



# **Zmienność przestrzenna uwilgotnienia hydrofobowej gleby organicznej w warunkach przepływu preferencyjnego**

*Edyta Hewelke, Jan Szatyłowicz,  
Tomasz Gnatowski, Ryszard Oleszczuk  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa*

## **1. Wstęp**

Celem prezentowanych badań jest próba oceny zmienności przestrzennej uwilgotnienia gleb torfowo-murszowych w warunkach występowania przepływu preferencyjnego wywołanego hydrofobowością [1, 20]. Badania prowadzono na obiekcie Kuwasy położonym w Środkowym Basenie Biebrzy, gdzie wykonane ponad 50 lat temu melioracje spowodowały obniżenie uwilgotnienia występujących tu gleb torfowych intensyfikując proces murszenia oraz wzrost hydrofobowości. Istotnymi efektami hydrofobowości jest niestabilny front zwilżania, powiększenie zmienności przestrzennej uwilgotnienia gleby, przepływ preferencyjny oraz kumulacja i emisja gazów biogenych. Zjawiska te niekorzystnie wpływają na bilans wodny gleby prowadząc do postępującej degradacji środowiska. Właściwe rozpoznanie procesów przestrzennych stanowi kluczowy warunek do podejmowania racjonalnych działań rekultywacyjnych i zrównoważonego użytkowania gleb [12, 14, 19]. Z powyższych względów ocena hydrofobowości i jej wpływ na zmienność przestrzenną uwilgotnienia jest ważnym obszarem badań zarówno z punktu ochrony zasobów naturalnych jak i produkcji rolniczej [4, 7, 10, 22].

Zagadnienia związane ze zmiennością przestrzenną właściwości fizycznych gleb torfowo-murszowych były prowadzone m. in. przez Brandyka i in. [2], Gnatowskiego i in. [6], Oleszczuka [17], Szatyłowicza i in. [21] i Waniek i in. [23].

## **2. Materiał i metodyka badań**

Badania zmienności przestrzennej uwilgotnienia przeprowadzono w glebie torfowo–murszowej występującej na obiekcie Wykowo (Kuwasy) – łąka zagospodarowana, Mt III cb. Szczegółowy opis właściwości fizycznych badanego profilu wraz z oceną zwilżalności przedstawiono w tabeli 1. Właściwości fizyczne gleby są porównywalne z parametrami odwodnionych gleb torfowych w Polsce [18]. Wartości kąta zwilżania dla wybranych utworów określono metodami pośrednimi [11, 13, 24, 25].

Badania zmienności uwilgotnienia gleby przeprowadzono na obszarze o powierzchni  $1\text{ m}^2$  w dwóch terminach pomiarowych.

Zarówno w pierwszym, jak i w drugim terminie pomiarowym obszar objęty badaniami podzielono na regularną siatkę kwadratów. W pierwszym, na powierzchni gleby zainstalowano metalową ramę ( $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ) i wykonano nawodnienie powierzchniowe o dawce wody wynoszącej 60 mm. Po dwóch godzinach procesu infiltracji pobrano próbki gleby w węzłach siatki o wymiarach 12,5 na 12,5 cm z pięciu następujących poziomów: 5–10; 15–20; 25–35; 35–40 i 45–50 cm. Z każdej warstwy pobrano 64 próbki, a łączna ilość pobranych próbek wynosiła 320. W drugim terminie na powierzchni  $1\text{ m}^2$  pobierano próbki w węzłach siatki o wymiarach 10 na 10 cm z czterech głębokości: 5–10, 15–20, 25–30 i 45–50 cm. Z każdej warstwy pobrano po 100 próbek, a ich łączną ilość wynosiła 400. Pomiarzy wykonane w drugim terminie poprzedziły intensywne opady deszczu, które wystąpiły po uprzednim przesychnieniu profilu. W obydwu terminach pomiarowych próbki pobierano do metalowych cylindrów o objętości  $100\text{ cm}^3$ . Wilgotność objętościową gleby określono metodą suszarkowo-wagową.

**Tabela 1.** Charakterystyka badanych warstw glebowych

**Table. 1.** Characteristic of measured soil layers

Głębokość [cm]	Rodzaj murszu/torfu	St. Rozkładu	Gęstość [g cm <sup>-3</sup> ]	Popielność [%sm]	Porowatość [% obj]	Kąt zwilżania [°]	
						Letey	Malik
0–10	mursz darniowy	Z <sub>3</sub>	0,338	16,0	79,5	74,35	89,16
10–40	mursz gruzełkowaty	Z <sub>2</sub>	0,270	15,3	83,7	71,71	88,47
40–50	torf olesowy	R <sub>3</sub>	0,156	11,8	90,2	74,10	88,83
50–80	torf szuwarowy	R <sub>3</sub>	0,127	11,8	92,2	69,04	87,95

Do analizy zmienności uwilgotnienia w profilu gleby torfowo-murszowej zastosowano procedury geostatystyczne. W badaniach gleboznawczych przyjmuje się na ogół pewien stopień stacjonarności zmiennej  $Z$ , zwany stacjonarnością wewnętrzną (intrinsic hypothesis). W takim przypadku zakłada się, że nawet jeżeli wariancja  $Z$  nie jest skończona, to wariancja przyrostów  $Z$  jest skończona i przyrosty te mają stacjonarność drugiego rzędu [3]:

$$E[Z(x+h) - Z(x)] = m(h) \quad (1)$$

$$\text{var}[Z(x+h) - Z(x)] = 2\gamma(h) \quad (2)$$

gdzie:

$m$  i  $\gamma$  – funkcje odległości  $h$  pomiędzy dwoma punktami (nie są funkcjami  $x$ ),

$E$  – operator wartości oczekiwanej,

$\text{var}$  – operator wariancji.

W geostatystyce funkcja  $\gamma$  zwana jest wariogramem lub semiwariogramem i można ją zdefiniować w przypadku badań prowadzonych w przekroju pomiarowym, jako [26]:

$$\gamma(h) = 0.5 E[Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (3)$$

Funkcja semiwariancji jest miarą podobieństwa lub różnicy pomiędzy wartościami w punktach obserwacji przy danej odległości  $x$ . Relacje pomiędzy parami wartości w punktach oddalonych o  $h$  są wyrażone, jako wariancje różnic pomiędzy tymi parami wartości (rys. 1):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2(n-h)} \sum_{i=1}^{n-h} \{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2 \quad (4)$$

gdzie:

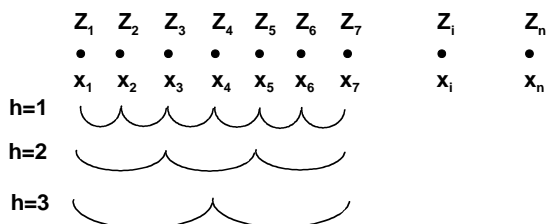
$\gamma$  – semiwariancja,

$n$  – liczba obserwacji,

$h$  – odległość pomiędzy obserwacjami,

$Z$  – wartość zmiennej.

Wartość semiwariancji jest podstawowym parametrem określającym zróżnicowanie przestrzenne pomiędzy dowolną parą punktów w odległości  $h$ .



**Rys. 1.** Ocena semiwariancji na podstawie pomiarów wzdłuż przekroju pomiarowego między punktami

**Fig. 1.** Score semivariance as measured along the measuring section ( $Z$  – value characteristic,  $x$  – position along the cross section,  $h$  – the distance between the points)

W celu określenia zależności przestrzennej dwóch regionalizowanych cech stosuje się kroswariogram, którego estymację, w przypadku pomiarów prowadzonych wzdłuż przekroju, dokonuje się na podstawie formuły [27]:

$$\hat{\gamma}(h)_{12} = \hat{\gamma}(h)_{21} = \frac{1}{2N(h)} \left\{ \sum_{i=1}^{N(h)} [z_1(x_i) - z_1(x_i + h)] [z_2(x_i) - z_2(x_i + h)] \right\} \quad (5)$$

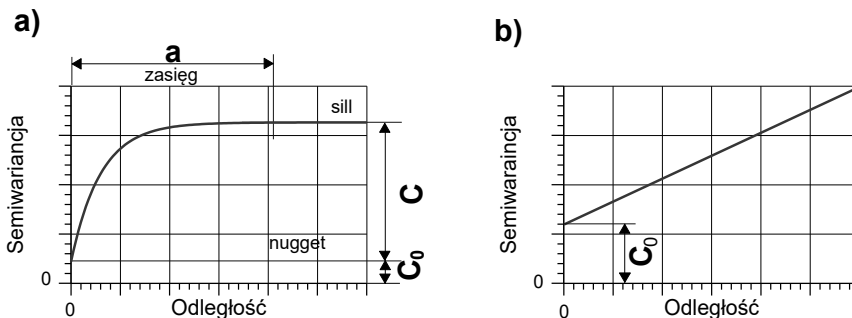
gdzie:

$z_1(x_1), z_1(x_2), \dots, z_1(x_n)$  – pomierzone wartości cechy pierwszej zlokalizowane w punktach pomiaru  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,

$z_2(x_1), z_2(x_2), \dots, z_2(x_n)$  – pomierzone wartości cechy drugiej zlokalizowane w punktach pomiaru  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

Umieszczając na osi rzędnych wartości  $\gamma$ , a na osi odciętych  $h$ , uzyskujemy wykres zwany semiwariogramem. Istnieją dwa zasadnicze rodzaje wariogramów [3]. Pierwszy z nich charakteryzuje się tym, że wartość wariancji  $\gamma$  rośnie wraz ze wzrostem odległości  $h$  do pewnej wartości maksymalnej, przy której pozostaje stała wraz ze wzrostem  $h$ . Wariogram taki pokazany jest na rys. 2a. Po początkowym wzroście wartości  $\gamma$ , osiąga ona dla odległości  $a$  – wartość stałą odpowiadającą wariancji  $C_0 + C$  („sill”). Odległość ta zwana jest zasięgiem wariogramu i określa

limit korelacji przestrzennej zmiennej  $Z = C_0 + C$ . Zmienna  $Z$  mająca wariogram tego rodzaju jest nie tylko stacjonarna wewnątrznie, lecz również sama ma stacjonarność drugiego rzędu. Z definicji semiwariogramu wynika, że  $\gamma(0) = 0$ , lecz przy wyrównywaniu danych eksperymentalnych często zdarza się, że dla wartości  $h$  bliskich zeru równa jest wartości  $C_0$  (rys. 2a). Jest to tzw. efekt samorodka („nugget effect”) wynikający z nieciągłości zmiennej  $Z$  (w przypadku pobrania samorodka do próbki, inne próbki nawet pobrane blisko siebie będą różniły się stopniem koncentracji danego składnika).



**Rys. 2.** Wariogram ze zdefiniowanym zakresem korelacji przestrzennej (a) i bez zdefiniowanego zakresu korelacji przestrzennej (b)

**Fig. 2.** Variogram of the spatial correlation of the defined range (a) and without a defined range of spatial correlation (b)

Efekt samorodka może również powstać w przypadku, gdy zmienność przestrzenna wartości cechy  $Z$  występuje na odległościach znacznie mniejszych niż najmniejsza odległość, na jakiej pobierane były próbki, bądź też wynika z dokładności wykonywania pomiarów danej charakterystyki. W drugim typie wariogramów wariancja  $\gamma(h)$  jest funkcją rosnącą bez ograniczeń (rys. 2b). W tym przypadku trudno określić zasięg korelacji przestrzennej danej cechy.

W praktyce punkty wariogramu obliczone na podstawie danych pomiarowych wykazują pewien rozrzut i powinny być wyrównane jedną z przyjętych klas funkcji. Funkcję semiwariancji można opisać różnymi modelami [15], z których najczęściej wykorzystuje się model sferyczny:

$$\begin{aligned}\gamma(h) &= C_0 + C \left[ \frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] & 0 < h \leq a \\ \gamma(h) &= C_0 + C & h > a \\ \gamma(0) &= 0\end{aligned}\quad (6)$$

oraz model liniowy:

$$\begin{aligned}\gamma(h) &= C_0 + C \left( \frac{h}{a} \right) & 0 < h \leq a \\ \gamma(h) &= C_0 + C & h > a \\ \gamma(0) &= 0\end{aligned}\quad (7)$$

W przypadku pomiarów wykonywanych w siatce pomiarowej, funkcję semiwariancji oblicza się z następujących wzorów [26]:

$$\hat{\gamma}(p, q) = \frac{1}{2(m-p)(n-q)} \sum_{i=1}^{m-p} \sum_{j=1}^{n-q} \{z(i, j) - z(i+p, j+q)\}^2 \quad (8a)$$

$$\hat{\gamma}(p, -q) = \frac{1}{2(m-p)(n-q)} \sum_{i=1}^{m-q} \sum_{j=q+1}^n \{z(i, j) - z(i+p, j-q)\}^2 \quad (8b)$$

gdzie:

m – liczba wierszy,

n – liczba kolumn,

p, q – odległość między punktami pomiarowymi odpowiednio w wierszach i kolumnach,

z(i, j) – wartość badanej cechy w i-tym wierszu i j-tej kolumnie.

Podobne wzory wykorzystuje się w przypadku kroswariogramów, które opisują zależność pomiędzy dwiema właściwościami gleby.

### **3. Wyniki badań uwilgotnienia i zapasów wody**

Wyniki pomiarów wilgotności opracowano statystycznie, obliczając wartość minimalną, maksymalną, średnią arytmetyczną, środkową, wariancję, współczynnik zmienności CV (procentowy stosunek odchylenia standardowego do wartości średniej arytmetycznej), [28]. Obliczone wartości dla poszczególnych warstw zestawiono w tabelach 2 i 3 odpowiednio w pierwszym pomiarze po nawodnieniu powierzchniowym i w drugim terminie pomiarowym mającym miejsce po naturalnych opadach deszczu. Analizując wyniki pomiarów z pierwszego terminu, można stwierdzić, że największe uwilgotnienie gleby (71,7%) obserwowano w warstwie 45–50 cm, a najniższe (54%) w warstwach 15–20 i 25–30 cm. Największą zmiennością uwilgotnienia (największe wartości CV) charakteryzowały się warstwy murszu na głębokości 15–30 cm.

W przypadku pomiarów wykonanych w drugim terminie uwilgotnienie warstwy torfu olesowego (45–50 cm) było największe, a warstwy murszu znajdujące się na głębokości 15–30 cm charakteryzowały się najmniejszą wilgotnością. Z wyjątkiem warstwy torfu (45–50 cm) uwilgotnienie profilu glebowego w I terminie było większe od uwilgotnienia pomierzonego w II terminie (tabela 2 i 3). Porównując wartości współczynnika zmienności (CV) zestawione w tabelach 2 i 3, można stwierdzić, że zmienność uwilgotnienia w profilu po intensywnych opadach deszczu była większa w porównaniu ze zmiennością, jaką zarejestrowano po nawodnieniu. Badania przepływu preferencyjnego występującego po deszczu poprzedzonego okresem suszy przedstawiono w pracy Hewelke i in. 2014. Największą zmienność uwilgotnienia na rozpatrywanym obiekcie wykazywała warstwa druga (15–20 cm), dla której wartości CV wyniosły odpowiednio 10,04% i 25,70%. Oceniając zmienność uwilgotnienia na podstawie klasyfikacji zaproponowanej przez Marcinka [14] można stwierdzić, że uwilgotnienie warstw murszu w badanym profilu glebowym jest średnio i mało zmienne ( $CV \leq 30\%$ ), natomiast warstwy torfu wykazują małą zmienność ( $CV \leq 10\%$ ).



**Tabela 2.** Wyniki badań wilgotności w węzłach siatki (I termin)**Table 2.** The results of measurement of the soil moisture in the grid nodes (I term)

Statystyka	Jednostki	Głębokość [cm]				
		5–10	15–20	25–30	35–40	45–50
Liczba próbek		64	64	64	64	64
Średnia	[% <sub>obj</sub> ]	66,66	54,37	54,54	60,86	71,73
Mediana	[% <sub>obj</sub> ]	67,40	53,67	55,14	60,93	72,61
Minimum	[% <sub>obj</sub> ]	58,73	35,96	40,57	46,14	59,46
Maksimum	[% <sub>obj</sub> ]	69,78	71,11	67,47	67,68	78,19
Wariancja	[% <sub>obj</sub> ] <sup>2</sup>	6,96	102,35	42,30	20,55	16,98
CV	[%]	2,62	10,04	6,45	4,50	4,08

**Tabela 3.** Wyniki badań wilgotności w węzłach siatki (II termin)**Table 3.** The results of measurements of the soil moisture in the grid nodes (II term)

Statystyka	Jednostki	Głębokość [cm]			
		5–10	15–20	25–30	45–50
Liczba próbek		100	100	100	100
Średnia	[% <sub>obj</sub> ]	52,12	42,16	51,91	73,73
Mediana	[% <sub>obj</sub> ]	54,31	38,27	51,57	74,81
Minimum	[% <sub>obj</sub> ]	27,24	29,38	41,19	49,11
Maksimum	[% <sub>obj</sub> ]	68,51	73,17	65,47	83,32
Wariancja	[% <sub>obj</sub> ] <sup>2</sup>	125,70	117,10	28,90	34,70
CV	[%]	21,50	25,70	10,40	8,00

Obliczenia zapasów przeprowadzono dla poszczególnych punktów pomiarowych zlokalizowanych w węzłach siatki, a ich wyniki wraz z podstawowymi miarami statystycznymi przedstawiono w tabeli 4. Użyte wyniki pozwalają stwierdzić, że wielkość zapasów wody w 0,5 m warstwie gleby charakteryzuje się dużą zmiennością przestrzenną, np. różnica pomiędzy wartością maksymalną i minimalną zapasów dla pomiarów wykonanych w I terminie przekracza 66 mm. Obserwowana zmienność może mieć istotne znaczenie przy ocenie aktualnych zasobów wodnych profilu glebowego.

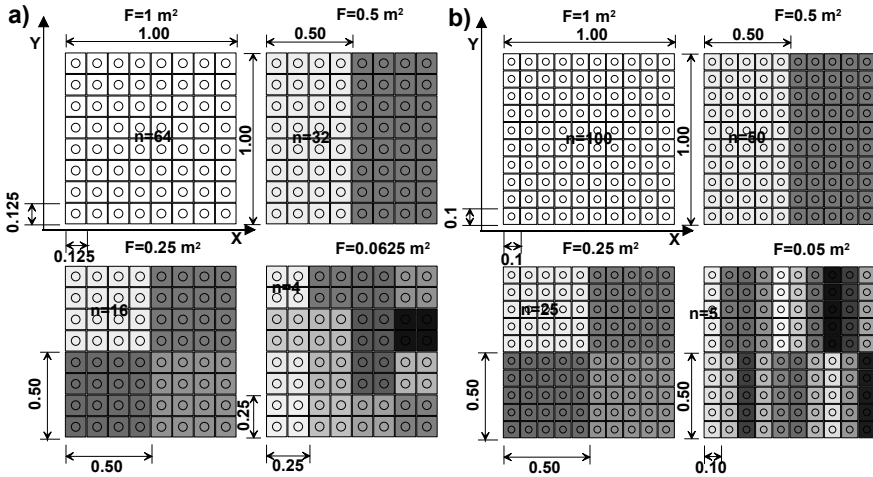
**Tabela 4.** Wyniki obliczeń zapasów wody w 0.5 m warstwie gleby  
**Table 4.** The results of calculations of water supplies in the 0.5 m soil layer

Statystyka	Jednostki	I termin	II termin
Liczba próbek		64	100
Średnia	[mm]	239,6	277,4
Mediana	[mm]	272,1	330,7
Minimum	[mm]	176,7	227,8
Maksimum	[mm]	242,9	272,7
Wariancja	[mm] <sup>2</sup>	573,1	568,6
CV	[%]	9,99	8,59

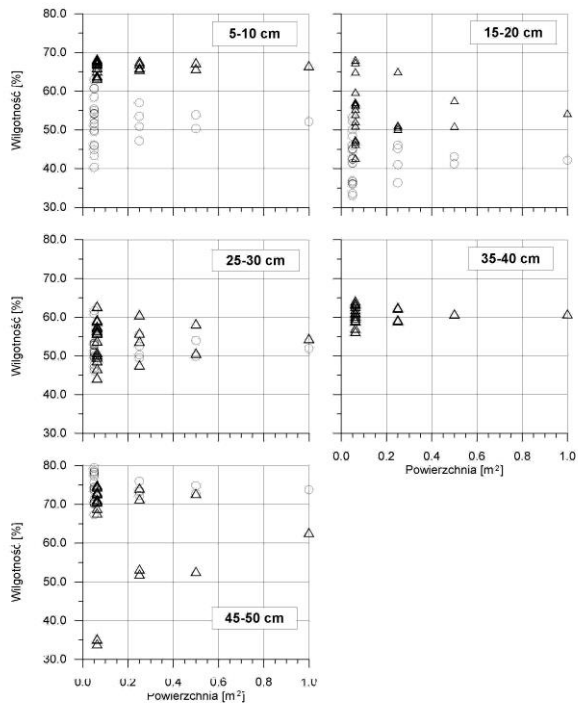
#### 4. Wpływ wielkości obszaru próbkowania na ocenę zmienności uwilgotnienia

W celu oceny wpływu wielkości obszaru próbkowania na zmienność uwilgotnienia przeprowadzono obliczenia, które polegały na podzieleniu całkowitej powierzchni próbkowania na szereg mniejszych obszarów, o różnych powierzchniach, według schematów przedstawionych na rys. 3. W obrębie mniejszych powierzchni obliczono wilgotność średnią i współczynnik zmienności (CV), wykorzystując dane pochodzące z punktów pomiarowych objętych odpowiednią powierzchnią obszaru próbkowania.

Obliczenia przeprowadzono dla danych pochodzących z obu terminów pomiarowych. Wyniki obliczeń zależności wilgotności średniej oraz współczynnika zmienności (CV) od powierzchni obszaru próbkowania przedstawiono na rys. 4 i 5.

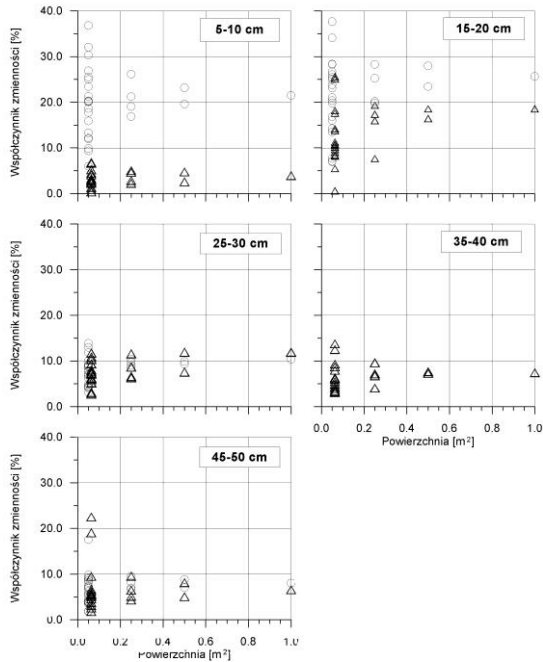


**Rys. 3.** Podział obszaru próbkowania na mniejsze powierzchnie dla I (a) i II terminu pomiarowego (b) (wymiary w m,  $F$  – powierzchnia,  $n$  – liczba próbek)  
**Fig. 3.** Division of the area into smaller sampling areas for I (a) and II measuring period (b) (dimensions in meters,  $F$  – surface,  $n$  – number of samples)



**Rys. 4.** Zależność uwilgotnienia w badanych warstwach gleby od powierzchni próbkowania dla dwóch terminów pomiarowych: O – I, Δ – II

**Fig. 4.** Soil moisture in the layers for the soil sampling surface for the two measurement terms: O – I, Δ – II



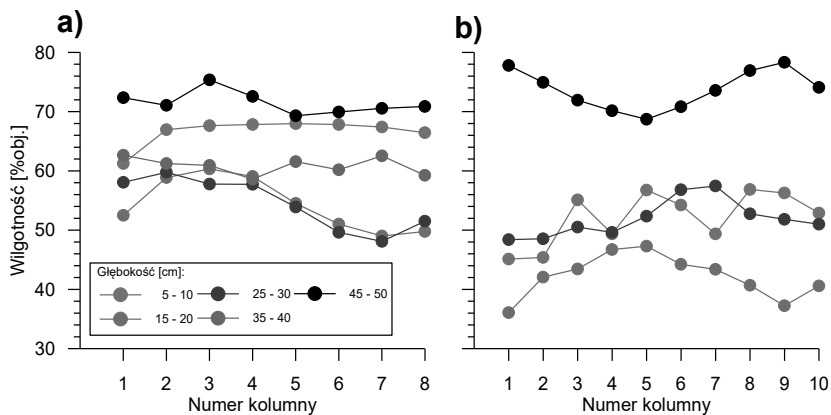
**Rys. 5.** Zależność współczynnika zmienności uwilgotnienia w badanych warstwach gleby od powierzchni próbkowania dla dwóch terminów pomiarowych: O – I, Δ – II

**Fig. 5.** Dependence of the coefficient of variation in the analyzed soil moisture from the layers of soil sampling surface for the two measurement terms: O – I, Δ – II

Zależność pomiędzy wilgotnością a powierzchnią próbkowania (rys. 4) wykazuje, że wraz ze wzrostem powierzchni próbkowania dyspersja wyników pomiaru ulega zmniejszeniu, a rozrzuty są symetryczne. Zależności pomiędzy współczynnikiem zmienności wilgotności a powierzchnią próbkowania (rys. 5) wykazują, że największe wartości zmienności obserwowano w wierzchnich warstwach gleby (CV ok. 40% dla warstwy 5–10 cm). Porównując zmienności pomiędzy pomiarami zaobserwowano większe wartości CV dla wariantu z nawodnieniem w dwóch wierzchnich warstwach.

## 5. Ocena zmienności przestrzennej uwilgotnienia

Do prawidłowego oszacowania semiwariancji niezbędne jest zapewnienie stacjonarności zmiennych, czego kryterium jest stałość właściwości zmiennej przy zmianie początku skali przestrzennej. Aby zagwarantować stacjonarność zmiennych, konieczne jest zapewnienie ich rozkładu normalnego i homogeniczności wariancji [8]. W celu sprawdzenia warunków stacjonarności dla wyników pomiarów uwilgotnienia, przeprowadzono analizę trendu (zmienności systematycznej).



**Rys. 6.** Średnie wartości wilgotności gleby w poszczególnych kolumnach dla pomiarów wykonanych w terminie I (a) i w II terminie (b)

**Fig. 6.** Average soil moisture values in related columns for measurements made within I (a) and II (b) term

W analizie tej dla danej wilgotności objętościowej ( $Z$ ) w punkcie pomiarowym (węzle siatki) przydzielono dwa następujące identyfikatory: indeks  $i$  charakteryzujący dany numer kolumny oraz indeks  $j$  charakteryzujący dany numer wiersza. Następnie obliczono wartości średnie wilgotności dla poszczególnych kolumn, dla dwóch terminów pomiarowych (rys. 6), które wskazują, że istnieje liniowa zależność pomiędzy średnimi wartościami wilgotności w kolumnach, a numerem kolumny, co sugeruje występowanie systematycznej zmienności. Występowanie trendu szczególnie widoczne jest w warstwach 5–20 i 25–30 cm w pomiarach wykonanych w terminie I (rys. 6a), oraz w warstwach 5–10 i 25–30 cm (rys. 6b) w terminie II. W celu eliminacji trendu wykorzystano nieparame-

tryczną analizę danych [5]. Obliczenia polegały na określeniu tzw. wartości resztkowych. W pierwszym etapie obliczono wartości resztkowe pierwszego rodzaju, korzystając z następującej formuły:

$$r_{(i,j)} = z_{(i,j)} - z_{m(\dots j)} \quad (9)$$

gdzie:

$r_{(i,j)}$  – wartość resztkowa w punkcie (i, j),

$z_{(i,j)}$  – wartość pomiarowa wilgotności objętościowej w punkcie (i, j),

$z_{m(\dots j)}$  – środkowa wartość w danym wierszu j.

Następnie obliczono nowe wartości resztek (resztki drugiego rodzaju), jako:

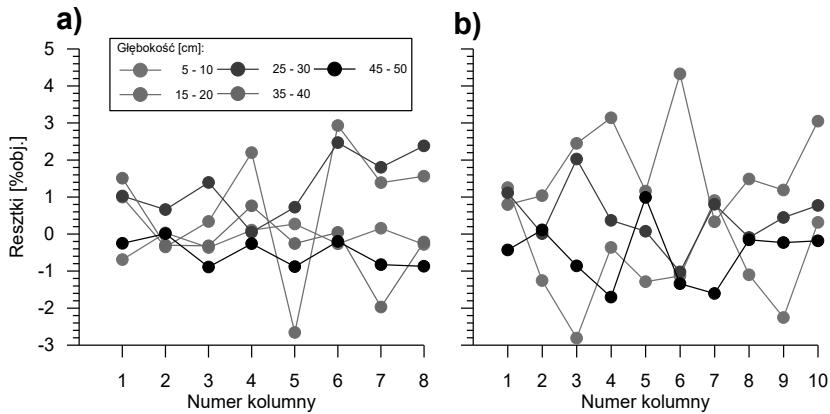
$$s_{(i,j)} = r_{(i,j)} - r_{m(i,\dots)} \quad (10)$$

gdzie:

$s_{(i,j)}$  – nowa wartość resztkowa w punkcie (i, j),

$r_{m(i,\dots)}$  – środkowa wartość w kolumnie i poprzednio obliczonych wartości resztkowych  $r_{(i,j)}$ .

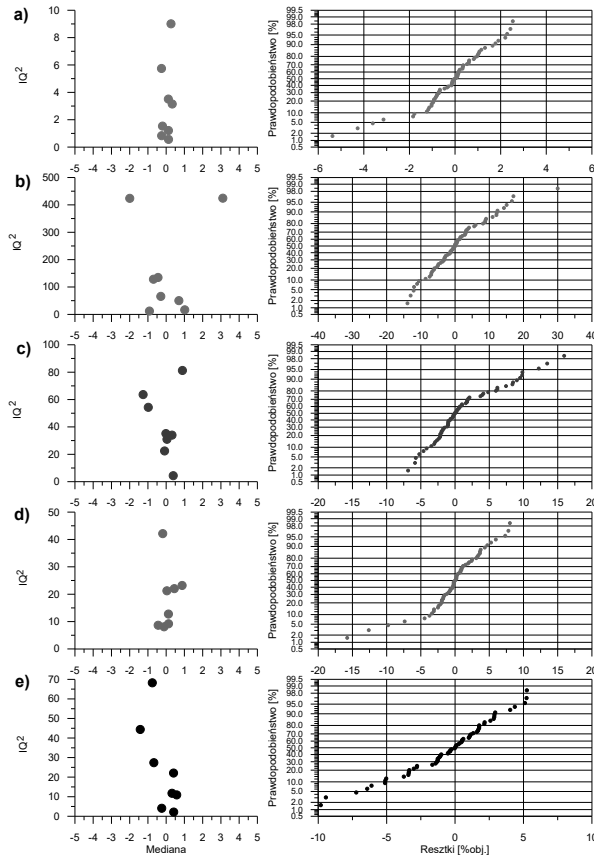
Obliczone średnie wartości resztek (drugiego rodzaju,  $s_{(i,j)}$ ) dla poszczególnych kolumn dla dwóch terminów pomiarowych (rys. 7), pozwalają stwierdzić, że nie występuje zmienność systematyczna wartości resztek, co świadczy o tym, że metoda eliminacji trendu [5] okazała się skuteczna. Sprawdzenie warunku stacjonarności zmiennych przeprowadzono za pomocą metody „split - window” [16]. Metoda ta polega na sprawdzeniu korelacji pomiędzy wartościami median i kwadratami różnic 75% i 25% kwartyli (IQ2) określonych w tzw. „oknach” (ciągach o mniejszej liczbie wyrazów). Brak zależności pomiędzy wartościami median w poszczególnych „oknach”, a wartościami IQ2 świadczy o stacjonarności badanej zmiennej (braku trendu). W celu sprawdzenia warunku stacjonarności siatkę pomiarową podzielono na „okna”, do których należały obserwacje wykonane w poszczególnych kolumnach. W każdym (terminie I i terminie II) oknie dla wartości resztkowych drugiego rodzaju ( $s_{(i,j)}$ ) obliczano wartości mediany oraz IQ2, dla których opracowano równania regresji.



**Rys. 7.** Średnie wartości resztek wilgotności gleby w poszczególnych kolumnach dla pomiarów wykonanych w terminie I (a) i terminie II (b)  
**Fig. 7.** Mean values of residual soil moisture in related columns for measurements made within I (a) and II (b) term

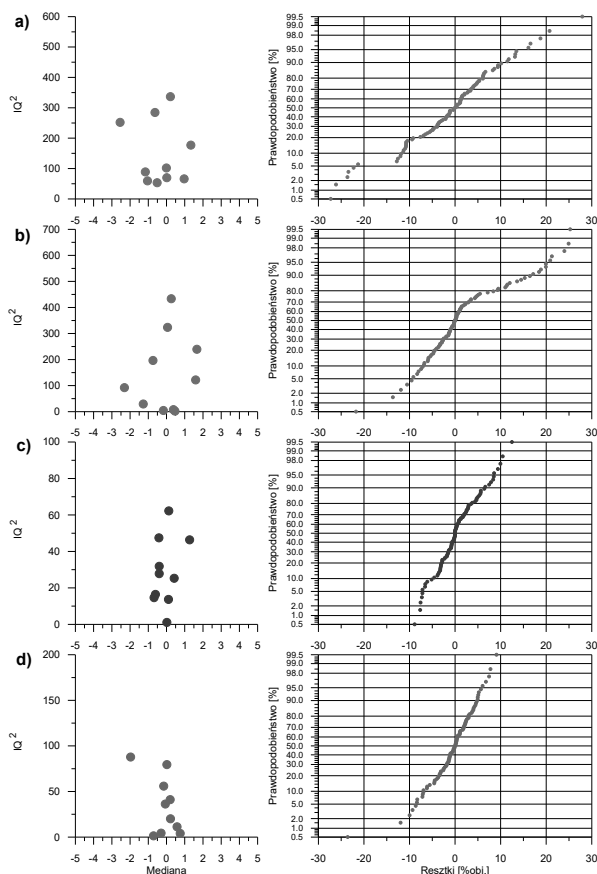
Badania stacjonarności resztek metodą „split - window” oraz dys-trybuanty rozkładu normalnego (rys. 8 i 9) wykazują, że po dokonaniu eliminacji trendu obserwuje się stosunkowo słabą zależność pomiędzy wartościami mediany i wartościami  $IQ^2$ , co świadczy o spełnieniu warunku stacjonarności. Wykonana eliminacja trendu zapewniła również rozkład normalny wartości resztek uwilgotnienia. Semiwariancję i kroswariancję dla wartości resztek uwilgotnienia obliczono, korzystając ze wzorów (8a) i (8b), a następnie wyrównano je modelem sferycznym (6) lub liniowym (7). Parametry modeli semiwariogramów i kroswariogramów określono wyrównując obliczone wartości semiwariancji i kroswariancji metodą najmniejszych kwadratów z wykorzystaniem wag do oceny, których wykorzystano liczbę par obserwacji. Zestawione wyniki badań pozwoliły wnioskować, że pomiary uwilgotnienia gleby wykonane po nawodnieniu wykazują znacznie lepszą korelację przestrzenną (tabela 5) w porównaniu z wynikami badań wykonanymi po opadach deszczu (tabela 6). W przypadku pomiarów wykonanych w I terminie jedynie dla warstwy 35–40 cm nie udało się określić limitu korelacji przestrzennej (a), natomiast uwilgotnienie gleby mierzone w II terminie wykazywało korelację przestrzenną jedynie w warstwie 15–20 cm.





**Rys. 8.** Zależności pomiędzy wartością środkową resztek uwilgotnienia, a kwadratem różnicy górnego i dolnego kwartyła ( $IQ^2$ ) oraz rozkłady prawdopodobieństwa wartości resztek uwilgotnienia w warstwach: 5–10 cm (a), 15–20 cm (b), 25–30 cm (c), 35–40 cm (d) i 45–50 cm (e) na podstawie wyników pomiarów wykonanych w terminie I

**Fig. 8.** The relation between the middle residual moisture of the value and the square of the difference of the upper and lower quartiles ( $IQ^2$ ) and the probability distributions of the residual moisture value in the layers: 5–10 cm (a), 15–20 cm (b), 25–30 cm (c), 35–40 cm (d) and 45–50 cm (e) based on the results of I term



**Rys. 9.** Zależności pomiędzy wartością środkową resztek uwilgotnienia, a kwadratem różnicy górnego i dolnego kwartyla ( $IQ^2$ ) oraz rozkłady prawdopodobieństwa wartości resztek uwilgotnienia w warstwach: 5–10 cm (a), 15–20 cm (b), 25–30 cm (c) i 45–50 cm (d) na podstawie wyników pomiarów wykonanych w terminie II

**Fig.9.** The relation between the middle residual moisture of the value, and the square of the difference of the upper and lower quartiles ( $IQ^2$ ) and the probability distributions of the residual moisture value in the layers: 5–10 cm (a), 15–20 cm (b), 25–30 cm (c) and 45–50 cm (d) based on the results of II term

**Tabela 5.** Wartości współczynników modeli semiwariogramów opisujących wartości resztek uwilgotnienia dla pomiarów wykonanych w terminie I

**Table 5.** Coefficients describing the model semivariograms of the residual moisture value for I term

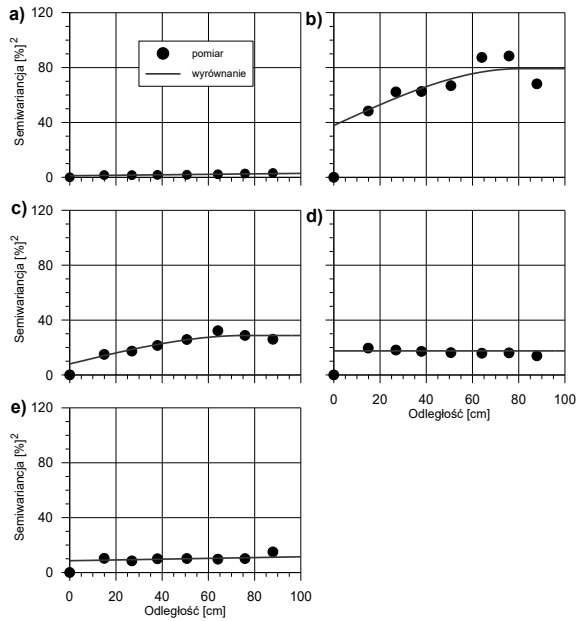
Głębokość [cm]	Typ semiwariogramu	Parametry		
		$C_0$ [%obj] <sup>2</sup>	$C$ [%obj] <sup>2</sup>	a [cm]
5–10	liniowy	1,19	2,71	158,0
15–20	sferyczny	37,80	41,40	80,5
25–30	sferyczny	7,98	20,80	76,2
35–40	liniowy	17,50	–	–
45–50	liniowy	8,57	5,44	189,0

**Tabela 6.** Wartości współczynników modeli semiwariogramów opisujących wartości resztek uwilgotnienia dla pomiarów wykonanych w terminie II

**Table 6.** Coefficients describing the model semivariograms of the residual moisture value for II term

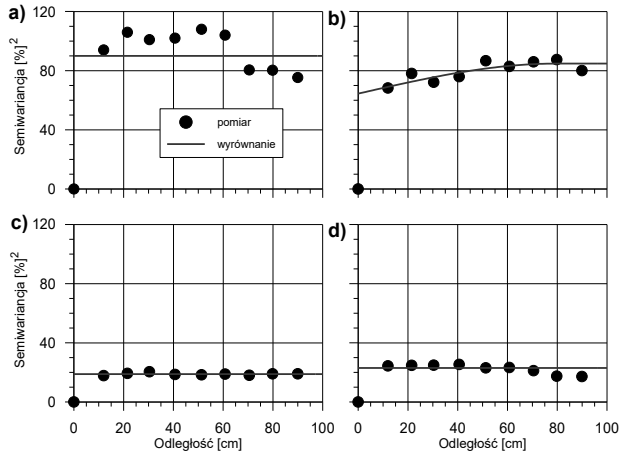
Głębokość [cm]	Typ semiwariogramu	Parametry		
		$C_0$ [%obj] <sup>2</sup>	$C$ [%obj] <sup>2</sup>	a [cm]
5–10	liniowy	90,00	–	–
15–20	sferyczny	64,50	20,30	79,3
25–30	liniowy	18,80	–	–
45–50	liniowy	23,00	–	–

Dla niektórych wartości semiwariancji wyrównanych modelem liniowym nie było możliwe określenie limitu korelacji przestrzennej, co oznacza, że dla wilgotności aktualnej semiwariancja jest stała i jest niezależna od odległości (rys. 10 i 11).



**Rys. 10.** Pomierzone i wyrównane modelami semiwariogramy wartości uwilgotnienia w warstwach: 5–10 cm (a), 15–20 cm (b), 25–30 cm (c), 35–40 cm (d) i 45–50 cm (e) na podstawie wyników pomiarów wykonanych w terminie I

**Fig. 10.** Measured and leveled by semivariogram models values of moisture in the layers of 5–10 cm (a), 15–20 cm (b), 25–30 cm (c), 35–40 cm (d), and 45–50 cm (e) the from measurements made within the I term

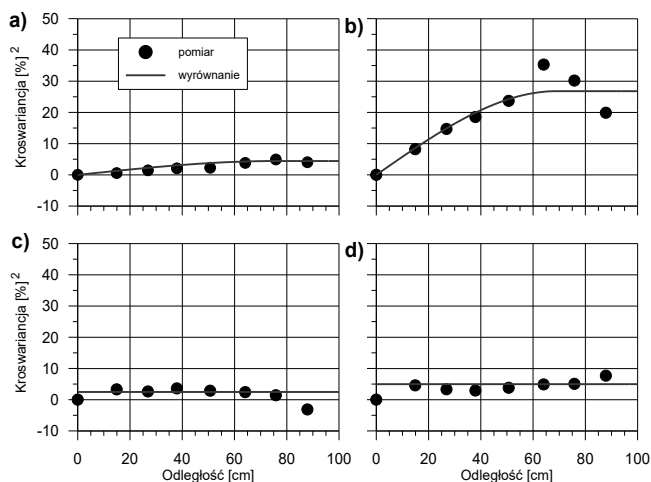


**Rys. 11.** Pomierzone i wyrównane modelami semiwariogramy wartości uwilgotnienia w warstwach: 5–10 cm (a), 15–20 cm (b), 25–30 cm (c) i 45–50 cm (d) na podstawie wyników pomiarów wykonanych w terminie II

**Fig. 11.** Measured and leveled by semivariogram models values of moisture in the layers of 5–10 cm (a), 15–20 cm (b), 25–30 cm (c), 45–50 cm (d) the from measurements made within the II term

Pomierzone i wyrównane modelami kroswariogramy, określone dla wartości resztek wilgotności objętościowej między poszczególnymi warstwami, przedstawiono na rys. 12 i 13, a obliczone parametry kroswariogramów w tabelach 7 i 8.

Z prezentowanych danych wynika, że zarówno po nawodnieniu, jak i po intensywnych opadach deszczu istnieje zależność rozkładu uwilgotnienia między poszczególnymi warstwami murszu (do 30 cm) i może być opisana przy pomocy modelu sferycznego. Limit korelacji przestrzennej uwilgotnienia w tych warstwach zawiera się w przedziale od 54,3 cm do 75,8 cm. W badanym profilu glebowym nie zaobserwowano korelacji przestrzennej pomiędzy uwilgotnieniem w warstwach murszu i torfu.



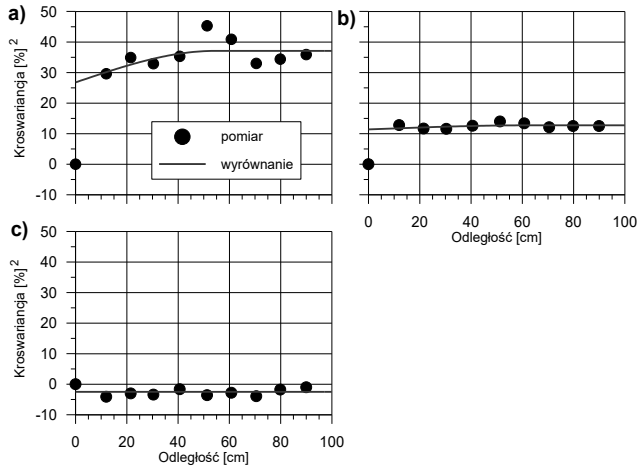
**Rys. 12.** Pomierzone i wyrównane modelami kroszwariogramy wartości uwilgotnienia w warstwach: 5–10 i 15–20 cm (a), 15–20 i 25–30 cm (b), 25–30 i 35–40 cm (c), 35–40 i 45–50 cm (d) na podstawie wyników pomiarów wykonanych w I terminie

**Fig. 12.** Measured and corrected by cross variogram models values of moisture in layers 5–10 and 15–20 cm (a), 15–20 and 25–30 cm (b), 25–30, and 35–40 cm (c), 35–40, and 45–50 cm (d) based on the results carried out in I term

**Tabela 7.** Wartości współczynników modeli kroszwariogramów opisujących wartości resztek uwilgotnienia dla pomiarów wykonanych w I terminie

**Table. 7.** Cross variogram model coefficients describing the value of residual moisture for the I term

Warstwy [cm]	Typ semiwariogramu	Parametry		
		$C_0$ [%obj] <sup>2</sup>	$C$ [%obj] <sup>2</sup>	$a$ [cm]
5–10 i 15–20	sferyczny	0,00	4,44	75,8
15–20 i 25–30	sferyczny	0,00	26,80	68,9
25–30 i 35–40	liniowy	2,50	–	–
35–40 i 45–50	liniowy	5,00	–	–



**Rys. 13.** Pomierzone i wyrównane modelami kroszwariogramy wartości uwilgotnienia w warstwach: 5–10 i 15–20 cm (a), 15–20 i 25–30 cm (b), 25–30 i 45–50 cm (c) na podstawie wyników pomiarów wykonanych w II terminie

**Fig. 13.** Measured and corrected by cross variogram models values of moisture in layers 5–10 and 15–20 cm (a), 15–20 and 25–30 cm (b), 25–30 and 45–50 cm (d) based on the results carried out in II term

**Tabela 8.** Wartości współczynników modeli kroszwariogramów opisujących wartości resztek uwilgotnienia dla pomiarów wykonanych w II terminie

**Table. 8.** Cross variogram model coefficients describing the value of residual moisture for the II term

Warstwy [cm]	Typ semiwariogramu	Parametry		
		$C_0$ [% <sub>obj</sub> ] <sup>2</sup>	$C$ [% <sub>obj</sub> ] <sup>2</sup>	$a$ [cm]
5–10 i 15–20	sferyczny	26,80	10,30	54,3
15–20 i 25–30	sferyczny	11,40	1,35	62,3
25–30 i 45–50	liniowy	-2,50	–	–

## **6. Wnioski**

1. Zmienność przestrzenna uwilgotnienia gleby po nawodnieniu i po intensywnych opadach poprzedzonych okresem suszy, w profilu hydrofobowej gleby torfowo-murszowej z obiektu Wykowo wykazała stosunkowo słabą korelację przestrzenną. Maksymalny zasięg korelacji przestrzennej (189 cm) wilgotności gleby obserwowano w warstwie torfu dla wyników pomiarów wykonanych po nawodnieniu. Obserwuje się stosunkowo duży udział zmienności losowej w całkowitej wariancji uwilgotnienia oraz słabą korelację przestrzenną uwilgotnienia pomiędzy poszczególnymi warstwami profilu glebowego. Uzyskane wyniki świadczą o tym, że w hydrofobowej glebie torfowo-murszowej, w warunkach wystąpienia preferencyjnego przepływu wody, przestrzenny rozkład uwilgotnienia ma charakter losowy.
2. Analiza współczynnika zmienności CV pozwala stwierdzić, że zmienność uwilgotnienia po intensywnych opadach deszczu, które wystąpiły po długim okresie bezopadowym była większa niż po nawodnieniu. Obserwowana zmienność jest związana z hydrofobowością murszu klasyfikowanego przy wilgotności mniejszej niż 50% jako mocno niezwilżalny.
3. Analiza zależności pomiędzy wilgotnością a powierzchnią próbkowania wykazuje, że wraz ze wzrostem powierzchni próbkowania dyspersja wyników ulega zmniejszeniu, a rozrzuty są symetryczne. Zależność pomiędzy współczynnikiem CV a powierzchnią próbkowania wykazuje, że największe wartości zmienności wystąpiły w wierzchniej warstwie badanej gleby (CV =40%).

Zgodnie z zaleceniami hydrofobowość powinna być brana pod uwagę przy symulacji przepływu wody w glebie i transporcie substancji rozpuszczonej, koniecznością więc staje się dalsze rozpoznanie zjawiska hydrofobowości w glebach organicznych.



## Literatura

1. **Berglund K., Persson L.:** *Water repellence of cultivated organic soils.* Acta Agriculture Scandinavica. Section B Soil and Plant Science 46. 145–152 (1996).
2. **Brandyk T., Gnatowski T., Szatyłowicz J.:** *Spatial variability of some physical properties of decomposed lowland peat soil.* Proceedings of 10<sup>th</sup> International Peat Congress, 27 May-2 June, Bremen (ed. G.W. Luttig), vol. 2, 294–305 (1996).
3. **Brandyk T., Skąpski K., Szatyłowicz J.:** *Zmienność przestrzenna właściwości fizycznych gleby.* W: „Współczesne problemy melioracji” (red. C. Somorowski), Wyd. SGGW, 140–151 (1993).
4. **Comas, X., Slater L., Reeve A.:** *Spatial variability in peat soils is revealed by ground penetrating radar (GPR).* Geophysical Research Letters. 32: L08401. 2005.
5. **Emerson J.D., Wong G.Y.:** *Resistant non-additive fit for two way tables.* In: Exploring Data Tables, Trends and Shapes. John Wiley and Sons. N.Y. 67–83 (1985).
6. **Gnatowski T., Szatyłowicz J., Brandyk T., Oleszczuk R.:** *Spatial variability of hydraulic properties in moorsh layer.* Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Peat Congress. Quebec. August 6–12, v. 2, 575–584 (2000).
7. **Goebel M., O., Bachmann J., Reichstein, M. Janssens I. A., Guggenberger G.,** *Soil water repellency and its implications for organic matter decomposition—is there a link to extreme climatic events?* Global Change Biology. 17: 2640–2656 (2011).
8. **Hamlett J.M., Horton R., Cressie N.A.C.:** *Resistant and exploratory techniques for use in semivariogram analysis.* Soil Sci. Soc. Am. J., 50. 868–875 (1986).
9. **Hewelke E., Szatyłowicz J., Gnatowski T., Oleszczuk R.:** Effects of soil water repellency on moisture patterns in a degraded Sapric Histosol. Land Degradation & Development. 2014. DOI: 10.1002/ldr.2305
10. **Jordán A., Zavala L. M., Mataix-Solera J., Doerr S. H.:** *Soil water repellency: Origin, assessment and geomorphological consequences.* Catena, 108, 1–5 (2013).
11. **Letey J., Osborn J., Pelishek R.E.:** *Measurement of liquid-solid contact angles in soil and sand.* Soil Sci. 93: 149–153 (1962).
12. **Liberacki D.:** *Dynamika zmian stanów wód gruntowych i uwilgotnienia gleb siedlisk leśnych w zlewni cieku Hutka,* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection), 13. 1927–1942 (2011).

13. **Malik R.S., Kumar S., Dahiya I.S.:** *An approach to quick determination of some water transmission characteristics of porous media.* Soil Sci., 137: 395–400 (1984).
14. **Marcinek J.:** *Parametryzacja środowiska glebowego w aspekcie gospodarki wodnej gleb.* Problemy Agrofizyki, z 67: 20–52 (1992).
15. **McBratney A.B., Webster R.:** *Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates.* J. Soil. Sci., 37: 617–639 (1986).
16. **Mohanty B.P., Kanwar R.S., Horton R.:** *A robust-resistant approach to interpret spatial behavior of saturated hydraulic conductivity of a Glacial till soil under no-tillage system.* Water Resour. Res., 27: 2979–2992 (1991).
17. **Oleszczuk R.;** Gnatowski, T.; Brandyk, T., Szatyłowicz, J.: *Calibration of TDR for moisture content monitoring in moorsh layers.* In “Wetlands: Modeling, Monitoring, Management” (ed. by T. Okruszko, E. Maltby, J. Szatyłowicz, D. Świątek, W. Kotowski, pp. 121–124. Taylor & Francis Group. London 2007.
18. **Oleszczuk R., Truba M.:** The analysis of some physical properties of drained peat-moorsh soil layers. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Land Reclamation* 45: 41–48. 2013. DOI: 10.2478/sggw-2013-0004
19. **Piecuch T.,** *Równanie Darcy jako podstawa analizy teoretycznej szczególnych przypadków procesu filtracji.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection), 11, 299–319 (2009).
20. **Ritserma C.J., Dekker L.W.:** *Influence of sampling strategy on detecting preferential flow paths in water repellent sand.* J. Hydrol., 177, 33–45. (1996).
21. **Szatyłowicz J., Gnatowski T., Szejba D., Oleszczuk R., Brandyk T., Kechavarzi C.:** *Moisture content variability in drained fen soil.* In “Wetlands: Modeling, Monitoring, Management” (ed. by T. Okruszko, E. Maltby, J. Szatyłowicz, D. Świątek, W. Kotowski, 113–120. Taylor & Francis Group. London 2007.
22. **Täumer K, Stoffregen H, Wessolek G.:** *Determination of repellency distribution using soil organic matter and water content.* Geoderma 125, 107–115 (2005).
23. **Waniek E., Szatyłowicz J., Brandyk T.:** *Moisture patterns In water repellent peat-moorsh soil.* Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu CCCX: 199–209 (1999).

24. **Waniek E., Sztyłowicz J., Brandyk T.:** *Determination of soil-water contact angles in peat-moorsh soils by capillary rise experiments.* *Suo* 51 (3): 149–154 (2000).
25. **Waniek E.:** *Wpływ zwilżalności na uwilgotnienie gleby torfowo-murszowej. Praca doktorska. SGGW. Warszawa 2002.*
26. **Webster R.:** *Quantitative spatial analysis of soil in the field.* *Advances in soil science*, 3: 1–70 (1985).
27. **Webster R., Oliver M.A.:** *Statistical methods in soil and land resource survey.* Oxford University Press. 316 (1990).
28. **Wójcik A.R.:** *Statystyka matematyczna z elementami rachunku prawdopodobieństwa.* Wyd. SGGW, Warszawa 1993.

## **Spatial Variability in Soil Moisture Content under Preferential Flow in Hydrophobic Organic Soil**

### **Abstract**

Wettability is one of the most important peculiarities of soil and it directly influences their physical, mechanical, chemical, properties biological and their fertility. Soil water repellency can lead to the development of unstable wetting and preferential flow paths. Water flow and solute transport patterns are complex under such conditions. The existence of the water repellent layer can have negative influence on soil moisture content because it reduces the amount of water supplied from ground water level by capillary rise, infiltration from the soil surface and also for retention and therefore acts as a constraint in the restoration of drained peatlands by rewetting. That means that repellency can have significant influence on restoration, conservation and management of the peat resources. The paper presents the result of the spatial variability of soil moisture in a small area in a hydrophobic peat-muck profile located within Kuwasy drainage-subirrigation system at the Biebrza River Valley. Soil moisture variability study was carried out on an area of 1 m<sup>2</sup> and 0.5 depth in the two measurement periods. The measurements were made in two versions: the first after artificial irrigation (60 mm) and the second after an intense rain. In both of measuring periods the study area was divided into a regular grid of squares. Spatial variability of the investigated traits was evaluated using parameters of the theoretical variogram and cross variogram models. The variability of soil moisture in the profile after intense rainfall was higher than after irrigation. The maximum range of the spatial correlation (189 cm) soil moisture was observed in the alder peat layer for measurements made after irrigation. The observed

variability is associated with high hydrophobicity of studied soil. The observed variability may be important in the assessment of current water resources of the soil profile. The relationship between water content and the surface of the sampling indicates that, following the increase of the sampling surface the dispersion of results gets smaller, and the distributions are symmetric. The relationship between the coefficient of variation CV and the surface sampling shows that most of the variability occurred in the top moorsh layer of soil tested (CV = 40%). To check the stationary conditions for soil moisture measurements, the analysis of the trend were made. Elimination of the trend also provided a normal distribution of residual moisture values. Semivariance and cross variance for residual moisture values were calculated, and then were leveled with spherical or linear model. From the presented data results that after irrigation as well as heavy rain falls there exists the relationship between the distribution of moisture muck individual layers (up to 30 cm) and can be described using a spherical model. The results show large spatial variability of the total variance of soil moisture and poor soil moisture spatial correlation between the different layers of the soil profile.

**Słowa kluczowe:** semiwariogram, hydrofobowość, gleba torfowo-murszowa

**Key words:** semivariogram, hydrophobisity, peat-muck soil