doi: 10.26114/sir.iung.2016.48.08

S T U D I A I R A P O R T Y IUNG-PIB

ZESZYT 48(2): 105-129 **2016**

Alicja Pecio, Jacek Niedźwiecki, Guillaume Debaene

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy w Puławach

ROZPOZNANIE POLA PODSTAWĄ PRECYZYJNEGO NAWOŻENIA ROŚLIN*

Słowa kluczowe: rolnictwo precyzyjne, warunki glebowe, pszenica ozima, plon ziarna, stan łanu, pomiary punktowe, metody on-the-go

Wstęp

W praktyce rolniczej krajów przodującego rolnictwa powszechna staje się koncepcja rolnictwa precyzyjnego polegająca na różnicowaniu zabiegów agrotechnicznych, zwłaszcza nawożenia, w obrębie jednego pola o zróżnicowanej pokrywie glebowej. Punktem wyjścia w takim systemie produkcji roślinnej jest rozpoznanie przestrzennej zmienności cech gleby i pokrywy roślinnej, w tym plonu końcowego oraz ich odwzorowanie w postaci map cyfrowych. Rozpoznanie zakresu zmienności pola i wyznaczenie obszarów o niesprzyjających warunkach dla plonowania roślin umożliwia wprowadzenie technik polegających na stosowaniu odpowiednio zróżnicowanych zabiegów agrotechnicznych.

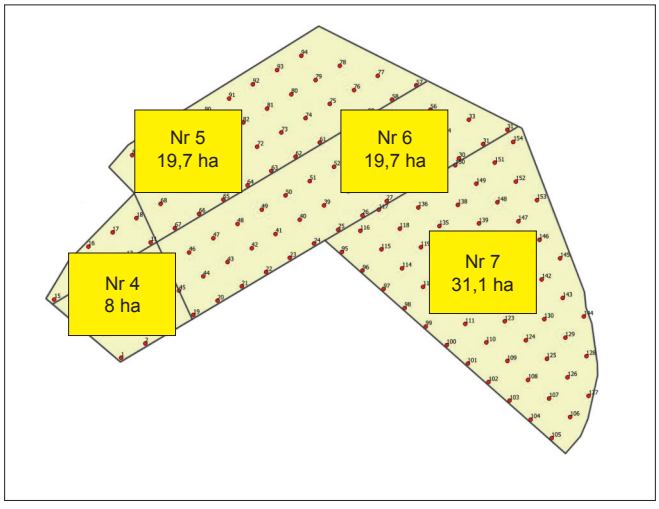
Rozpoznania zmienności glebowej i zmienności łanu w obrębie pola można dokonać w sposób bezpośredni, poprzez pobieranie i analizowanie próbek gleby w siatce punktów pomiarowych lub w sposób pośredni, z zastosowaniem ciągłych pomiarów elektromagnetycznych lub spektralnych w zakresie światła widzialnego i bliskiej podczerwieni (VIS-NIR) (1, 2, 3, 6, 9, 12), czy też zdjęć lotniczych. Metodami tymi, z dużą rozdzielczością przestrzenną, można ocenić zmienność zarówno właściwości gleby, takich jak m.in. tekstura czy zawartość węgla organicznego, jak również właściwości łanu roślin, np. stan odżywienia azotem. Na podstawie szczegółowych informacji o zmienności właściwości fizycznych gleby, zasobności w składniki pokarmowe oraz stanie odżywienia roślin w oparciu o wskaźniki wegetacyjne można zoptymalizować nawożenie, stosując technologię VRA – *variable rate application*. Punktowe obserwacje bezpośrednie umożliwiają ponadto kalibrację ciągłych pomiarów pośrednich, które bez tej kalibracji nie mogą być wykorzystane w praktyce (10, 12).

* Opracowanie wykonano w ramach zadań 1.2 i 2.2 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

Badania, których celem było wypracowanie metod oceny przestrzennej i czasowej zmienności właściwości gleby prowadzone są w Stacji Doświadczalnej w Baborówku od początku lat 90. ubiegłego wieku. Na podstawie wieloletnich badań scharakteryzowano zmienność glebową pola o powierzchni ok. 50 ha (7), opisano klasyczne i zaawansowane metody badania tej zmienności (11), a także wyznaczono odpowiednie dawki nawozów (8). Podobne badania, aczkolwiek z zastosowaniem nowych metod, przeprowadzono także na innym polu SD w Baborówku, o powierzchni 78,5 ha, które przejęto po ok. 15 latach uprawy bezorkowej. W pracy przedstawiono wyniki rozpoznania przestrzennego zróżnicowania właściwości gleby i łanu pszenicy ozimej, z zastosowaniem klasycznej metody badań w stałej sieci punktów pomiarowych oraz innowacyjnych metod „on-the-go", które przeprowadzono w celu określenia przestrzennie zróżnicowanych dawek nawożenia pod pszenicę ozimą.

Metodyka badań

Badania prowadzono w SD IUNG-PIB w Baborówku (16°38'50 E, 52°34'50 N), w latach 2013-2015, na polu o łącznej powierzchni 78,5 ha. Obszar ten był podzielony na 3 pola płodozmienne o powierzchni: 19,7 ha, 19,7 ha i 31,1 ha, na których uprawiano kolejno rzepak ozimy, pszenicę ozimą i jęczmień jary (rys. 1). Wydzielono ponadto pole o pow. 8 ha pod uprawę kukurydzy. Wszystkie zabiegi agrotechniczne, łącznie z nawożeniem, stosowane były jednolicie na powierzchni pól, odpowiednio dla uprawianych roślin. Badania prowadzono dwoma sposobami: w siatce stałych punktów pomiarowych oraz metodą pomiarów ciągłych bezpośrednio w polu.

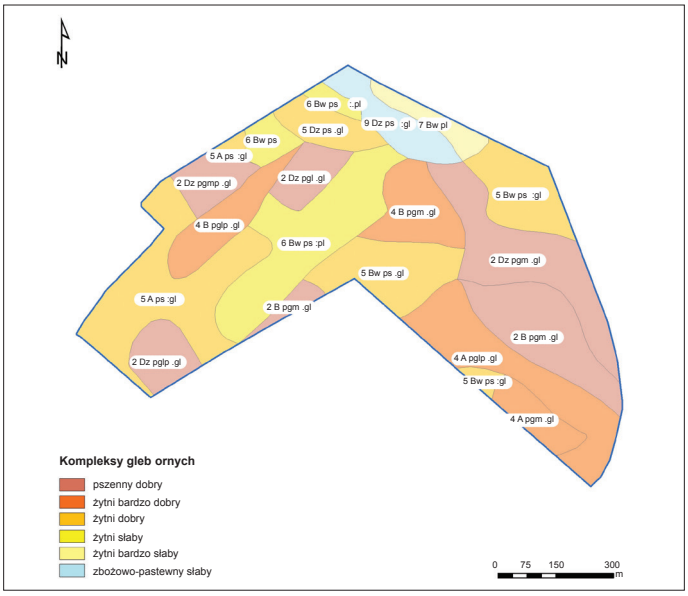


Rys. 1. Układ pól płodozmiennych

Źródło: opracowanie własne

Wyniki badań

Podstawowego rozpoznania warunków glebowych dokonano z wykorzystaniem mapy glebowo-rolniczej, która wykazała bardzo duże zróżnicowanie w obrębie pola (rys. 2). Stwierdzono, że występują tu gleby płowe (A), brunatne (B), brunatne wyługowane (Bw) i czarne ziemie (Dz), należące do kompleksu pszennego dobrego (2), żytniego bardzo dobrego, żytniego dobrego i żytniego słabego (4, 5, 6), a także zbożowo-pastewnego słabego (9). Są to gleby o składzie granulometrycznym piasku gliniastego mocnego (pgm), piasku gliniastego mocnego pylastego (pgmp), piasku słabo gliniastego (ps), piasku gliniastego lekkiego (pgl) i piasku gliniastego lekkiego pylastego (pglp).



Rys. 2. Mapa glebowo-rolnicza

Źródło: opracowanie własne

Obserwacje i pomiary w punktach siatki geostatystycznej

Badania w punktach siatki geostatystycznej prowadzono metodą obserwacji naukowych. Zgodnie z tą metodą, na całym polu rozmieszczono 154 punkty pomiarowe, w których wykonywano szczegółowe obserwacje i pomiary właściwości gleby oraz łanu roślin i plonu pszenicy ozimej (rys. 1). Punkty te znajdowały się w wierzchołkach geostatystycznej siatki kwadratów o boku 72 m, a ich położenie dodatkowo opisano współrzędnymi geograficznymi.

Analizy gleby

We wszystkich punktach pomiarowych, jesienią 2014 roku, pobrano próbki gleby z warstwy 0-20 cm i określono jej właściwości agrochemiczne, tj. skład granulometryczny metodą laserową (Z-d Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów IUNG-PIB), odczyn pH w 1 M KCl oraz zawartość podstawowych makroelementów (K_2O, P_2O_5, Mg, C_{org}) dwoma metodami: dotychczas stosowanymi metodami chemicznymi w GLACH IUNG-PIB w Puławach oraz za pomocą spektrofotometru VIS-NIR w laboratorium Z-du Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów IUNG-PIB.

Analiza chemiczna próbek gleby wykazała średnią wartość pH 5,6, co pozwoliło zaliczyć ją do gleb lekko kwaśnych, wysoką zawartość P_2O_5, bardzo wysoką zawartość K_2O, wysoką zawartość Mg oraz niską, jak na warunki europejskie (wg European Soil Base) lub średnią – według klasyfikacji polskiej – zawartość próchnicy (tab. 1).

Analiza składu granulometrycznego metodą laserową wykazała ok. 10-procentową średnią zawartość części spławialnych. Oznacza to, że glebę całego pola należy zaliczyć do kategorii gleb bardzo lekkich, przy czym zmienność tego parametru była bardzo duża, gdyż współczynnik zmienności wynosił ok. 50% (tab. 1).

Tabela 1

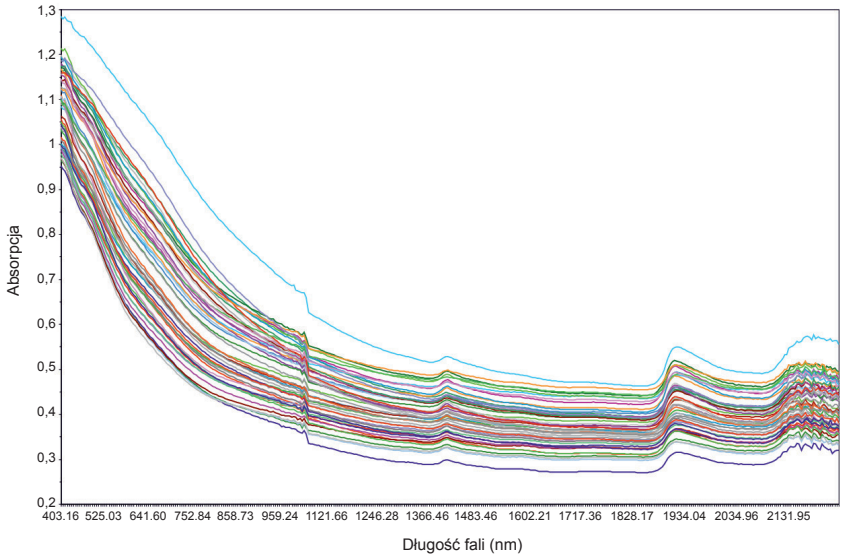
Właściwości fizykochemiczne gleb oznaczone metodami chemicznymi oraz skład granulometryczny określony metodą laserową w punktach pomiarowych

Charakterystyka statystyczna	Właściwości agrochemiczne					Frakcje glebowe (mm)		
	pH	P_2O_5	K_2O	Mg	C_{org}	piasek (2.0-0,1)	pył (0,1-0,02)	cz. spław. (<0,02)
		mg 100 g^{-1} gleby				%		
Liczebność	154							
Średnia	5,6	16,0	22,7	6,07	1,10	69,3	20,9	9,7
Mediana	5,7	14,0	20,5	5,10	1,07	67,4	22,0	10,0
Odchylenie standardowe	0,89	9,71	9,17	3,82	0,28	10,8	6,13	4,9
Współczynnik zmienności	15,7	60,5	40,3	63,0	25,0	15,6	29,3	50,3
Minimum	3,6	4,3	6,0	0,4	0,6	45,3	8,3	1,7
Maksimum	7,6	67,3	46,9	19,9	2,09	90,0	35,1	22,7

Źródło: opracowanie własne

Spektrometria bliskiej podczerwieni VIS-NIRS korzysta z długości fal w przedziale od 350 do 2500 nm. Absorpcji promieniowania podczerwonego towarzyszą zmiany energii oscylacyjnej cząsteczek. Ponieważ energia ta jest skwantowana, absorbowane jest tylko promieniowanie o pewnych określonych energiach, charakterystycznych dla grup funkcyjnych wykonujących drgania (tj. O-H, C-H, N-H, S-H, C=O).

Ilość promieniowania, która jest absorbowana, określona jest przez właściwości i ilość wiązań obecnych w badanym materiale. Stąd widma w zakresie bliskiej podczerwieni zawierają szczegółowe informacje na temat składu chemicznego badanych substancji. Oprócz składu chemicznego materiału, na właściwości spektralne ma również wpływ fizyczna struktura materiału. Rozmiar i kształt cząstek oraz puste przestrzenie pomiędzy cząstkami wpływają na długość transmisji światła przechodzącego przez próbkę, jak również na współczynnik odbicia. Widma glebowe w zakresie bliskiej podczerwieni NIR zależą również od wilgotności badanego materiału (silna absorpcja przy 1450 nm i 1930 nm). Są one bardzo złożone i niezwykle trudne do jednoznacznej identyfikacji (rys. 3).



Rys. 3. Widma spektralne badanych gleb (154 próbki)
Źródło: opracowanie własne

Uzyskane widma wykorzystywano do szacowania właściwości fizykochemicznych gleb za pomocą uzyskanych modeli predykcyjnych. Wszystkie modele zbudowano klasyczną metodą z wykorzystaniem losowo wybranych 2/3, tj. 100, próbek do kalibracji i 1/3, tj. 54, próbek do walidacji. Zastosowano także metodę opisaną przez D e b a e n e i i n . (4) z wykorzystaniem 20%, tj. 31, próbek do kalibracji i 123 próbek do walidacji. Próbki do kalibracji wybierano na podstawie algorytmu K-means analizy skupień opisanego w tej publikacji. Taka predykcja właściwości gleby z zastosowaniem technologii VIS-NIR umożliwia redukcję kosztów analiz laboratoryjnych o ok. 80%.

Wyniki analizy PLS wykazały, że najlepsze modele predykcyjne otrzymano dla zawartości węgla organicznego C_{org} i frakcji iłu koloidalnego (tab. 2). Dla pozostałych właściwości gleby uzyskano nieco mniejsze wartości predykcyjne modeli.

Tabela 2

Wyniki analizy modeli cząstkowych najmniejszych kwadratów (PLS)

Właściwości gleby	Na podstawie 100 próbek kalibracyjnych		Na podstawie 31 próbek kalibracyjnych	
	R^2	RMSEP	R^2	RMSEP
P_2O_5	0,65	5,13	0,65	5,26
K_2O	0,70	1,83	0,69	1,87
Mg	0,71	0,45	0,70	0,47
C_{org}	0,74	0,08	0,72	0,08
Ił koloidalny	0,81	0,23	0,80	0,27
pH	0,66	0,78	0,62	0,80

Źródło: opracowanie własne

Charakterystykę statystyczną zmienności w obrębie pola tak oszacowanych właściwości fizykochemicznych gleb zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3

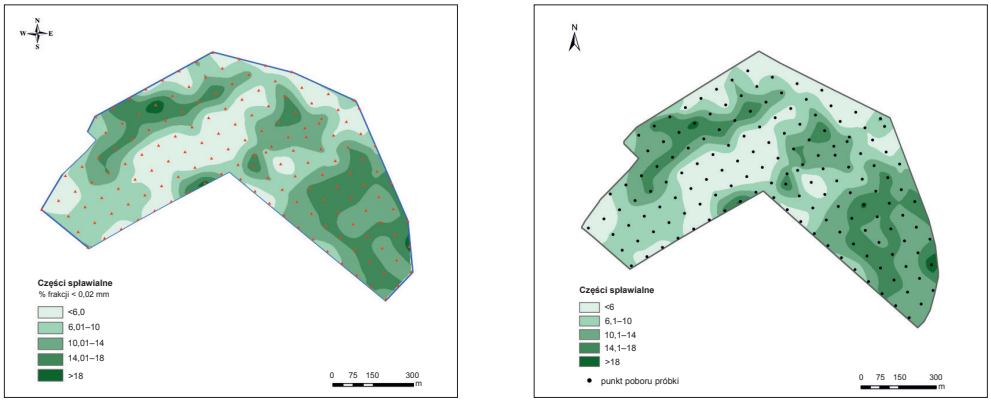
Właściwości fizykochemiczne gleb oraz skład granulometryczny oznaczane za pomocą spektrofotometru VIS-NIR w punktach pomiarowych

Miara statystyczna	Właściwości agrochemiczne					Frakcje glebowe (mm)		
	pH	P_2O_5	K_2O	Mg	C_{org}	piasek (2,0-0,1)	pył (0,1-0,02)	cz. spław. (<0,02)
		mg 100 g^{-1} gleby			%			
Liczebność	154							
Średnia	5,7	15,8	22,9	6,01	1,07	1,07	67,6	19,8
Mediana	5,7	13,8	21,5	4,92	1,08	1,08	67,2	20,4
Odchylenie standardowe	1,1	10,2	9,51	4,10	0,42	0,42	12,2	6,74
Współczynnik zmienności	19,5	64,9	41,5	68,3	39,5	39,5	18,0	34,0
Minimum	3,3	1,80	1,90	1,20	0,03	0,03	39,7	6,68
Maksimum	8,2	73,1	51,9	20,6	2,28	2,28	94,3	35,4

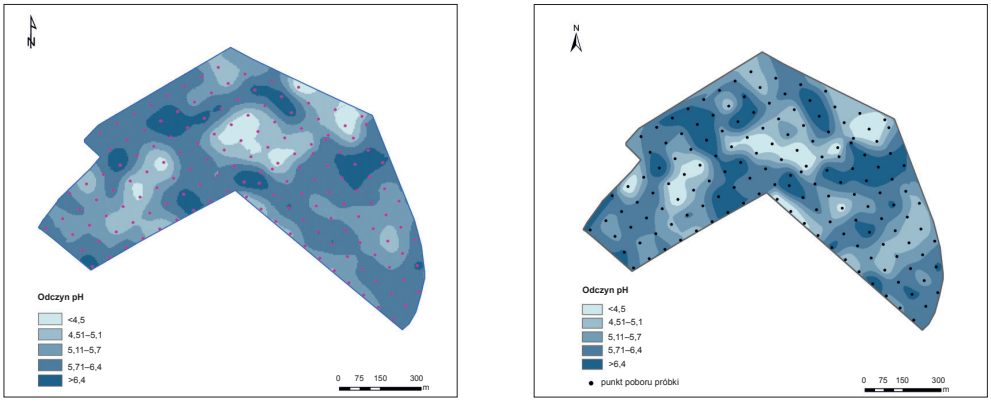
Źródło: opracowanie własne

Wyniki badań właściwości fizykochemicznych gleb uzyskane metodami chemicznymi oraz z zastosowaniem spektrofotometru VIS-NIR są w dużym stopniu zbieżne (por. tab. 1 i tab. 3). Na kolejnych stronach przedstawiono porównanie map właściwości gleb oznaczonych metodami: chemicznymi i metodą laserową (zawartość części spławialnych) oraz za pomocą spektrofotometru VIS-NIR (rys. 4).

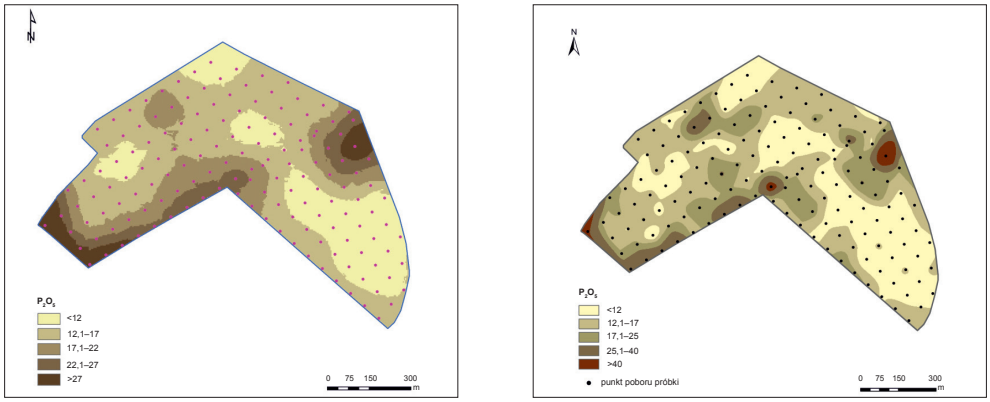
Metody tradycyjne **Spektrofotometr VIS-NIR**



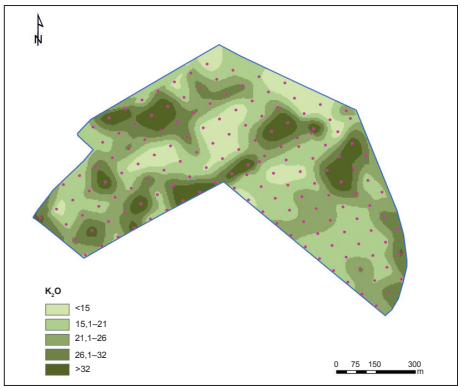
Zawartość części spławialnych (%)

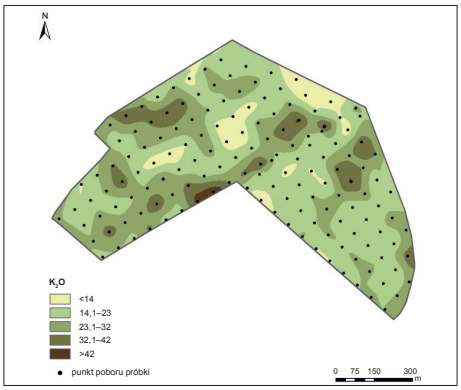


Odczyn (pH w 1 M KCl)

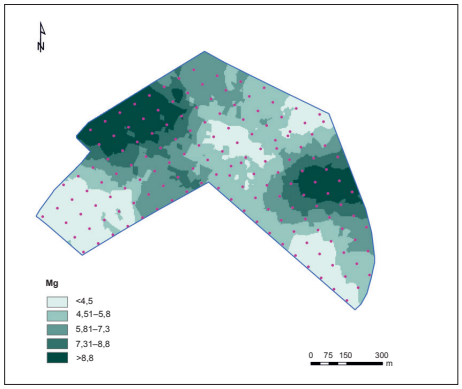


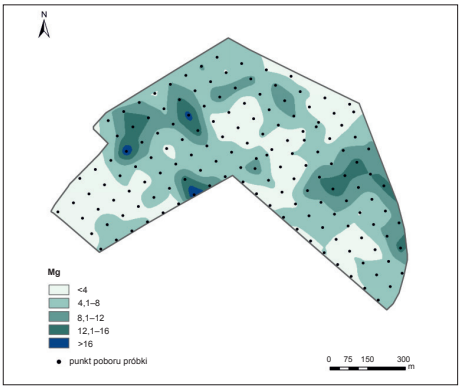
Zawartość P_2O_5 (mg 100 g^{-1} gleby)



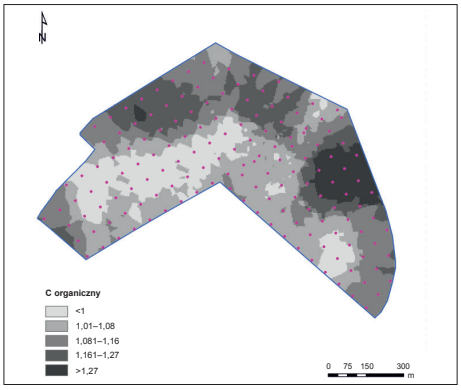


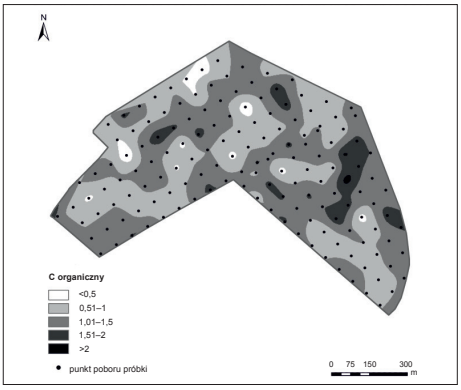
Zawartość K_2O (mg 100 g^{-1} gleby)





Zawartość Mg (mg 100 g^{-1} gleby)





Zawartość C_{org} (%)

Rys. 4. Mapy zawartości części spławialnych oraz właściwości agrochemicznych gleb w stałych punktach siatki geostatystycznej, wygenerowane na podstawie oznaczeń metodami chemicznymi i za pomocą spektrofotometru VIS-NIR w warunkach laboratoryjnych

Źródło: opracowanie własne

Pomiary łanu w okresie wegetacji

W rolnictwie precyzyjnym do charakteryzowania właściwości łanu roślin wykorzystuje się znajomość proporcji i wzajemnych zależności między ilością światła pochłanianego (lub odbitego) przez rośliny przy różnych długościach fal. Uzyskany wynik wyrażany jest za pomocą wskaźników roślinności.

W polach pszenicy ozimej, tj. w latach 2013 (pole nr 5), 2014 (pole nr 7) i 2015 (pole nr 6), dwukrotnie w okresie wegetacji, tj. w fazie strzelania w źdźbło (BBCH 32) i w fazie widocznego liścia flagowego (BBCH 39), wykonywano ocenę stanu roślin na podstawie pomiarów indeksu SPAD za pomocą przyrządu Hydro N-tester SPAD 502, indeksu LAI – LI-2000 oraz wskaźnika NDVI – SpectroSense2.

Przyrząd Hydro N-Tester SPAD-502 mierzy różnice w absorpcji światła przez liść przy długości fali 650 i 940 nm (fot. 1). Iloraz tych różnic stanowi indeks zieloności liścia. Długość fali 650 nm jest zbliżona do maksymalnej absorpcji światła przez chlorofil a (680 nm) i chlorofil b (660 nm), natomiast 940 nm to promieniowanie w zakresie bliskiej podczerwieni, którego absorpcja przez liść jest bardzo niewielka i wynosi ok. 10%. Końcowy wynik pomiarów stanowi średnią z 30 prawidłowych pojedynczych pomiarów, dokonywanych na kolejnych, w pełni rozwiniętych liściach. Wynik podawany jest w jednostkach zwanych jednostkami SPAD (*Soil-Plant Analysis Development*).

Instrument LI-2000 firmy Li-Cor Inc. (fot. 2) służy do pomiaru indeksu powierzchni liści LAI, tzn. stosunku powierzchni liści do powierzchni gleby. Przyrząd wyposażony jest w sensor, złożony z pięciu pierścieni, z których każdy rejestruje promieniowanie świetlne w określonym przedziale kąta zenitalnego. Dane z poszczególnych pierścieni oraz pomiaru kalibracyjnego są podstawą do obliczeń indeksu LAI.



Fot. 1. Hydro N-Tester SPAD-502

Źródło: Zasoby Z-du Żywienia Roślin i Nawożenia IUNG-PIB



Fot. 2. LI-2000

Źródło: Mikołowicz P.

Instrument SpectroSense2 (fot. 3) służy do pomiaru wskaźnika NDVI. Dzięki systemowi wymiennych sensorów przystosowanych do różnych zakresów promieniowania, urządzenie ma możliwość wykonywania pomiarów charakterystyk promieniowania w szerokim zakresie częstotliwości. Zestaw do pomiaru wskaźnika NDVI wyposażony jest w dwa sensory, z których każdy rejestruje promieniowanie o długościach fali 650 nm i 800 nm. Jeden z nich działa jako sensor referencyjny, mierząc całość promieniowania docierającego do roślin, a drugi mierzy promieniowanie odbite od roślin. Szerokość pasm w powyższych sensorach wynosi ±10 nm.



Fot. 3. SpectroSense2 w zestawie przystosowanym do pomiarów NDVI
Źródło: www.skyeinstruments.info (13)

Urządzenie umożliwia szybkie i proste wykonywanie pomiarów. Wartości wskaźnika NDVI wyświetlane są na ekranie, a zapis danych odbywa się za pomocą jednego przycisku. Urządzenie nie posiada jednak własnego źródła światła i dlatego może być wrażliwe na zmiany natężenia promieniowania oraz kąt padania promieni słonecznych. Dokładne ustawienie sensorów względem łanu roślin jest możliwe dzięki teleskopowej lancy z poziomicą.

Zróżnicowanie wskaźników stanu roślin pszenicy ozimej w okresie wegetacji zależało od roku i pola, na którym była uprawiana oraz od fazy rozwojowej, w której wykonywano pomiar (tab. 4, 5, 6). Spośród wskaźników stanu roślin pszenicy ozimej w okresie wegetacji najbardziej zróżnicowany był indeks LAI, a najmniej wskaźnik NDVI. Największe zróżnicowanie obu wskaźników stwierdzono w polu nr 6 (2015 r.), gdzie w przypadku indeksu LAI wynosiło ono ok. 35% w fazie strzelania w źdźbło i ok. 29% w fazie liścia flagowego, a dla NDVI wahało się odpowiednio od ok. 9% do 4%. Zmienność indeksu LAI w pozostałych polach (nr 5 i 7) utrzymywała się na poziomie od ok. 25-22% do 22-26%, a wskaźnika NDVI wahała się od 6-4,5% do 9-4%.

Zróżnicowanie indeksu SPAD, charakteryzującego stan zieloności liścia związanego ze stanem odżywienia azotem, było stosunkowo niewielkie. W fazie strzelania

w źdźbło wahało się od ok. 6,4% w polu nr 7 (2014 r.) do ok. 11% w pozostałych polach, a w fazie liścia flagowego od ok. 7% w polu nr 6 (2015 r.) do ok. 8% w polach nr 5 (2013 r.) i 7 (2014 r.).

Tabela 4

Charakterystyka statystyczna parametrów stanu łanu pszenicy ozimej w okresie wegetacji w punktach pomiarowych pola nr 5 w roku 2013 (19,7 ha)

Miara statystyczna	SPAD		LAI		NDVI	
	Faza rozwojowa					
	BBCH 32*	BBCH 39**	BBCH 32	BBCH 39	BBCH 32	BBCH 39
Liczebność	38					
Średnia	590	589	3,10	4,47	0,88	0,89
Mediana	609	596	3,17	4,53	0,89	0,90
Odchylenie standardowe	63,8	48,5	0,77	1,02	0,05	0,04
Współczynnik zmienności	10,8	8,24	24,9	22,7	5,72	4,45
Minimum	426	485	1,74	2,17	0,62	0,72
Maksimum	664	662	4,21	6,28	0,92	0,94

*Faza strzelania w źdźbło; **Faza widoczny liść flagowy
Źródło: opracowanie własne

Tabela 5

Charakterystyka statystyczna parametrów stanu łanu pszenicy ozimej w okresie wegetacji w punktach pomiarowych pola nr 6 w roku 2015 (19,7 ha)

Miara statystyczna	SPAD		LAI		NDVI	
	Faza rozwojowa					
	BBCH 32*	BBCH 39**	BBCH 32	BBCH 39	BBCH 32	BBCH 39
Liczebność	38					
Średnia	628	682	4,39	5,79	0,86	0,89
Mediana	636	683	4,51	5,37	0,87	0,91
Odchylenie standardowe	70,2	48,0	1,53	1,67	0,08	0,04
Współczynnik zmienności	11,2	7,04	34,8	28,8	9,22	4,25
Minimum	472	566	2,16	2,74	0,68	0,80
Maksimum	729	782	7,27	9,50	0,99	0,94

*Faza strzelania w źdźbło; **Faza widoczny liść flagowy
Źródło: opracowanie własne

Tabela 6

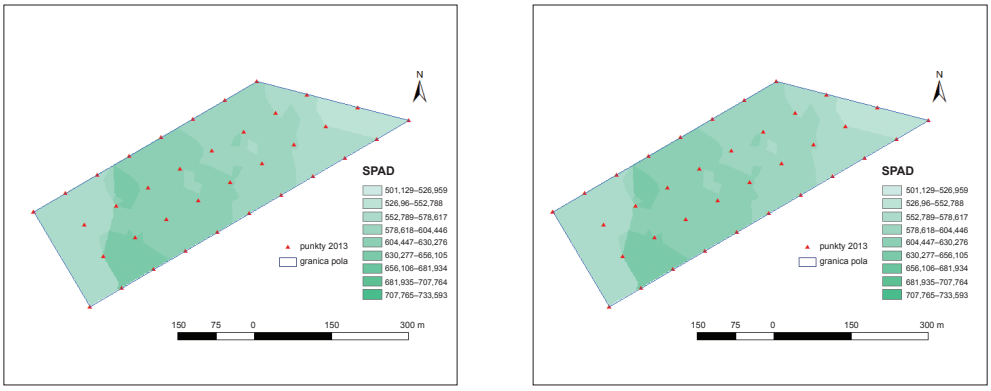
Charakterystyka statystyczna parametrów stanu łanu pszenicy ozimej w okresie wegetacji w punktach pomiarowych pola nr 7 w roku 2014 (31,1 ha)

Miara statystyczna	SPAD		LAI		NDVI	
	Faza rozwojowa					
	BBCH 32*	BBCH 39**	BBCH 32	BBCH 39	BBCH 32	BBCH 39
Liczebność	60					
Średnia	603	617	2,85	3,79	0,79	0,88
Mediana	602	614	2,72	3,59	0,81	0,89
Odchylenie standardowe	38,8	46,7	0,64	0,97	0,07	0,03
Współczynnik zmienności	6,44	7,57	22,4	25,6	8,57	3,85
Minimum	465	485	1,79	2,26	0,64	0,72
Maksimum	705	745	4,79	6,63	0,90	0,94

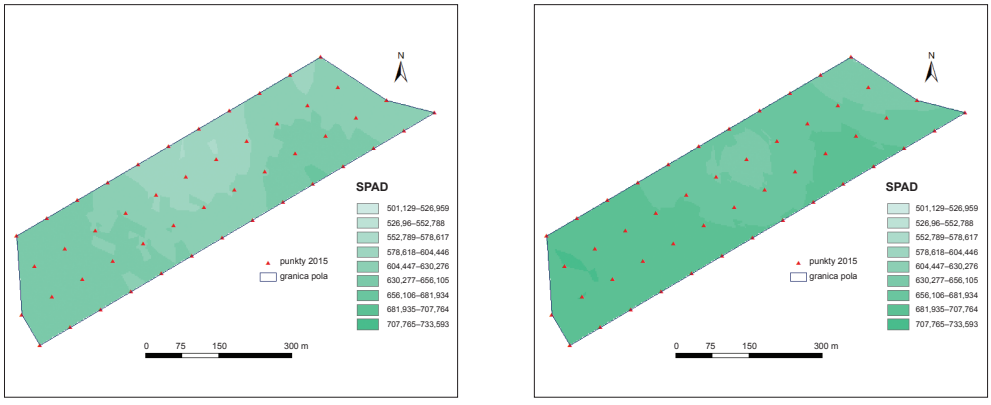
*Faza strzelania w źdźbło; **Faza widoczny liść flagowy
Źródło: opracowanie własne

Na podstawie punktowych pomiarów łanu pszenicy ozimej w okresie wegetacji wygenerowano odpowiednie mapy stanu roślin (rys. 5-7).

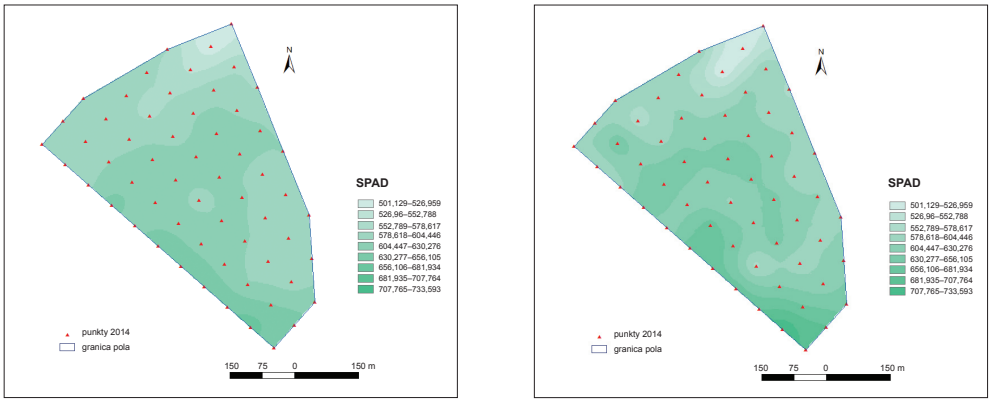
Faza strzelania w źdźbło (BBCH 32) **Faza widoczny liść flagowy (BBCH 39)**



Pole nr 5 (2013 r.)



Pole nr 6 (2015 r.)

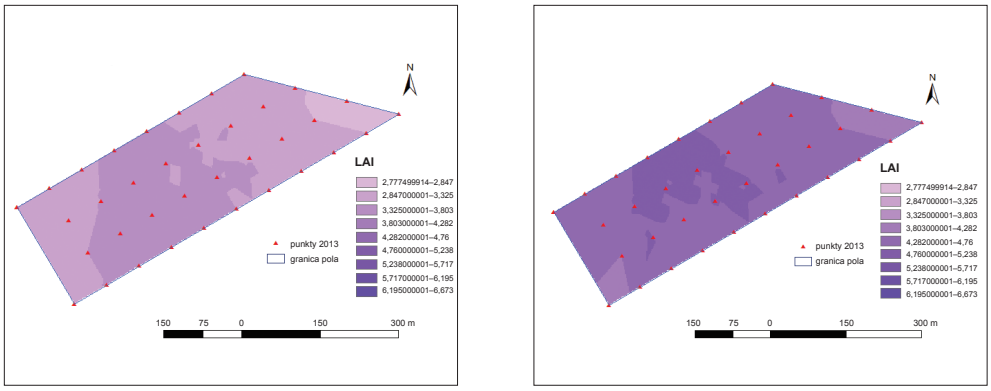


Pole nr 7 (2014 r.)

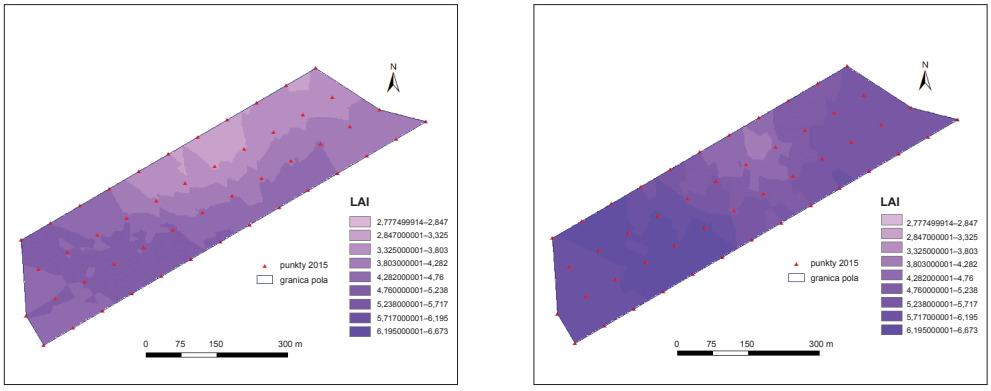
Rys. 5. Mapy SPAD w punktach siatki geostatystycznej

Źródło: opracowanie własne

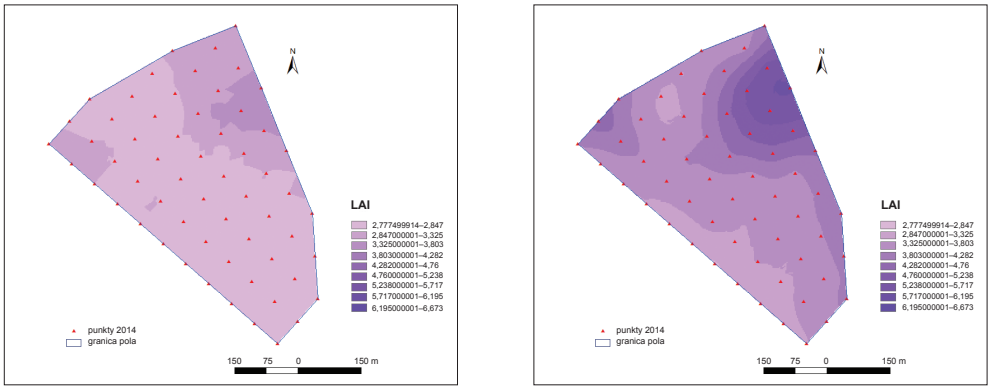
Faza strzelania w źdźbło (BBCH 32) **Faza widoczny liść flagowy (BBCH 39)**



Pole nr 5 (2013 r.)



Pole nr 6 (2015 r.)

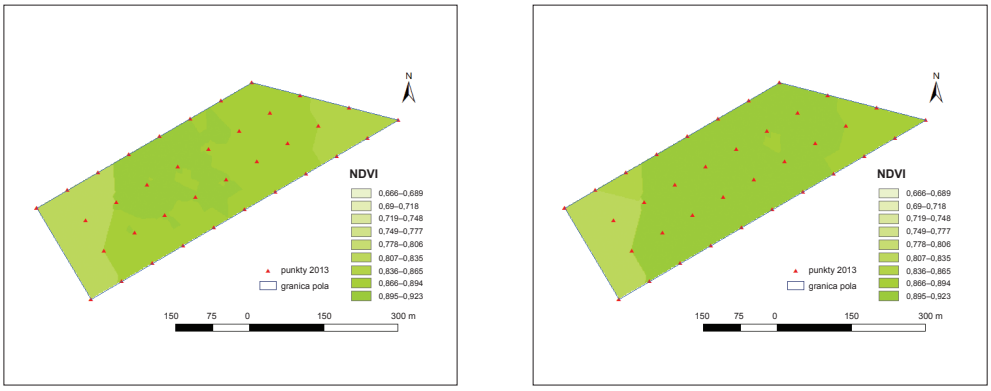


Pole nr 7 (2014 r.)

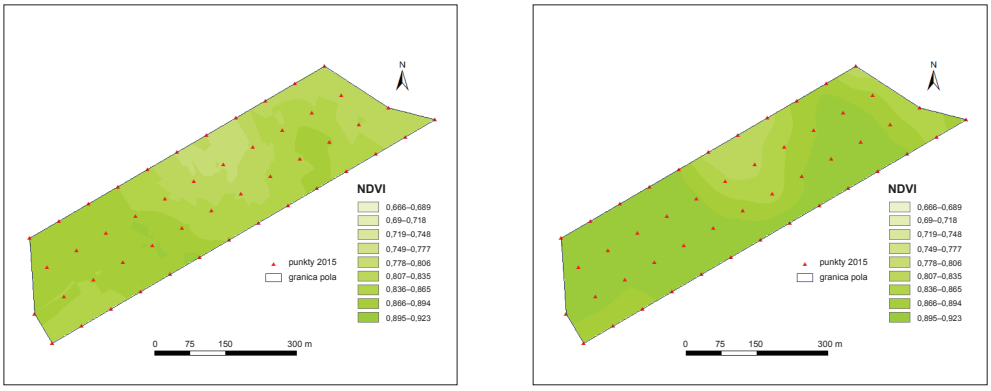
Rys. 6. Mapy LAI w punktach siatki geostatystycznej

Źródło: opracowanie własne

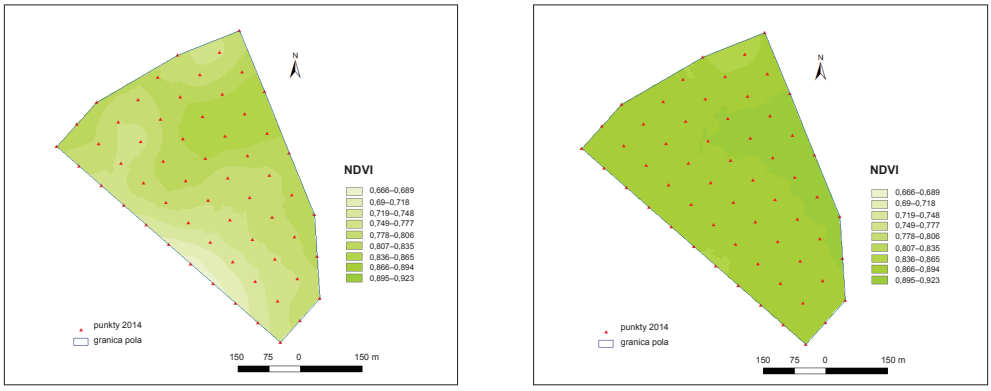
Faza strzelania w źdźbło (BBCH 32) **Faza widoczny liść flagowy (BBCH 39)**



Pole nr 5 (2013 r.)



Pole nr 6 (2015 r.)



Pole nr 7 (2014 r.)

Rys. 7. Mapy NDVI w punktach siatki geostatystycznej

Źródło: opracowanie własne

Plon ziarna pszenicy ozimej

Po zbiorze roślin z powierzchni 1 m^2, w każdym punkcie siatki geostatystycznej określono plon ziarna w g z 1m^2 przy 15% wilgotności, a następnie wykonano odpowiednie mapy.

Przestrzenna zmienność plonu pszenicy ozimej była różna zależnie od pola (tab. 7). Największe zróżnicowanie (28,4%) stwierdzono w polu nr 6 w 2015 r. Mniejsze zróżnicowanie (19,4%) wystąpiło w polu nr 5 w roku 2013, a najmniejsze (12,4%) w polu nr 7 w roku 2014.

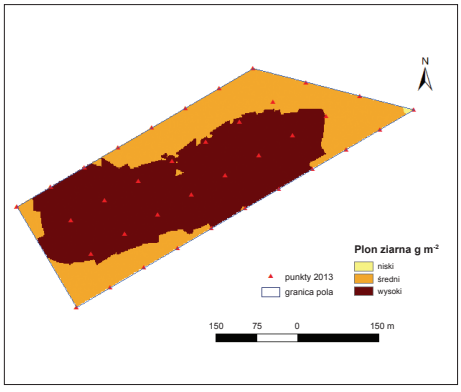
Tabela 7

Charakterystyka statystyczna plonu ziarna pszenicy ozimej w punktach pomiarowych pól płodozmiennych

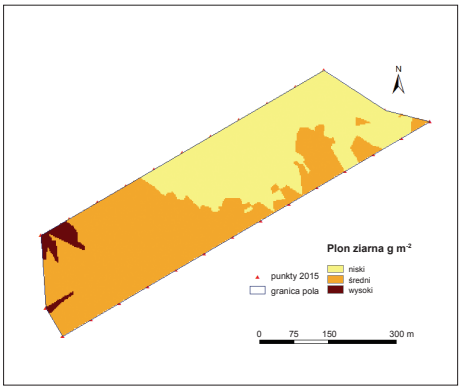
Miara statystyczna	Plon ziarna (g m^{-2})		
Nr pola (rok zbioru)	5 (2013)	6 (2015)	7 (2014)
Liczebność	38	38	60
Średnia	562	504	625
Mediana	581	463	631
Odchylenie standardowe	109	143	77,4
Współczynnik zmienności	19,4	28,4	12,4
Minimum	273	278	442
Maksimum	751	800	753

Źródło: opracowanie własne

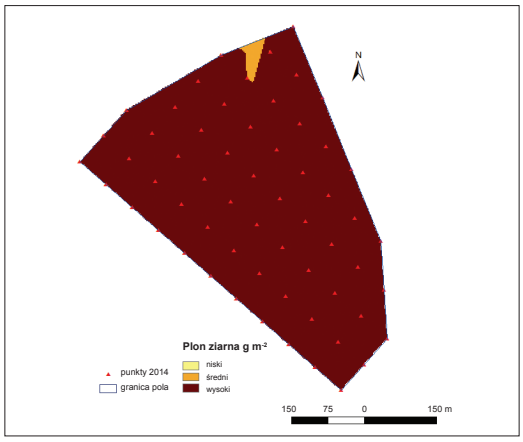
Opisaną wyżej zmienność plonu ziarna pszenicy ozimej w polach płodozmiennych zobrazowano w formie map na rys. 8.



Pole nr 5 (2013 r.)



Pole nr 6 (2015 r.)



Pole nr 7 (2014 r.)

Rys. 8. Mapy plonów ziarna (g m^{-2}) pszenicy ozimej w latach 2013-2015

Źródło: opracowanie własne

Pomiary przestrzennej zmienności pola metodami „on-the-go”

Pomiary ciągłe gleby z zastosowaniem spektrofotometru VIS-NIR

Zastosowanie w badaniach spektrofotometru bliskiej podczerwieni NIR oraz światła widzialnego VIS umożliwia pomiary spektralne gleb w celu określenia m.in. odczynu gleb niektórych makroelementów oraz zawartości węgla organicznego (5).

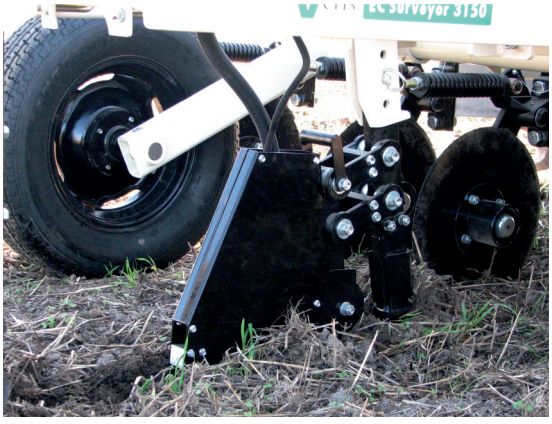
System pomiarowy Veris składa się ze spektrofotometru oraz platformy jezdnej, mocowanej do ciągnika (fot. 4). Głównym elementem umożliwiającym pomiary spektralne jest specjalnie skonstruowany lemiesz, w którym znajduje się lampa halogenowa jako źródło światła (fot. 5). Podczas jazdy lemiesz zagłębia się na głębokość ok. 5-7 cm. Dzięki temu pomiar wykonywany jest w warstwie powierzchniowej gleby.

Lampa oświetla powierzchnię gleby, a światło, które odbija się od gleby poprzez przewody światłowodowe, pada na detektory umieszczone w spektrofotometrze. Spektrofotometr mierzy ilość światła odbitego oraz absorbowanego przez glebę.





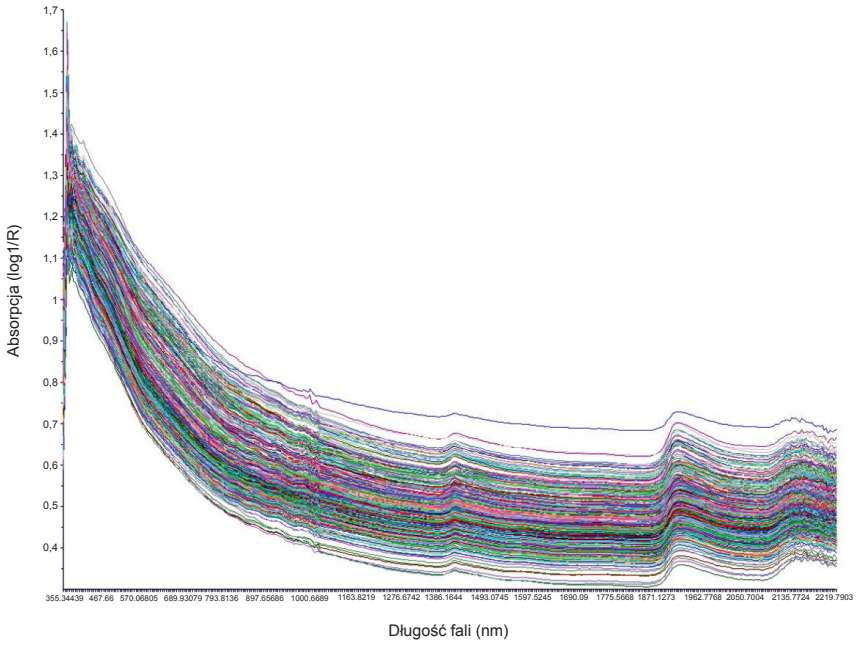
Fot. 4. Pomiar właściwości spektralnych gleb systemem Veris (spektrofotometr VIS-NIR)
Veris Technologies, Inc. 601 N. Broadway Salina KS 67401
Źródło: Pecio A.



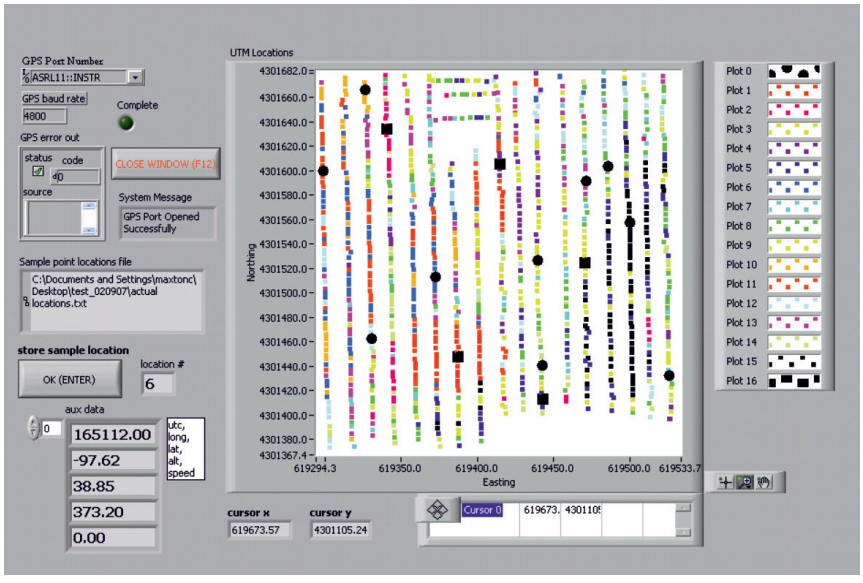
Fot. 5. Lemiesz z umieszczoną wewnątrz lampą halogenową podczas pomiarów spektralnych
Źródło: Pecio A.

Zakres pomiarowy spektrofotometru Veris wynosi od 350 do 2200 nm. W każdej sekundzie system Veris rejestruje 20 widm glebowych, a każde zawiera 386 pomiarów gleby (rys. 9). Z tego powodu do obróbki takiej ilości danych spektralnych wymagana jest, oprócz specjalistycznego oprogramowania chemometrycznego, bardzo duża moc obliczeniowa komputera zbierającego i przetwarzającego te dane.

Oprogramowanie systemu Veris (Spectrophotometer Software V1.69.) umożliwia wstępne gromadzenie i przetwarzanie danych spektralnych, a także wskazuje lokalizację miejsc na polu do poboru próbek glebowych do kalibracji (fot. 6). Wyniki analiz laboratoryjnych tych próbek mogą być następnie wykorzystane do kalibracji danych spektralnych badanych właściwości.

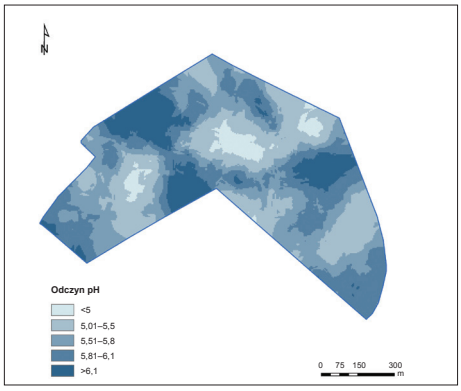


Rys. 9. Widma spektralne badanych gleb – [R – światło odbite]
Źródło: opracowanie własne

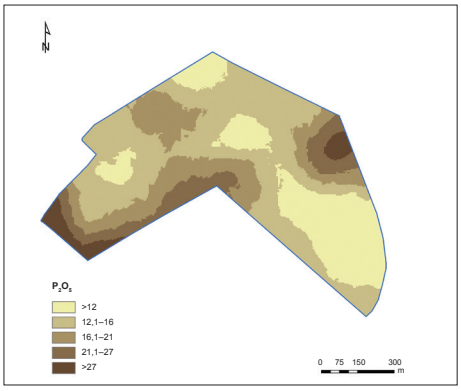


Fot. 6. Oprogramowanie Veris umożliwiajace lokalizację miejsc poboru próbek do kalibracji
Źródło: opracowanie własne (zrzut z ekranu)

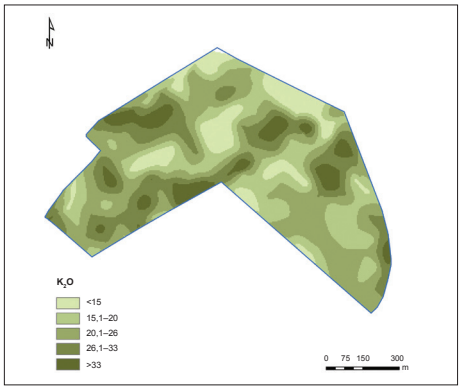
Spektrofotometr VIS-NIR umożliwia wykonywanie badań wielkoobszarowych w krótkim czasie. Ponadto, pomiary te są bezinwazyjne oraz tanie. Mogą być prowadzone przy okazji wykonywania innych zabiegów agrotechnicznych. Urządzenie współpracuje z GPS, co umożliwia sporządzanie cyfrowych map badanych właściwości gleby. Zaletą systemu Veris jest możliwość określenia wielu parametrów glebowych podczas jednego przejazdu. Dzięki zastosowaniu spektrofotometru NIR-VIS do badań przestrzennej zmienności różnych cech glebowych, możliwe jest znaczne obniżenie kosztów związanych z pobieraniem, a następnie analizowaniem próbek w laboratorium. Poniżej przedstawiono mapy zmienności pH, zasobności gleby w makroelementy i C_{org} (rys. 10).



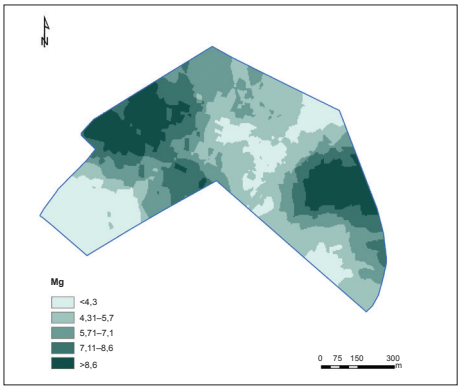
Odczyn (pH w 1 M KCl)



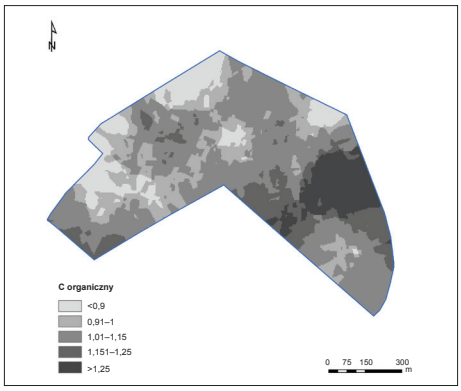
Zawartość P_2O_5 (mg 100 g^{-1} gleby)



Zawartość K_2O (mg 100 g^{-1} gleby)



Zawartość Mg (mg 100 g^{-1} gleby)



Zawartość C_{org} (%)

Rys. 10. Mapy pH oraz zawartości P_2O_5, K_2O, Mg i C_{org} w glebie wygenerowane na podstawie ciągłych pomiarów spektrofotometrem w polach płodozmiennych

Źródło: opracowanie własne

Pomiary ciągłe łanu za pomocą instrumentu GreenSeeker – wskaźnik NDVI

Pomiary ciągłe wskaźnika NDVI wykonywano za pomocą instrumentu GreenSeeker® Model 500/505, wyprodukowanego przez firmę NTech Industries Inc. przy współpracy z Uniwersytetem w Oklahoma (fot. 7). Urządzenie jest przystosowane do montażu na pojazdach i sprzęcie rolniczym (ciągnik, opryskiwacz itp.). W skład wyposażenia wchodzi specjalny pakiet oprogramowania umożliwiający tworzenie mapy przestrzennego rozkładu mierzonych wskaźników wegetacji oraz system doradztwa nawozowego opracowany przez naukowców z Oklahomy. Niezbędna jest również antena GPS.



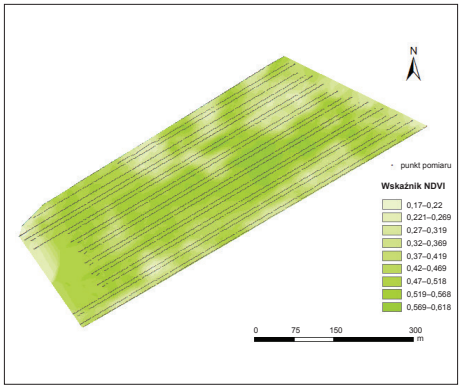


Fot. 7. GreenSeeker RT 200 (NTech, USA) podczas pomiarów „on-the-go”

Źródło: Niedźwiecki J., Mikołowicz P.

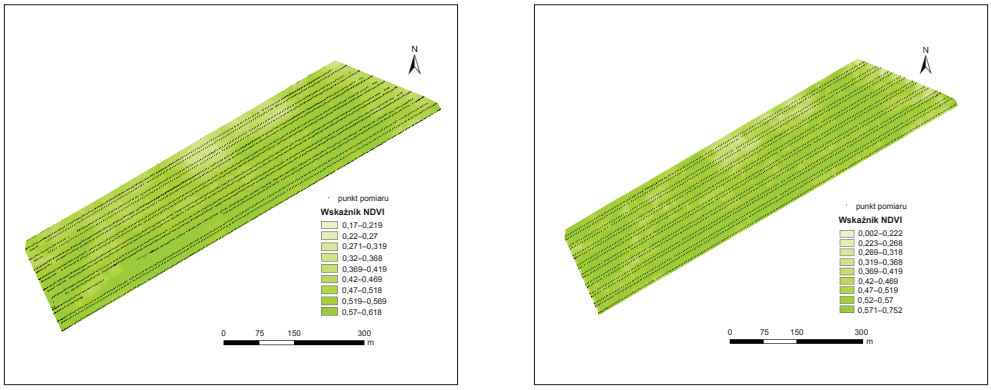
GreenSeeker jest tak zwanym „sensorem aktywnym", tzn. posiada własne źródło światła. Optyczno-elektroniczny układ emituje światło o dwóch długościach fal 656 nm i 770 nm. Wyemitowane światło, po odbiciu od określonej powierzchni, trafia do detektora, który analizuje jego charakterystykę. Zaletą takiego rozwiązania jest uniezależnienie się od naturalnego źródła światła, jakim jest słońce. Pomiary tym urządzeniem przeprowadzać można w każdych warunkach pogodowych, o każdej porze dnia i po zmierzchu, bez ryzyka popełnienia błędu. Ogromną zaletą urządzenia jest prostota obsługi. Zastosowanie komputera typu palmtop, wyposażonego w system operacyjny „Windows® Mobile" jako interfejsu komunikującego się z komputerem urządzenia oraz gromadzącego dane, powoduje, że obsługa jest bardzo intuicyjna. Dane zapisywane są w formacie plików tekstowych (txt), umożliwiających bezpośrednie przenoszenie do arkuszy kalkulacyjnych.

Uzyskane wyniki pomiarów NDVI posłużyły do wygenerowania map przestrzennej zmienności tego wskaźnika (rys. 10). Mapy przestrzennej zmienności indeksu NDVI wykonano dla pól produkcyjnych w kluczowych dla rozwoju pszenicy fazach fenologicznych: dla pola nr 5 (2013 r.) w fazie dojrzałości mlecznej (BBCH 73), a dla pól nr 7 (2014 r.) i nr 6 (2015 r.) w fazie strzelania w źdźbło (BBCH 32) i liścia flagowego (BBCH 39).

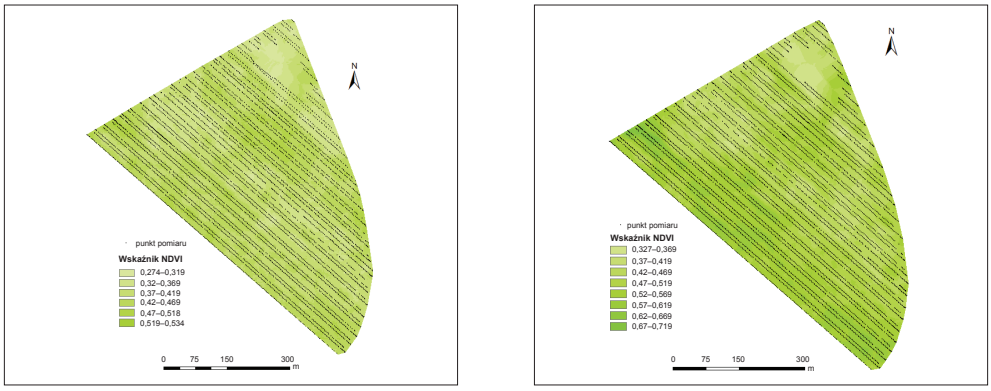


Pole nr 5 (2013 r.) – początek fazy dojrzałości mlecznej (BBCH 73)

Faza strzelania w źdźbło (BBCH 32) **Faza widoczny liść flagowy (BBCH 39)**



Pole nr 6 (2015 r.)



Pole nr 7 (2014 r.)

Rys. 10. Mapy NDVI wygenerowane na podstawie pomiarów instrumentem GreenSeeker umocowanym na ciągniku

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie uzyskanych map indeksu NDVI stwierdzono, że znacznie niższe wartości pokrywały się z obszarami występowania gleb najlżejszych.

Podsumowanie

Badania prowadzono na terenie specjalistycznej Stacji Doświadczalnej IUNG-PIB w Baborówku, koło Poznania, w latach 2013-2015, na polu o łącznej powierzchni ok. 78,5 ha. W pracy przedstawiono wyniki rozpoznania przestrzennego zróżnicowania właściwości gleby i łanu pszenicy ozimej, w tym plonu ziarna, z zastosowaniem klasycznej metody badań w stałej sieci 154 punktów pomiarowych oraz innowacyjnych metod „on-the-go". Rozpoznanie to przeprowadzono w celu określenia przestrzennie zróżnicowanych dawek nawożenia pod pszenicę ozimą.

Już wstępna analiza pola na podstawie mapy glebowo rolniczej wykazała bardzo duże zróżnicowanie gleb zarówno pod względem typologicznym, jak i granulometrycznym. Potwierdziła to analiza składu granulometrycznego wykonana metodą laserową, która wykazała ok. 10-procentową średnią zawartość części spławianych. Na tej podstawie glebę całego pola zaliczono do kategorii gleb bardzo lekkich, przy czym zmienność tego parametru wynosiła ok. 50%. Analizy gleb w punktach siatki wykazały średnią wartość pH 5,6, co pozwoliło zaliczyć ją do gleb lekko kwaśnych, wysoką zawartość P_2O_5, bardzo wysoką zawartość K_2O, wysoką zawartość Mg oraz niską zawartość próchnicy.

Średni plon ziarna pszenicy ozimej oznaczany w punktach pomiarowych kolejnych pól płodozmiennych w latach 2013-2015 wynosił ok. 560 g m^{-2} przy zmienności ok. 22%. Zmienność elementów plonu wahała się od ok. 10% dla MTZ do 25% dla plonu słomy z 1m^2. Zróżnicowanie wskaźników stanu roślin w okresie wegetacji wahało się od 5% do 10% dla NDVI, poprzez ok. 10% dla indeksu SPAD, do ponad 30% w przypadku indeksu LAI.

Opisaną zmienność zobrazowano w formie map. Stwierdzono, że w badaniach przestrzennej zmienności gleby oraz łanu w obrębie pola jednakowo przydatne są metody analizy w stałych punktach pomiarowych oraz pomiarów ciągłych. Bardzo duże zróżnicowanie właściwości gleb i roślin w obrębie badanego pola uzasadnia potrzebę różnicowania dawek nawożenia.

Literatura

1. Arslan D., Colvin T.: Grain yield mapping, yield sensing, yield reconstruction and errors. Precis. Agric., 2002, **3:** 135-154.
2. Chang C.W., Laird D.A.: Near-infrared reflectance spectroscopy analysis of soil C and N. Soil Sci., 2002, **167:** 110-116.
3. Christy C.D.: Real-time measurement of soil attributes using on-the-go near infrared reflectance spectroscopy. Comput. Electr. Agric., 2008, **61:** 10-19.
4. Debaene G., Niedźwiecki J., Pecio A., Żurek A.: Effect of the number of calibration samples on the prediction of several soil properties at the farm-scale. Geoderma, **2014-2015(2014):** 114-125.

5. Debaene G., Niedźwiecki J., Pecio A.: Reducing cost of soil mapping using VIS-NIRS technology. International Conference on "Protection of soil functions – challenges for the future", 15th-18th October 2013, Pulawy, Poland, 21-23.
6. Debaene G., Niedźwiecki J., Pecio A.: Visible and Near-infrared spectrophotometer for soil analysis: preliminary results. Pol. J. Agron., 2010, **3:** 3-9.
7. Fotyma M., Pecio A.: Przestrzenna zmienność żyzności i produktywności gleby w obrębie pola produkcyjnego. Nawozy i Nawożenie/Fertilizers and Fertilization, 2010, **41:** 26-42.
8. Jadczyszyn T.: Ustalanie dawek nawozów P, K, Mg w rolnictwie precyzyjnym. Nawozy i Nawożenie/Fertilizers and Fertilization, 2010, **41:** 43-50.
9. Lesch S.M., Corwin D.L., Robinson D.A.: Apparent soil electrical conductivity mapping as an agricultural management tool in arid zone soils. Comput. Electr. Agric., 2005, **46:** 351-378.
10. Mistele B., Gutser R., Schmidhalter U.: Validation of field-scaled spectral measurements of the nitrogen status in winter wheat. [In:] Programme book of the 7th International Conference on Precision Agriculture. 25-28 July 2004, Minneapolis, MN, USA, 1187-1195.
11. Niedźwiecki J., Debaene G., Pecio A.: Klasyczne i zaawansowane metody badania przestrzennego zróżnicowania żyzności gleby i łanu roślin. Studia i Raporty IUNG-PIB, Puławy, 2015, **42(16):** 69-90.
12. Sudduth K.A., Hummel J.W., Birrell S.J.: Sensors for site-specific management. [In:] Pierce F.J., Sadler E.J. (red.), The State of Site-Specific Management for Agriculture. ASA/CSSA/SSSA, Madison, WI, 1997, 183-210.
13. www.skyeinstruments.info

Adres do korespondencji:

prof. dr hab. Alicja Pecio
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. 81 47 86 834
e-mail: Alicja.Pecio@iung.pulawy.pl