultywacji gleby gdyby nastąpiła niepożądana ich akumulacja. Ponadto rozpoznana natura zmienności przestrzennej powinna umożliwić dokładniejszy opis zjawisk i procesów fizycznych zachodzących w środowisku poprzez dwu- i trzywymiarowe modelowanie przepływu masy i energii w badanym układzie.

Należy podkreślić, że badanie przestrzennej zmienności fizycznych i chemicznych właściwości gleby leży u podstaw precyzyjnego rolnictwa, aktualnie propagowanego i wdrażanego w najbardziej gospodarczo rozwiniętych krajach. W Polsce są one coraz częściej rozwijane i stosowane, choć – jak na razie – głównie w środowisku naukowym. Zachodzi konieczność zintegrowanego podejścia do tego typu badań, tak, by wyniki były jak najlepiej i najszybciej wdrażane oraz wykorzystywane w rolnictwie i ochronie środowiska. Przede wszystkim należy wykorzystać wyniki wcześniejszych badań (już opublikowane w pracach naukowych) i dane zgromadzone – jak dotąd tylko w nielicznych – bazach danych. Szczególną uwagę należy zwrócić na te właściwości gleby, które są stabilne i nie zmieniają się istotnie w długim okresie czasu, a są bardzo kłopotliwe w oznaczaniu. Dane dotyczące cech i wielkości fizycznych gleby, które zmieniają się dynamicznie, są również cenne i powinny być zbierane w bazach danych. Niezależnie od tego czy dane pochodzą z literatury, czy też są aktualnie zbierane, stanowić one mogą materiał do porównań, szukania współzależności pomiędzy sobą oraz z cechami stabilnymi gleby, a także do analiz zmian czasowych. Dostęp do baz danych jest obecnie dość utrudniony (czasami żaden) i wymaga odrębnej dyskusji i decyzji. Od tego jak szybko środowiska naukowe i decyzyjne rozwiążą ten problem zależeć będzie nasz postęp w wykorzystaniu dotychczasowych wyników badań w precyzyjnym rolnictwie i ochronie środowiska.

6. PIŚMIENNICTWO

1. **Anderson A. N., McBratney A. B., Crawford J. W.:** Applications of Fractals to Soil Science. Advences in Agronomy, (Ed. D. L. Sparks, Academic Press), 63, 2-76, 1998.
2. **Armstrong A. C.:** On the fractal dimensions of some transient soil properties. J. Soil Sci., 37, 641-652, 1986.
3. **Baranowski P., Kossowski J., Usowicz B.:** Spatial variability of soil water content in cultivated fields. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 405, 9-19, 1994.
4. **Bartoli F., Burtin G., Royer J. J., Gury M., Gomendy V., Phylippy R., Leviandier Th., Gafrej R.:** Spatial variability of topsoil characteristics within one silty soil type. Effects on clay migration. Geoderma, 68, 279-300, 1995.
5. **Bartoli F., Philippy R., Burtin G.:** Influence of organic matter aggregation in Oxisols rich in gibbsite or in goethite. I. Structures: the fractal approach. Geoderma, 54, 231-257, 1992.
6. **Bartoli F., Philippy R., Doirisse M., Niquet S., Dubuit M.:** Structure and self-similarity in silty and sandy soils: the fractal approach. J. Soil Sci., 42, 167-185, 1991.
7. **Bednarek H., Kołodziej J., Liniewicz K.:** Wybrane cechy intercepcji opadów atmosferycznych w łanach niektórych roślin uprawnych. Acta Agrophysica, 34, 19-28, 2000.
8. **Białousz S.:** Soil map of Poland according to FAO legend with different number of soil mapping units. Proc. Land Information System, Hannover, 1966.
9. **Bołaszewska J., Reutt F.:** Częstość występowania poszczególnych mas powietrza w Polsce w okresie 10 lat 1946-1956. Prace PIHM, 66, 16-32, 1962.
10. **Bolt G.H., Bruggenwert M.G.M.:** Soil Chemistry A. Basic elements. Elsevier, Amsterdam. 1976.
11. **Bolt G.H., Bruggenwert M.G.M.:** Soil Chemistry B. Physicochemical models. Elsevier, Amsterdam, 1979.
12. **Brus D.,J.:** Incorporating models of spatial variation in sampling strategies for soil. PhD Thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 1-211, 1993.
13. **Burrough P. A.:** Multiscale sources of spatial variability in soil. I. The application of fractal concepts to tested levels of soil variation. J. Soil Sci., 34, 577-626, 1983.
14. **Burrough, P.A.:** Fractal dimensions of landscapes and other environmental data. Nature, 294, 240-242, 1981.
15. **Burrough, P.A.:** Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Oxford University Press, Oxford. 1986.
16. **Burgess, T.M. and R. Webster:** Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. J. Soil Sci., 31, 315-331, 1980.
17. **Burgess, T.M. and R. Webster:** Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. II. Block kriging. J. Soil Sci., 31, 333-341, 1980.
18. **Chomicz K., Kuczmarska L.:** Zachmurzenie i usłonecznienie w Polsce. Przegl. Geofiz., XVI, 1-2, 69-94, 1971.
19. **David, M.:** Geostatistical Ore Reserve Estimation. Elsevier, Scientific Publishing Co., Amsterdam, The Netherlands, 1977.
20. **Demidowicz G., Łykowski B.:** Warunki wilgotnościowe wiosny i lata w 2002 roku w Polsce. Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, XI, 2(25), 269-276, 2002.
21. **Dobrzański B., Malicki A.:** Gleby województwa krakowskiego i rzeszowskiego. Annales UMCS, s.B, 4, 117-134, 1950.
22. **Dobrzański B., Piszczek J.:** Mapa gleb powiatu mieleckiego. Annales UMCS, s.B, 3, 15-31. 1948.
23. **Dobrzański B., Zawadzki S.:** Gleboznawstwo. PWN, Warszawa, 1995.

24. **Drzymała S., Mocek A.:** Metody z zakresu fizyki i chemii gleb zalecane przez ISO (i PKN). Acta Agrophysica, 48, 253-264, 2001.
25. **Englund E., Sparks A.:** Geostatistical Environmental Assessment Software. Environmental Monitoring Systems Laboratory Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, NV 89193-3478, 1988.
26. **Fotyma M., Jadczyszyn T.:** Perspektywy wprowadzenia w Polsce metody pomiaru pH w 0,01 mol/dm^3 $CaCl_2$. Zesz. Probl. Postęp. Nauk Roln., 456, 665-670, 1998.
27. **Gamma Design Software GS+.5.3.1 Demo. 2002:** Geostatistics for the environmental sciences.
28. **Gliński J., Ostrowski J., Stępniewska Z., Stępniewski W.:** Bank próbek glebowych reprezentujących gleby mineralne Polski. Probl. Agrofizyki, 66, 1-57, 1991.
29. **Gołaszewski J.:** Analiza zmienności przestrzennej w doświadczeniach polowych. Fragmenta Agronomica (XVII), 4(68), 4-14, 2000.
30. **Gołaszewski J.:** Szacowanie i eliminacja efektów zmienności przestrzennej w doświadczalnictwie polowym. Post. Nauk Roln., 2, 31-51, 2000.
31. **Gotway C.A., Hergert G.W.:** Incorporating spatial trends and anisotropy in geostatistical mapping of soil properties. Soil Sci. Soc. Am. J., 61, 298-309, 1997.
32. **Griffith, D.A.:** Spatial Autocorrelation: A Primer. Association of American Geographers, Washington, D.C., 1-86, 1987.
33. **Gumiński R.:** Próba wydzielenia dzielnic rolniczo-klimatycznych w Polsce. Przegl. Meteorol. Hydrolog., 1, 7-20,1948.
34. **Haan C.T.:** Statistical Methods in Hydrology. Iowa State University Press, Ames, Iowa. 1977.
35. **Hummatov N.G., Zheromskiy S.V., Mironenko Ye.V., Pachepskiy Ya.A., Shcherbakov R.A.:** Geostatistical analysis of water retention capacity spatial variability for a grey forest soil. Pochvoviedenie, 6, 52-62, 1992.
36. **Isaaks E.H., Srivastava R.M.:** An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, NY, 1989.
37. **Journel A.G., Huijbregts C.J.:** Mining Geostatistics. Academic Press, New York, 1978.
38. **Józefaciuk G., Kozak E., Stawiński J., Ganew S.:** Metodologiczne aspekty bezpośredniego pomiaru pojemności wymiennej kationów gleb. I. Nasycanie gleby kationem indeksowym. Przegląd Naukowej Literatury Rolniczej i Leśnej, XXXV, 226-238, 1989.
39. **Józefaciuk G., Kozak E., Stawiński J., Arsova A.:** Metodologiczne aspekty bezpośredniego pomiaru pojemności wymiennej kationów gleb. II. Stopień wysycenia kationem indeksowym. Naukowej Literatury Rolniczej i Leśnej, XXXV, 294-29, 1989.
40. **Józefaciuk G., Kozak E., Stawiński J., Urumova-Pesheva A.:** Metodologiczne aspekty bezpośredniego pomiaru pojemności wymiennej kationów gleb. III. Odmywanie nadmiaru soli nasycającej. Naukowej Literatury Rolniczej i Leśnej, XXXV, 3-4, 229-305, 1989.
41. **Józefaciuk G., Kozak E., Stawiński J., Ponizovskij A.:** Metodologiczne aspekty bezpośredniego pomiaru pojemności wymiennej kationów gleb. IV. Usuwanie zaadsorbowanego kationu indeksowego. Naukowej Literatury Rolniczej i Leśnej, XXXV, 3-4, 305-313, 1989.
42. **Kowaliński S., Truszkowska R., Kowalkowski A., Ostrowski J.:** Bank informacji o środowisku glebowym BIGLEB. Rocz. Glebozn., 30(1), 73-84, 1979.
43. **Kaszewski B.M.:** Klimat Polesia Lubelskiego i jego zmiany. Acta Agrophysica, 66, 21-48, 2002.
44. **Kaszewski B.M., Mrugała S.:** Wybrane charakterystyki temperatury powietrza i opadów atmosferycznych na obszarze lubelszczyzny (1951-1990). Acta Agrophysica, 47, 1-75, 2001.

45. **Kaszewski B.M., Mrugała S., Warakomski W.:** Temperatura powietrza i opady atmosferyczne na obszarze Lubelszczyzny (1951-1990). W: Środowisko przyrodnicze Lubelszczyzny, LTN, Lublin, 1995.
46. **Kędziora A., Olejnik J.:** Heat balance structure in agroecosystems. In: L.Ryszkowski, N.R. French, A.Kędziora (Eds.) – Dynamics of an agricultural landscape. PWRiL, Poznań, 45-64, 1996.
47. **Kołodziej J., Liniewicz K., Orzeł W.:** Investigations into the relationship between the amount of precipitation, the precipitation interception and the moisture of soil under cultivated plants. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 220, 191-202, 1979.
48. **Komisarek J.:** Zmienność przestrzenna czarnych ziem i gleb płowych falistej moreny dennej Równiny Kościańskiej. Roczn. AR Poznań, CCLXVIII, 205-217, 1994.
49. **Kondracki J.:** Geografia regionalna Polski. PWN, Warszawa 2000.
50. **Kossowski J.:** O częstości głównych typów pogody w Polsce. Przegl. Geofiz., XIII(XXI), 3, 283-292, 1968.
51. **Kossowski J.:** Przebieg roczny częstości występowania głównych typów pogody w poszczególnych regionach Polski w okresie 1951-1960. Folia Soc. Sci. Lublin., s.D, 9, 61-67, 1969.
52. **Kossowski J., Lipiec J., Tarkiewicz S.:** The response of spring barley yield to the degree of soil compactness related to meteorological conditions. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 396, 81-87, 1991.
53. **Kossowski J., Usowicz B.:** Charakterystyka pola wilgotności gleby przy różnej liczbie próbkowań. Acta Agrophysica, 38, 127–137, 2000.
54. **Kożuchowski K., Marciniak K.:** Fluktuacje kontynentalizmu klimatu Polski na tle warunków cyrkulacyjnych i solarnych. Przegl. Geofiz., XXXI(XXXIX), 2, 1986.
55. **Kuczmarski K., Paszyński J.:** Zmienność dobowa i sezonowa usłonecznienia w Polsce. Przegl. Geogr., 53, 4, 779-791, 1981.
56. **Lipiec J., Hakansson I., Tarkiewicz S., Kossowski J.:** Soil physical properties and growth of spring barley related to the degree of compactness of two soils. Soil and Tillage Res., 19, 307-317, 1991.
57. **Lipiec J., Usowicz B.:** Spatial variability of penetration resistance of soil at different compaction level. Bibliotheca Fragmenta Agronomica. t.2b, 423-426, 1997.
58 **Łoginow W., Wiśniewski W., Gonet S.S., Cieściński B.:** Testowa metoda oceny podatności na utlenianie materii organicznej gleb. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 411, 207-212, 1993.
59. **Maksimow A., Goralski J.:** Właściwości sorpcyjne i odczyn gleb. PWRL, Warszawa. 1959.
60. **Malicki M.:** A reflectometric (TDR) meter of moisture content in soils and other capillary-porous materials. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 388, 107-114, 1990.
61. **Mandelbrot B.B.:** The Fractal Geometry of Nature. W.H. Freeman, London. 1982.
62. **Matheron G.:** The theory of regionalized variables and its applications. Cahiers du Centre de Morphologie Mathematique, Fontainebleau, No. 5, 1971.
63. **McBratney A.B., Webster R.:** How many observations are needed for regional estimation of soil properties. Soil Sci., 135(3), 177-183, 1983.
64. **Miara K., Paszyński J., Grzybowski J.:** Zróżnicowanie przestrzenne bilansu promieniowania na obszarze Polski. Przegl. Geogr., 59, 4, 487-509, 1987.
65. **Michna E.:** Usłonecznienie województwa lubelskiego na tle usłonecznienia Polski. Folia Soc. Sci. Lublin., s. Geogr., 16, 1, 37-42, 1974.
66. **Moreno F., Usowicz B., Fernandez J.E., Andreu L.:** Spatial distribution of salinity and water content in the reclaimed salt-affected soils of south-western Spain. Proc Int. Conf. "Wastewater re-use in irrigated agriculture" 22-26 September 1997, vol. IV, 83-93, Valenzano (Bari), Italy.

67. **Musierowicz A. (red.):** Mapa gleb Polski w skali 1:300 000. Wyd. Geologiczne, Warszawa, 1961.
68. **Myślińska E.:** Laboratoryjne badania gruntów. Wyd. III. PWN, Warszawa, str. 213, 2001.
69. **Okołowicz W.:** Regiony klimatyczne. Polska – Atlas geograficzny, PPWK, Warszawa, 1966.
70. **Ostrowski J.:** Nizina Południowopodlaska. Przegl. Geogr., 38, 3, 393-406, 1966.
71. **Pannatier Y.:** Variowin 2.1. Program for Geostatistical Analysis. University Of Lousanne, 1994.
72. **Papritz A.J.:** Estimating temporal change of soil properties. Phd thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 166 Pp. 1993.
73. **Pasierski Z.:** Dynamika przychodu wody do powierzchni gleby w łanach wybranych roślin uprawnych, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 288, 85-101, 1984.
74. **Paszyński J.:** Studies on the heat balance and on evaporation. Geogr. Pol., 22, 35-51, 1972.
75. **Paszyński J., Krawczyk B.:** Climatic regions of Poland. Indojaras, 74, 124-128, 1970.
76. **Peech M.:** Hydrogen-ion activity. In: "Methods of Soil Analysis". Part 2, 914-926. Ed.: C.A. Black, Am. Soc. Agronomy, Inc. Publ. Madison, USA, 1965.
77. **Podogrocki J.:** Spatial distribution of global radiation in Poland. Publ. Inst. Geoph. PAN, D-5(120), 17-30, 1978.
78. **Podogrocki J.:** On solar energy resources in Poland during the vegetation period. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 369, 245-250, 1989.
79. **Robertson G.P. :** Geostatistics in ecology: interpolating with known variance. Ecology, 68, 744-748, 1987.
80. **Romer E.:** Regiony klimatyczne Polski. Prace Wrocł. Tow. Nauk., s.B, 16, Wrocław 1949.
81. **Schoefield R.K., Taylor A.W.:** The measurement of soil pH. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 19, 164-167, 1955.
82. **Schmuck A.:** Regiony pluwiotermiczne w Polsce. Czasop. Geogr., 36, 3, 241-244, 1965.
83. **Schmuck A.:** Regiony termiczne w Polsce. Czasop. Geogr., 32, 1, 17-30, 1961.
84. **Sokal R.R., Oden N.L..:** Spatial autocorrelation in biology. 1. Methodology. 2. Some biological implications and four applications of evolutionary and ecological interest. Biological Journal of the Linnean Society 10, 199-228, 1978.
85. **Stawiński J., Gliński J., Ostrowski J., Stępniewska Z.:** Mapa Powierzchni Właściwej Gleb Ornych Polski. IA PAN Lublin – IMUZ Falenty, 1999.
86. **Stawiński J., Wierzchoś J., Józefaciuk G.:** Metoda pomiaru pH układów glebowych eliminująca efekt suspensji. Zesz. Probl. Postęp. Nauk Roln., 315, 233-242, 1986.
87. **Stępniewska Z., Stępniewski W., Gliński J., Ostrowski J.:** Atlas Oksydoredukcyjnych Właściwości Gleb Ornych Polski. IA PAN Lublin – IMUZ Falenty, 1996.
88. **Trangmar B.B., Yost R.S., Uehara G.:** Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. In: N.C. Brady, editor. Advances in Agronomy, Vol. 38, 45-94, Academic Press, New York, 1985.
89. **Truszkowska R.:** Kompleksy Gleb O Zbliżonej Przydatności Rolniczej. W: Dziedzic F., Dąbrowski P. (Red.) Atlas Rolniczy Polski. Wyd. Geologiczne, Warszawa, 1966.
90. **Truszkowska R.:** Wojewódzki Bank Informacji O Środowisku Glebowo- Roślinnym I Czynnikach Mu Zagrażających: Bigleb-Wo. Prace Kom. PTG, 117, 1992.
91. **Turski R., Uziak S., Zawadzki S.:** Środowisko Przyrodnicze Lubelszczyzny – Gleby. LTN, Lublin, 1-107, 1993.
92. **Turski R.:** Gleboznawstwo. Ćwiczenia dla studentów wydziałów rolniczych, WAR Lublin, 1-219, 1998.
93. **Uehara G., Gillman.G.P.:** Charge characteristics of soils with variable and permanent charge minerals I. Theory. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 250-252, 1980.

94. **Usowicz B., Baranowski P., Kossowski J.:** Spatial Distribution Of Some Physical Quantities Characterizing Soil Structure State In Cultivated Fields. Polish J. Soil Sci. 28/1, 19-27, 1995.
95. **Usowicz B., Kossowski J., Baranowski P.:** Spatial variability of soil thermal properties in cultivated fields. Soil and Tillage Res., 39, 85-100, 1996.
96. **Usowicz B., Kossowski J.:** Distribution of soil water content in cultivated fields based on measurement by gravimetric and reflectometric methods. Zesz. Prob. Post. Nauk Roln., 436, 157-165, 1996.
97. **Usowicz B.:** Time and space variability of soil thermal properties in cultivated fields. Proc. 16th World Congress of Soil Science, Montpellier, France, 20-26 August 1998, CD 253-t.pdf, 1-9, 1998.
98. **Usowicz B.:** Ocena zmienności wybranych cech gleby przy różnym układzie i liczbie próbkowań. Acta Agrophysica 57, 147-158, 2001.
99. **Usowicz Ł.B., Usowicz B.:** Spatial Variability Of Soil Particle Size Distribution In Poland. 17th World Congress Of Soil Science, 14-20 August 2002, Bangkok, Thailand, Symposium No.48, Paper 274, 1-10, 2002.
100. **Walczak R. Usowicz B.:** Variability of moisture, temperature and thermal properties in bare soil and in crop field. Int. Agrophysics, 8, 161-168,1994.
101. **Walczak R., Ostrowski J., Witkowska-Walczak B., Sławiński C.:** Spatial characteristics of water conductivity in the surface level of Polish arable soils. Int. Agrophysics, 16, 3, 239-247, 2002.
102. **Warakomski W.:** Zmienność średniej miesięcznej temperatury powietrza w okresie wegetacyjnym na Lubelszczyźnie w latach 1951-1990. 99-106 w: Gleby i klimat Lubelszczyzny, Lublin, 1995.
103. **Webster R.:** Quantitative Spatial Analysis of Soil in The Field. Advances in Soil Sci., 3, 1-70. 1985.
104. **Webster R., Burgess T.M.:** Sampling and bulking strategies for estimating soil properties in small regions. J. Soil Sci., 35, 127-140, 1984.
105. **Webster, R. and M.A. Oliver:** Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey. Oxford University Press, NY, 1-316, 1990.
106. **Wierzchoś J.:** Analiza fizykochemicznych warunków tworzenia się i trwałości struktury glebowej. Praca doktorska. IUNG, Puławy, 1989.
107. **Wiszniewski W., Chełchowski W.:** Charakterystyka klimatu i regionizacja klimatologiczna Polski. IMGW, Wyd. Kom. Łączn., Warszawa, 1975.
108. **Witek T. (Red.):** Waloryzacja Rolniczej Przestrzeni Produkcyjnej Polski Według Gmin. Iung, Puławy, 1-416, 1981.
109. **Woś A.:** Klimat Polski. Wyd. PWN, Warszawa, 1999.
110. **Van Reeuwijk L.P. (ed.):** Procedures for Soil Analysis. Fifth edition. ISRIC Technical Paper 9. Wageningen, The Netherlands, 1995.
111. **Vieira S.R., Hatfield J.L., Nielsen D.R., Biggar J.W.:** Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. Hilgardia. 51, 1-75, 1983.
112. **Zinkiewicz W., Zinkiewicz A.:** Stosunki klimatyczne województwa lubelskiego. Annales UMCS, s. B, 28, 139-202, 1973.

7. STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wyniki analizy statystycznej i geostatystycznej oraz estymacji przestrzennych rozkładów wybranych fizycznych i chemicznych właściwości gleby na obiektach w skali pojedynczego pola uprawnego i obszaru całej gminy (na przykładzie gminy Trzebieszów).

Gmina Trzebieszów (o powierzchni 140 km^2) położona jest na Równinie Łukowskiej, stanowiącej jeden z mezoregionów Niziny Południowopodlaskiej. Administracyjnie należy do powiatu łukowskiego i województwa lubelskiego. Gmina ma typowo rolniczy charakter. Grunty orne obejmują 62,3% jej powierzchni, użytki zielone (łąki i pastwiska) 18,2%, a lasy tylko 13,5%. Teren gminy jest płaski, gleby słabe, przeważnie wytworzone z piasków luźnych, słabogliniastych, naglinowych i gliniastych.

Próbki glebowe pobierane były z dwóch warstw (0-10 i 30-40 cm) w 464 punktach. Niezależnie od obszaru gminy (214 punktów próbkowań rozmieszczonych w sieci nieregularnej), obiekt badań stanowiły trzy różne pola (z punktami pomiarowymi ulokowanymi w siatce regularnej). Było to pole z uprawą mieszanki zbóż (pszenica, jęczmień, owies) o powierzchni 1,8 ha (150 punktów pomiarowych), pole z uprawą żyta o powierzchni 1 ha (50 punktów) i nieużytek o powierzchni 0,25 ha (50 punktów). Dla każdego punktu (w dwóch warstwach) został określony skład granulometryczny gleby (za pomocą metody aerometrycznej –sedymentacyjnej), zawartość materii organicznej (metodą utleniania), pH (w KCl i H_2O) – potencjometrycznie oraz pojemność kationowymienna gleby (przez miareczkowanie monojonowych form wodorowych gleby). Ponadto, w przypadku poszczególnych pól uprawnych mierzona była gęstość gleby w warstwie 0-10 cm (dwukrotnie, na wiosnę i pod koniec okresu letniego), a także określany był plon ziarna na polu żyta i mieszanki zbożowej (z pomiarów w sieci kwadratów o powierzchni 1 m^2). Oddzielnie dla każdego z rozpatrywanych obiektów (gmina, pola) wyznaczone zostały statystyczne parametry poszczególnych fizycznych i chemicznych właściwości gleby (także plonu), a przy użyciu metod geostatystycznych – analizowano przestrzenne zależności i zmienność w obrębie danego obiektu. Do eksperymentalnie wyznaczonych semiwariogramów dobrane zostały funkcje matematyczne, które następnie wykorzystano do estymacji rozkładu danej zmiennej w przestrzeni (w postaci map) stosując metodę krigingu.

Procentowa zawartość poszczególnych frakcji, niewielka zawartość materii organicznej, a w jakimś stopniu także właściwości chemiczne gleby, były związa-

ne z przeważającym na terenie całej gminy typem gleb (gleby piaszczyste). Średnia zawartość frakcji piasku wynosiła 55%, pyłu 32%, iłu 13%, a materii organicznej 0,7%. Odczyn gleb był kwaśny lub obojętny (średnie pH około 4,4), a średnia wartość pojemności kationowymiennej wynosiła 10 $cmol \cdot kg^{-1}$. Jednakże, przy zachowaniu generalnie podobnych proporcji i rzędu wartości, obserwowano znaczne zróżnicowanie każdej z tych cech tak na obszarze gminy, jak i w obrębie wybranych pól. Spośród frakcji granulometrycznych największym rozrzutem wartości charakteryzowała się zawartość piasku, najmniejszym – iłu, przy czym większy rozrzut każdej z frakcji zanotowano dla obszaru gminy niż pól. Z reguły zawartość piasku w warstwie przypowierzchniowej była większa niż w podornej, a zawartość iłu odwrotnie. Na wszystkich rozpatrywanych obiektach (gmina, pola) zawartość materii organicznej była ponad 2-krotnie wyższa w warstwie powierzchniowej, pH gleby było nieco wyższe w warstwie podornej, a pojemność kationowymienna w warstwie powierzchniowej.

Przestrzenną zależność stwierdzono w przypadku wszystkich cech gleby, zarówno gdy rozpatrywano obszar gminy, pojedyncze pola, warstwę przypowierzchniową i podorną. Wykładniczy charakter zależności przestrzennej przeważał przy opisie zmiennych na obszarze gminy, natomiast sferyczny na polach. Zakresy przestrzennej zależności związane były głównie ze skalą obiektu, ale i z daną cechą.

Przeprowadzone badania mają znaczenie zarówno poznawcze jak i praktyczne. W skali gminy rozpoznano ogólny stan rozpatrywanych cech gleby, wyznaczono parametry opisujące ich zmienność przestrzenną oraz przedstawiono przestrzenny rozkład tych cech (w zarysie). W przypadku pól uprawnych, poznanie zmienności przestrzennej właściwości fizycznych i chemicznych gleby oraz zmienności przestrzennej plonu pozwoliło na określenie rzeczywistych warunków rozwoju i plonowania roślin na danym obiekcie. Tym samym, może stanowić podstawę wyodrębnienia obszarów wymagających dodatkowego wapnowania lub nawożenia, czy też opracowania zaleceń agrotechnicznych dotyczących optymalizacji zabiegów uprawowych.

8. SUMMARY

SPATIAL VARIABILITY OF PHYSICAL AND CHEMICAL SOIL PROPERTIES IN A FIELD AND COMMUNE SCALE

The paper contains results of statistic and geostatistic analysis as well as an estimation of spatial distribution of selected soil physical and chemical properties on an area of three individual fields and on a whole commune.

Trzebieszów commune was selected as an investigation object. It has an area of 140 km^2 and is located in Łukowska Plain, being one of mesoregions of Południowopodlaska Lowland. The commune is of typical agricultural character with 62.3% of arable land, 18.2% of meadows and pastures, and only 13.5% of forestations. The whole commune area is flat, mostly built from outwash material, with loose sands to low clayey sandy soils.

Soil samples were collected from two soil layers (0-10 and 30-40 cm) in 464 points. On the commune area 214 sampling points in random network were located and remaining points in regular networks within three fields. One of these fields (1.8 ha; 150 points) was a mixed cropland (wheat, barley and oats), the second (1 ha; 50 points) was a rye crop and the third (0.25 ha; 50 points) was an idle land. For each point granulometric composition (sedimentation), organic matter content (dichromate wet combustion), pH in KCl and H_2O (potentiometry), cation exchange capacity (titration of soil homoionic hydrogen forms) were determined in both soil layers. Moreover, for the cultivated fields soil bulk density in 0-10 cm layer was measured in early spring and late summer, and grain yield of rye and mixed corn (in a set of 1 m^2 squares) was determined. Separately for all objects examined basic statistical parameters of the studied soil physical and chemical properties were calculated and analysis of spatial dependence and distribution within the objects was performed using geostatistical methods. Mathematical functions were fitted to the experimentally derived semivariograms that were used further for mapping of soil properties and plant yield applying kriging method.

Soil granulometric composition, low organic matter content and soil chemical properties were characteristic for sandy soils. The average content of the soil granulometric fractions was 55% sand, 32% silt and 13% clay, and 0.7% of organic matter. The soil reaction was acidic to neutral (average pH was around 4.4) and the average CEC was 10 cmol kg^{-1}. However, despite similar proportions and

ranges of the values, the above parameters markedly varied within the studied areas. The largest differentiation of values were observed in the sand content, and the smallest in clay content, and higher dispersion was noted in the commune than in particular fields. As a rule, the sand content was greater in top than in lower depth layer and the opposite were found for clay. The organic matter content in all studied object was over 2 times higher in the top layer, the pH was slightly higher in lower layer and the CEC was higher in top layer. The spatial dependence was observed for all soil parameters studied, for both soil layers, and for each of the studied areas. The exponential character of the spatial dependences prevailed for the data description for the commune area and the spherical one for the field areas. Ranges of the spatial dependences were connected mainly with the scale of the object, and with the studied parameters, as well.

The studies performed may have not only theoretical but also practical importance. The general state of the basic soil chemical and physical properties in the commune area was recognized, the parameters describing their spatial variability were determined and the spatial distribution of soil features was mapped. The knowledge on spatial variability of soil properties and plant yield in agricultural fields allowed for determination of the realistic conditions of plant development that may constitute a base for selection of the areas requesting changes in agricultural measures as liming or fertilization, as well as may serve for elaboration of detailed agrotechnical instructions for optimization of the cropping system.

Adresy autorów:

Bogusław Usowicz
Mieczysław Hajnos
Zofia Sokołowska
Grzegorz Józefaciuk
Grzegorz Bowanko
Jan Kossowski
Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin
e-mail: Usowicz@demeter.ipan.lublin.pl