

EWA STANISŁAWSKA-GLUBIAK ^{1*}, JOLANTA KORZENIOWSKA ¹, WOJCIECH LIPIŃSKI ²
¹ *Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy w Puławach,
 Zakład Herbologii i Technik Uprawy Roli we Wrocławiu,
 ul. Orzechowa 61, 50-540 Wrocław, Poland*
² *Krajowa Stacja Chemiczno-Rolnicza w Warszawie
 ul. Żółkiewskiego 17, 05-075 Warszawa-Wesola, Poland*

Opracowanie liczb granicznych niedoboru mikroelementów w glebie oznaczanych przy użyciu ekstrahenta Mehlich 3 dla polskich warunków glebowych. Część II. Rzepak

Streszczenie: Celem pracy było opracowanie liczb granicznych niskiej zawartości mikroelementów w glebie, oznaczanych przy użyciu ekstrahenta Mehlich 3 (M3), przeznaczonych do oceny ich niedoborów w uprawach rzepaku. Liczby zostały opracowane na podstawie zbioru danych dotyczących 1944 pól rzepaku, obejmujących teren całego kraju. W roku 2017 próbownicy okręgowych stacji chemiczno-rolniczych pobrali próbki gleby i odpowiadające im próbki roślinne w fazie BBCH 30/31. W próbkach roślinnych oznaczono zawartość mikroelementów, a w próbkach glebowych oprócz mikroelementów również pH, skład granulometryczny oraz zawartość węgla organicznego i przyswajalnego fosforu. Ponadto dla każdego pola zebrano dane odnośnie plonu nasion rzepaku. Liczby graniczne wyznaczono dwiema niezależnymi metodami: 1) metodą równań regresji oraz 2) tzw. metodą wysokich plonów. W pierwszym przypadku graniczną zawartość mikroelementu w glebie wyliczono z równania opisującego zależność pomiędzy współczynnikiem bioakumulacji R/G a określoną cechą gleby (n=1944). Współczynnik bioakumulacji jest ilorazem koncentracji mikroelementu w roślinie (R) oraz jego zawartości w glebie oznaczonej metodą Mehlich 3 (G). Liczby graniczne wyliczono po podstawieniu do równania krytycznej zawartości mikroelementów w roślinie (R) i odpowiednim przekształceniu równania. Podstawą drugiej metody było wydzielenie z całego zbioru danych grupy wysokich plonów $\geq 4,0 \text{ t ha}^{-1}$ (n=755). Następnie w tej grupie wyliczono dolne kwintyle (QU1) dla zawartości poszczególnych mikroelementów w glebie oznaczonych w wyciągu Mehlich3 i przyjęto je jako liczby graniczne. Uznano, że QU1 jest dobrym wskaźnikiem najniższej zawartości mikroelementu w glebie, przy której można uzyskać plon co najmniej 4,0 t ha. Ostateczne liczby graniczne opracowano przez uśrednienie wartości wyliczonych metodą równań i metodą wysokich plonów oraz ich odpowiednie skorygowanie. W połączonym zbiorze próbek glebowych spod pszenicy i rzepaku (n=3865) sprawdzono działanie tych liczb, oceniając udział gleb z niedoborami mikroelementów oddzielnie dla rzepaku i pszenicy.

Słowa kluczowe: mikroelementy, ekstrahent uniwersalny, gleba, granica niedoboru, rzepak

WSTĘP

W ramach wprowadzania do okręgowych stacji chemiczno-rolniczych (OSChR) nowej metody oznaczania zawartości przyswajalnych form mikroelementów w glebie opartej o ekstrakcję roztworem Mehlich 3, konieczne było wyznaczenie liczb granicznych do oceny zawartości mikroelementów w glebie dla tej metody. Dotychczasowa metoda oceny, oparta o ekstrakcję 1 M HCl, została wprowadzona w OSChR w roku 1986 na podstawie badań przeprowadzonych w IUNG (Gembarzewski et al. 1987; Gembarzewski i Korzeniowska 1990). Autorzy tej metody wychodzili z założenia, że silniejszy ekstrahent zapewnia informacje nie tylko o aktualnych, ale również o potencjalnie dostępnych ilościach mikroelementów, które mogą przechodzić do roztworu glebowego w wyniku zmian zachodzących w glebie w dłuższym okresie. Opracowane wówczas trzystopniowe liczby graniczne do in-

terpretacji wyników, określające zawartość niską, średnią i wysoką, wyznaczono metodą równań regresji na materiale liczącym 160 par próbek gleba-roślina (Gembarzewski i Korzeniowska 1996; Zalecenia nawozowe 1990).

Punktem wyjścia do opracowania nowych liczb do oceny zasobności gleby w mikroelementy ekstrahowane roztworem Mehlich 3 było założenie, że w odróżnieniu od dotychczas obowiązującego systemu, nowy system oceny powinien być uzależniony od gatunku uprawianej rośliny, ze względu na różną wrażliwość roślin na deficyt mikrośladników (Katyal i Randhawa 1983). Ponadto zdecydowano o opracowaniu liczb jednostopniowych, zamiast stosowanych obecnie trzystopniowych. Uznano za wystarczające wyznaczenie jedynie granicy niskiej zawartości mikroelementu w glebie, ponieważ przy niskiej zawartości rośliny mogą reagować obniżeniem wielkości i jakości plonu. W tej sytuacji rekomendowane jest

odpowiednie nawożenie. Postanowiono opracować liczby dla trzech najważniejszych gospodarczo roślin uprawnych – pszenicy, rzepaku i kukurydzy.

W równolegle publikowanej pracy przedstawiono liczby graniczne dla pszenicy, które zostały opracowane na podstawie kolekcji prób liczącej 1921 par próbek gleba-roślina pobranej z terenu całego kraju (Korzeniowska et al. 2019). Sposób wyznaczenia liczb bazował na metodzie równań regresji oraz tzw. metodzie wysokich plonów. Zdaniem autorów opracowanie liczb na podstawie dwóch niezależnych metod zapewniło ich dużą wiarygodność. W analogiczny sposób opracowano liczby graniczne dla rzepaku, co zostało przedstawione w niniejszej części pracy.

CHARAKTERYSTYKA KOLEKCJI PRÓBEK

Pobieranie kolekcji próbek

W roku 2017 z pól rzepaku, obejmujących 16 województw, zostały pobrane próbki gleby i odpowiadające im próbki roślinne przez próbobiorców OSCHR. Łącznie pobrano 1983 pary próbek gleba-roślina. Każda próbka glebowa, reprezentująca powierzchnię 4x4 m, powstała przez zmieszanie 5 próbek pobranych łaską glebową na głębokość 20 cm. Odpowiadające próbkom glebowym próbki roślinne składały się z co najmniej 20 sztuk roślin, pobranych w fazie BBCH 30/31 – od początku wydłużania pędu głównego do pojawienia się pierwszego międzywęźla. Ścinano całą część nadziemną roślin 5 cm nad ziemią. Ponadto po zbiorze rzepaku dla każdego pola, z którego pobierano próbki, został podany przez rolnika uzyskany plon nasion.

Oznaczenia chemiczne

W okręgowych stacjach chemiczno-rolniczych, w pobranych 1983 próbkach glebowych, oznaczono zawartość B, Cu, Fe, Mn i Zn przy użyciu roztworu Mehlich 3 (Boreczek et al. 2012; Mehlich 1984) oraz techniki AAS, a w przypadku boru – ICP-AES. Metodą Mehlich 3 oznaczono również zawartość przy-

TABELA 1. Częstość rozkładu plonów w zbiorze 1944 pól
TABLE 1. Frequency of field distribution in 1944 set

Plon, t ha ⁻¹ Yield	Liczba pól Number of fields	Pola, % Contribution of fields
<1,9	24	1
2,0–2,9	264	14
3,0–3,9	901	46
4,0–4,9	714	37
5,0–5,9	40	2
>6,0	1	0
Suma/Sum	1944	100

swajalnego fosforu (P_{M3}) (Kęsik et al. 2014). Dodatkowo wykonano analizy pH, zawartości węgla organicznego (Corg) oraz składu granulometrycznego. Oznaczono również zawartość mikroelementów w 1983 próbkach roślinnych. Metody analityczne podano w pracy Korzeniowskiej et al. (2019).

Stworzenie bazy danych do badań

Bazę danych tworzone analogicznie, jak w przypadku pszenicy. Po usunięciu różnego rodzaju błędów, uzyskano zbiór zawierający dane odnośnie zawartości mikroelementów w glebie i roślinie, podstawowych cech gleby oraz plonów nasion dla 1944 pól. Do dalszych prac został przeznaczony zbiór 1944 pól/rekordów nazwany dalej „zbiorem 1944”, po uprzednim zlogarytmowaniu niektórych zmiennych, w celu przybliżenia ich do rozkładu normalnego.

Plony rzepaku

Średni plon nasion rzepaku wynosił 3,55 i wahał się od 1,2 do 6,0 t ha⁻¹, przy czym na 83% pól kształtował się w zakresie 3,0–4,9 t ha⁻¹ (tab.1). Plony poniżej 3,0 t ha⁻¹ uzyskano jedynie na 15% pól, natomiast plony powyżej 4,9 t ha⁻¹ zdarzały się bardzo rzadko (2%).

Charakterystyka próbek glebowych

Na podstawie analiz chemicznych kolekcji próbek glebowych, pobranych z terenu całego kraju, można stwierdzić, że w 2017 roku średnie warunki glebowe uprawy rzepaku w Polsce były bardzo podobne jak w przypadku uprawy pszenicy. Rzekpak uprawiano na glebach lekko kwaśnych, średnio zwięzłych, o zawartości węgla organicznego 1,25% i wysokiej zawartości fosforu (tab. 2). Zależności pomiędzy cechami gleby: pH, Corg, P_{M3} oraz frakcjami gleby były słabe.

TABELA 2. Charakterystyka 1944 próbek glebowych
TABLE 2. Characteristic of 1944 soil samples

Cecha gleby Soil feature	Średnia Mean	SD	Zakres Range
pH w KCl	6,1	0,9	3,8–8,2
Piasek/ Sand 2,00–0,05 mm %	58,0	20,6	3,0–94,9
Pył/ Silt 0,05–0,002 mm %	38,4	18,9	5,1–89,0
Il/Clay <0,002 mm %	3,6	2,0	0,0–14,5
Frakcja/ Fraction <0.02 mm %	23,7	11,8	2,6–72,0
Corg %	1,25	0,52	0,29–4,78
P_{M3} mg kg ⁻¹	175	126	4–1290

TABELA 3. Współczynniki korelacji Pearsona dla cech gleby (n = 1944)
TABLE 3. Pearson correlation coefficient for soil feature (n = 1944)

Cecha gleby Soil feature	pH	Pył/Silt	Fracja/Fraction <0,02	Pył/Silt	Corg
Pył/ Silt	0,079***	–	–	–	–
Fracja/Fraction <0,02	0,062**	0,925***	–	–	–
Il/Clay	0,055*	0,865***	0,965***	–	–
Corg	0,093***	0,203***	0,261***	0,245***	–
P _{M3}	0,077***	-0,381***	-0,392***	-0,389***	-0,052*

Współczynniki korelacji (r) nie przekraczały 0,39 przy $p < 0,001$, a silne korelacje występowały tylko pomiędzy poszczególnymi frakcjami granulometrycznymi (tab.3).

kiem o dużym zapotrzebowaniu na bor i dużej wrażliwości na jego niedobór (Korzeniowska et al. 2019, tab. 10).

Zawartość mikroelementów w glebach i roślinach

Zarówno w glebach, jak i w roślinach, stwierdzono największą zawartość Fe, a następnie Mn, przy czym zawartości tych pierwiastków w glebie były około 1,5–2,5 krotnie większe niż w roślinie (tab.4). Odwrotnie było w przypadku B, Zn i Cu, których zawartości były odpowiednio 45, 7 i 3 razy większe w próbkach roślinnych niż glebowych. Największa różnica pomiędzy poziomem zawartości mikroelementu w roślinie i glebie dotyczyła boru. Rzepak jest gatun-

WPLYW CZYNNIKÓW GLEBOWYCH NA FITODOSTĘPNOŚĆ MIKROSKŁADNIKÓW DLA ROŚLIN

Podobnie jak w przypadku pszenicy, stopień dostępności mikroelementów dla rzepaku scharakteryzowano współczynnikiem bioakumulacji (R/G), który jest ilorazem zawartości mikroelementu w roślinie i w glebie. Odpowiednią formułę podano w I części pracy. Współczynniki korelacji określające zależność pomiędzy R/G a cechami gleby wskazują cechę gleby, która miała największy wpływ na fitodostępność danego mikroelementu (tab. 5). Największy wpływ na

TABELA 4. Zawartość mikroelementów w glebie i roślinie w zbiorze 1944 w mg kg⁻¹
TABLE 4. The concentration of microelements in soil and plant in 1944 set in mg kg⁻¹

Pierwiastek Element	Gleba/Soil ¹			Roślina/Plant ²		
	Średnia/ Mean	SD	Zakres/ Range	Średnia Mean	SD	Zakres Range
B	0,88	0,77	0,01–6,24	39,5	22,4	7,6–172
Cu	2,34	1,30	0,1–9,7	6,3	2,8	1,89–34,4
Fe	418	380	46,0–3454	170	110	22,5–988
Mn	88,4	42,2	10,1–297	57,9	35,1	10,7–292
Zn	7,3	5,7	0,5–56,3	54,0	15,5	7,8–173

Wyjaśnienie/Explanation: 1 – zawartość oznaczana metodą Mehlich 3/Mehlich 3 – concentration; 2 – całe części nadziemne w fazie BBCH 30/31/whole aboveground part in BBCH 30/31stage; SD – odchylenie standardowe/standard deviation.

TABELA 5. Współczynnika korelacji Pearsona dla współczynnika bioakumulacji (R/G) i cech gleby (n=1944)
TABLE 5. Pearson correlation coefficient for bioaccumulation factor (R/G) and soil features (n=1944)

R/G ¹	pH	Pył/Silt 0,05–0,002 mm	Fracja/Fraction <0,02 mm	Il/Clay < 0,002 mm	Corg	P _{M3}
B _{R/G}	-0,08***	-0,05*	-0,06**	-0,05*	-0,08***	ni
Cu _{R/G}	ni	0,08***	ni	0,05*	-0,15***	-0,14***
Fe _{R/G}	0,20***	0,16***	0,17***	0,20***	ni	-0,12***
Mn _{R/G}	-0,24***	-0,21***	-0,19***	-0,16***	ni	ni
Zn _{R/G}	-0,07**	0,07**	0,09***	0,12***	-0,12***	-0,24***

Wyjaśnienie/Explanation: 1 – zawartość w glebie oznaczona metodą Mehlich 3/Mehlich 3-soil concentration; *, **, *** poziom istotności odpowiednio $p < 0,05$; $0,01$; $0,001$ /significant level $p < 0,05$; $0,01$; $0,001$ respectively; ni – nie istotne/non-significant.

dostępność B i Cu dla rzepaku miała zawartość Corg w glebie (odpowiednio $r = -0,08$ i $-0,15$ przy $p < 0,001$). Ujemne współczynniki korelacji świadczą o tym, że wzrost zawartości Corg powodował ograniczenie dostępności tych mikroelementów. Na dostępność Mn ewidentnie największy wpływ miał odczyn gleby ($r = -0,24$ przy $p < 0,001$), natomiast na dostępność Zn zasobność gleby w fosfor ($r = -0,24$ przy $p < 0,001$). Współczynniki korelacji określające zależność pomiędzy fitodostępnością Fe a cechami gleby były na ogół dodatnie, przy czym największą wartość przyjęły dla pH ($r = 0,20$ przy $p < 0,001$ i zawartości iłu w glebie ($r = 0,20$ przy $p < 0,001$). Ujemny współczynnik korelacji dotyczył jedynie zawartości fosforu w glebie ($r = -0,24$).

WYDZIELENIE GRUPY WYSOKICH PLONÓW

Spośród całego zbioru danych (1944 rekordów) wydzielono grupę tzw. wysokich plonów.

Przyjęto, że do grupy tej należy zaliczyć obserwacje z plonami co najmniej 40% wyższymi w porównaniu ze średnią krajową z ostatnich lat. Przyjęcie wyższego progu dla grupy wysokich plonów, np. 50% jak w przypadku pszenicy, spowodowałoby uzyskanie zbyt małego zbioru danych do obliczeń, liczącego zaledwie około 200 rekordów. Średnie plony rzepaku z lat 2015–2017 kształtowały się na poziomie 2,83 t/ha, a 40% wyższy plon wynosi 3,96 t/ha (GUS 2018). Do zbioru wysokich plonów zaliczono wszystkie obserwacje (pola) z plonami równymi lub wyższymi od 4,0 t/ha. W efekcie uzyskano zbiór liczący 755 obserwacji, nazywany dalej „zbiorem 755”.

WYLICZENIE KRYTYCZNYCH ZAWARTOŚCI MIKROELEMENTÓW W ROŚLINACH RZEPAKU

W literaturze są dostępne wartości krytyczne opracowane dla rzepaku przez Bergmanna (1992) oraz przez Schnuga i Haneklaus (2008) (tab. 6). W naszych badaniach oszacowano wartości krytyczne w oparciu o zbiór wysokich plonów 755, wykorzystując metodę opisaną w pracy Korzeniowskiej et al. (2019). W tym celu wyliczono dolny kwintyl (QU1) dla zbioru 755 ($\geq 4,0$ t ha⁻¹) (tab. 6). Otrzymane w ten sposób wartości krytyczne były zbliżone do wartości opracowanych przez Bergmanna, a także Schnuga, z wyjątkiem wyliczonej dla Zn, która była znacznie wyższa, niż podają obaj autorzy.

TABELA 6. Zawartość krytyczna w roślinie w mg kg⁻¹
TABLE 6. Critical value in plant in mg kg⁻¹

Pierwiastek Element	Bergmann ¹	Schnug ²	Korzeniowska i Stanisławska ³
B	30	25	25
Cu	5	4,5	4,8
Fe	x	100	105
Mn	30	30	37
Zn	25	33	43

1 – najmłodsze w pełni rozwinięte liście przy wysokości roślin 30–50 cm; the youngest fully developed leaves at plant height of 30–50 cm, 2 – najmłodsze w pełni rozwinięte liście w fazie BBCH 30/31; the youngest fully developed leaves in the BBCH 30/31 phase, 3 – cała roślina w fazie BBCH 30/31; the whole plant in BBCH 30/31 phase.

WYLICZENIE LICZB GRANICZNYCH METODĄ RÓWNAŃ REGRESJI PRZY UŻYCIU ZBIORU 1944

Liczby graniczne dla rzepaku, podobnie jak dla pszenicy, opracowano na podstawie równań regresji opisujących zależność pomiędzy współczynnikiem bioakumulacji danego mikroelementu R/G (zmienna zależna) a określonymi cechami gleby wpływającymi na ich fitodostępność (zmienna niezależna). Cechy gleby zostały włączone do równań na podstawie korelacji tych cech ze współczynnikiem bioakumulacji R/G (tab. 5). Cechy wybrane do testowania równań dotyczących poszczególnych mikroelementów były takie same dla rzepaku, jak dla pszenicy, z wyjątkiem B i Fe. Dla przykładu przedstawiono procedurę wyliczenia liczb granicznych niskiej zawartości Mn w glebie, która była analogiczna dla pozostałych mikroele-

TABELA 7. Równania regresji opisujące zależność współczynnika bioakumulacji manganu (R_{Mn}/G_{Mn}) od zawartości Corg w glebie (n=1944)

TABLE 7. Regression equations describing the relation of manganese bioaccumulation coefficient (R_{Mn}/G_{Mn}) and soil Corg (n=1944)

Lp. No	Model	Równanie/Equation	r ² (%)
1	Linear	$R_{Mn}/G_{Mn} = 2,299 - 0,24 \cdot \text{pH}$	5,7 ***
2	Exponential	$R_{Mn}/G_{Mn} = \exp(0,91 - 0,22 \cdot \text{pH})$	8,4 ***
3	Reciprocal-Y	$R_{Mn}/G_{Mn} = 1/(-0,16 + 0,34 \cdot \text{pH})$	5,7 ***
4	Reciprocal-X	$R_{Mn}/G_{Mn} = -0,67 + 9,02/\text{pH}$	7,2 ***
5	Logarithmic	$R_{Mn}/G_{Mn} = 3,52 - 1,50 \cdot \ln(\text{pH})$	6,5 ***
6	Multiplicative	$R_{Mn}/G_{Mn} = 7,45 \cdot \text{pH}^{-1,36}$	9,4 ***
7	Square root-X	$R_{Mn}/G_{Mn} = 3,80 - 1,20 \cdot \sqrt{\text{pH}}$	6,1 ***
8	Square root-Y	$R_{Mn}/G_{Mn} = (1,50 - 0,11 \cdot \text{pH})^2$	7,9 ***

Explanation/Wyjaśnienie: r² – współczynnik determinacji/determination coefficient; *, **, *** – poziom istotności odpowiednio $p < 0,05$; $0,01$; $0,001$ respectively.

mentów. Spośród równań dla Mn, uwzględniających pH gleby jako zmienną niezależną, najwyższym współczynnikiem determinacji r^2 cechowało się równanie multiplikatywne nr 6 (tab. 7). Po przekształceniu tego równania, wyliczono liczby graniczne niskiej zawartości Mn w glebie poprzez podstawienie wartości krytycznej w roślinie (37 mg kg^{-1}) oraz średnich wartości 4 zakresów pH (tab. 8).

TABELA 8. Porównanie liczb granicznych niskiej zawartości Mn Mehlich3 w glebie wyliczonych różnymi metodami (mg kg^{-1})
TABLE 8. Comparison of the limit values of low Mn Mehlich3 concentration in soil calculated by various methods (mg kg^{-1})

Metoda/Method	pH gleby/Soil pH			
	<5,5	5,6–6,5	6,6–7,2	>7,3
Równań regresji Regression equations	29	49	58	69
Wysokich plonów High yields	37	46	47	40
Średnia Mean	33	48	53	55

WYLICZENIE LICZB GRANICZNYCH METODĄ WYSOKICH PLONÓW PRZY UŻYCIU ZBIORU 755

Do weryfikacji liczb granicznych wyliczonych metodą równań regresji wykorzystano metodę nazywaną metodą wysokich plonów, której idea została wyjaśniona w pracy Korzeniowskiej et al. (2019). Wyliczono dolne kwintyle (QU1) zawartości poszczególnych mikroelementów w glebie dla zbioru wysokich plonów 755, które przyjęto za liczby graniczne niedoboru mikroelementów w glebie (tab. 8)

OSTATECZNA KOREKTA LICZB

W celu opracowania ostatecznych liczb granicznych niedoboru mikroelementów w glebie porównywano wartości wyliczone metodą równań i metodą wysokich plonów, które były do siebie zbliżone, aczkolwiek w mniejszym stopniu niż liczby dla pszenicy. Pomimo tego zdecydowano się na ześredniowanie liczb, a następnie ich odpowiednie skorygowanie. Dla przykładu przedstawiono procedurę wyznaczenia liczb dla Mn, który był jednym z bardziej skomplikowanych przypadków. Wartości wyliczone obiema metodami dla tego pierwiastka różniły się między sobą o około 20% w zakresie pH 3,6–7,2 i znacznie więcej w zakresie 7,3–8,0 (tab.8). Liczby wyliczone metodą równań wzrastały w kolejnych przedziałach pH w granicach 29–69 mg kg^{-1} , podczas gdy wyliczone metodą wysokich plonów układały się bardziej „płasko”, od 37 do 47 mg kg^{-1} . Różnice między liczbami były

tu niewielkie, co może świadczyć o tym, że rzepak jako gatunek średnio wrażliwy na niedobór Mn pobierał ten pierwiastek w ilościach wystarczających do uzyskania wysokiego plonu, nawet z gleb zasadowych, gdzie dostępność tego pierwiastka jest mniejsza. Pomimo tych różnic, wartości z obu metod uśredniono (tab. 8). Analizując średnie stwierdzono, że liczba dla pierwszego przedziału pH (3,6–5,5) różniła się aż o 30% od liczb dla pozostałych trzech przedziałów (5,6–6,5; 6,6–7,2; 7,3–8,0), podczas gdy liczby w zakresie 5,6–8,0 były do siebie zbliżone, a różnice pomiędzy nimi nie przekraczały 9% (tab. 8). W związku z tym uznano, że należy wyznaczyć liczby tylko dla dwóch przedziałów pH, czyli dla gleb bardzo kwaśnych i kwaśnych (pH do 5,5) i pozostałych (od 5,6) (tab. 9). Liczba graniczna dla gleb o pH powyżej 5,5 jest średnią wartością z liczb wyliczonych dla trzech przedziałów w zakresie pH 5,6–8,0. Ostateczne liczby zostały odpowiednio zaokrąglone. Podobnie wyliczono liczby dla Cu, które zostały opracowane dla 2 przedziałów zawartości Corg w glebie oraz dla Fe, gdzie tylko jedną liczbę graniczną niedoboru tego pierwiastka wyznaczono dla wszystkich gleb, niezależnie od ich właściwości. Dla pozostałych mikroelementów liczby graniczne zróżnicowano dla 4 przedziałów zawartości Corg w glebie (B) oraz zasobności gleby w fosfor (Zn).

TABELA 9. Liczby graniczne niskiej zawartości mikroelementów w glebie oznaczanych metodą Mehlich 3 dla rzepaku
TABLE 9. Limits values for low concentration of micronutrients in soil determined by Mehlich 3 method for rapeseed

Pierwiastek Element	Cecha gleby Soil feature	Niska zawartość mg kg^{-1} Low concentration mg kg^{-1}
B	C org (%)	
	do 1,5	<0,30
	1,1–1,5	<0,50
	1,6–1,2	<0,70
	od 2,1	<0,90
Cu	C org (%)	
	do 1,5 od 1,6	<1,0 <2,0
Fe	–	< 200
Mn	pH	
	do 5,5 od 5,6	<30 <50
Zn	P_{M3} (mg kg^{-1})	
	do 100	<2,5
	101–200	<3,0
	201–300 od 301	<4,0 <5,5

Wyjaśnienie/Explanation: Corg – węgiel organiczny/organic carbon, P_{M3} – fosfor oznaczony metodą Mehlich 3/phosphorus determined by Mehlich 3 method.

PODSUMOWANIE

Opracowane liczby graniczne niedoboru mikroelementów dla rzepaku różnią się w stosunku do proponowanych dla pszenicy. Różnice te dotyczą zarówno cech gleby, od których uzależniono liczby dla poszczególnych mikroelementów (B i Fe), podziału na odpowiednie zakresy wartości tych cech (Cu i Mn), jak również samego poziomu zawartości niedoborowej. O ile wybrane cechy gleby i ich podział na zakresy wynikał głównie z charakteru zbiorów danych dla pszenicy i dla rzepaku, o tyle poziom zawartości niedoborowej wynikał również z właściwości gatunkowej samej rośliny, jej wrażliwości na niedobór danego mikroelementu, a także zdolności pobierania go z gleby. Znany jest fakt, że niektóre gatunki, a nawet odmiany, łatwiej pobierają formy pierwiastków niedostępne dla innych roślin, w wyniku wydzielania przez korzenie specjalnych substancji chelatujących, zwanych fitosideroforami. Badania naukowe wykazały, że wydzielanie fitosideroforów (FS) może być indukowane przez niedobór Fe, Zn i Cu. Wydzielanie FS przy niedoborze tych mikroelementów stwierdzili u zbóż i traw Zhang et al. (1991), Von Wiren et al. (1996), Cakmak et al. (1996, 1998), Suzuki et al. (2006), Neelam et al. (2010).

Za pomocą nowych liczb granicznych, opracowanych dla metody Mehlich 3, oceniono ilość gleb z niedoborami poszczególnych mikroelementów dla upraw pszenicy i rzepaku w połączonym zbiorze danych liczącym 3865 (1921 + 1944) próbek glebowych, który można uznać za reprezentujący warunki glebowe Polski (tab.10 i 11). Próbowano na podstawie tego zbioru oszacować skalę niedoborów mikroelementów w kraju, porównując je z oceną wykonaną za pomocą dotychczas obowiązujących (starych) liczb, opracowanych do metody 1 M HCl (Zalecenia 1990). Dużą różnicę można zauważyć w ocenie niedoborów boru. Przy starych liczbach granicznych aż 66% próbek wykazywało niską zawartość B, podczas gdy przy nowych liczbach – 45% charakteryzowało się zbyt

TABELA 10. Ocena niedoborów mikroelementów w glebie dla rzepaku w kolekcji liczącej 3865 próbek glebowych
TABLE 10. Assessment of soil micronutrients deficiency for rapeseed in the collection of 3865 soil samples

Pierwiastek Element	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	próbki z niedoborami (%) samples with deficiency (%)				
Stare liczby old values (1 M HCl)	66	20	17	1	12
Nowe liczby new values (Mehlich 3)	45	14	10	15	14

TABELA 11. Ocena niedoborów mikroelementów w glebie dla pszenicy w kolekcji liczącej 3865 próbek glebowych
TABLE 11. Assessment of soil micronutrients deficiency for wheat in the collection of 3865 soil samples

Pierwiastek Element	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	próbki z niedoborami (%) samples with deficiency (%)				
Stare liczby old values (1 M HCl)	66	20	17	1	12
Nowe liczby new values (Mehlich 3)	19	30	21	16	20

niską zawartością B dla rzepaku i tylko 19% dla pszenicy. Biorąc pod uwagę dużą wrażliwość rzepaku i małą pszenicy na niedobór tego pierwiastka, wydaje się że poziom liczb granicznych B dla obu gatunków jest właściwie ustalony. Stosunkowo dużą różnicę można również zauważyć w ocenie niedoborów manganu. Na podstawie starych liczb granicznych tylko 1% gleb wykazywał niską zawartość Mn, podczas gdy według nowych liczb granicznych, opartych na metodzie Mehlich 3, aż 15% gleb charakteryzowało się zbyt niską zawartością Mn dla rzepaku i 16% gleb dla pszenicy. Udział gleb z niską zawartością pozostałych mikroelementów, wyceniony obiema metodami, był do siebie bardziej zbliżony, niż w przypadku B i Mn, niemniej był zróżnicowany w zależności od gatunku rośliny, na ogół zgodnie z jej wymaganiami odnośnie danego mikroelementu.

LITERATURA

- Bergmann W., 1992. Nutritional disorders of plants-development, visual and analytical diagnosis. Gustav Fischer Verlag, Jena, Stuttgart, New York.
- Boreczek B., Sumorek-Gołąbek A., Janda B., 2012. Wielopierwiastkowa analiza gleb metodą Mehlich 3. Główne Laboratorium Analiz Chemicznych IUNG-PIB, Puławy, 17 (materiały niepublikowane do użytku wewnętrznego).
- Cakmak I., Sari N., Marschner H., Ekiz H., Kalayci M., Yilmaz A., Braun H.J., 1996. Phytosiderophore release in bread and durum wheat genotypes differing in zinc efficiency. *Plant and Soil* 180: 183–189.
- Cakmak I., Erenoglu B., Giilu, K.Y., Derici R., Romheld V., 1998. Light-mediated release of phytosiderophores in wheat and barley under iron or zinc deficiency. *Plant and Soil* 202: 309–315.
- Gembarzewski H., Kamińska W., Korzeniowska J., 1987. Zastosowanie 1M roztworu HCl jako wspólnego ekstrahenta do oceny zasobności gleby w przyswajalne formy mikroelementów. *Prace Komisji Naukowej PTG IV/8: 1–9*
- Gembarzewski H., Korzeniowska J., 1990. Simultaneous extraction of B, Cu, Fe, Mn, Mo and Zn from mineral soils, and an estimation of the results. *Agrobiological Research* 43(2): 115–127.

- Gembarzewski H., Korzeniowska J., 1996. Wybór metody ekstrakcji mikroelementów z gleby i opracowanie liczb granicznych przy użyciu regresji wielokrotnej. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 434: 353–364.
- GUS, 2018. *Mały Rocznik Statystyczny Polski*, Zakład Wydawnictw Statystycznych, Warszawa.
- Katyal J.C., Randhawa N.S., 1883. Micronutrients. *FAO Fertilizer and plant nutrition Bulletin* 7: 1–82.
- Kęsik K., Lipiński W., Jadczyż T., Boreczek B., Janda B., Sumorek-Gołąbek A., Kocoń A., Ochal P., Pikuła D., Bochniarz A., 2014. Liczby graniczne oraz procedura badawcza oznaczania metodą Mehlich 3 ruchomych form fosforu, potasu i magnezu w glebach mineralnych. *Instrukcja wdrożeniowa nr 230, IUNG-PIB Puławy*, 26.
- Korzeniowska J., Stanisławska-Głubiak E., Lipiński W., 2019. Opracowanie liczb granicznych niedoboru mikroelementów w glebie oznaczanych przy użyciu ekstrahenta Mehlich 3 dla polskich warunków glebowych. Część I. Pszenica. *Soil Science Annual* 70(4): 314–323.
- Mehlich A., 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 15(12): 1409–1416.
- Neelam K., Tiwari V.K., Rawat N., Tripathi S.K., Randhawa G.S., Dhaliwal H.S., 2010. Identification of *Aegilops* species with higher production of phytosiderophore and iron and zinc uptake under micronutrient-sufficient and -deficient conditions. *Plant Genetic Resources: Characterization and Utilization* 8: 132–141.
- Schnug, E., Haneklaus, S., 2008. Evaluation of the relative significance of sulfur and other essential mineral elements in oilseed rape, cereals, and sugar beet production. [In:] J. Jez, ed. (2008) *Sulfur: A missing link between soils, crops, and nutrition*. CSSA-ASA-SSSA Publishing, Madison, USA: 219–233 pp.
- Suzuki M., Takahashi M., Tsukamoto T., Watanabe S., Matsushashi S., Yazaki J., Kishimoto N., Kikuchi S., Nakanishi H., Mori S., Nishizawa N.K., 2006. Biosynthesis and secretion of mugineic acid family phytosiderophores in zinc-deficient barley. *The Plant Journal* 1: 85–97.
- Von Wiren N., Marschner H., Romheld V., 1996. Roots of iron-efficient maize also absorb phytosiderophore-chelated zinc. *Plant Physiology* 111(4): 1119–1125.
- Zhang F.S., Treeby M., Romheld V., Marschner H., 1991. Mobilization of iron by phytosiderophores as affected by other micronutrients. *Plant and Soil* 130: 173–178.
- Zalecenia nawozowe. Praca zbiorowa 1990. Część I. Liczby graniczne do wyceny w glebach makro- i mikroelementów. *Wydawnictwo IUNG Puławy P(44)*: 126.

Received: October 2, 2019

Accepted: November 8, 2019

Associated editor: C. Kabala

Development of the limit values of micronutrient deficiency in soil determined using Mehlich 3 extractant for Polish soil conditions. Part II. Rapeseed

Abstract: The aim of the study was to develop limit values for low microelement concentration in the soil, determined with the use of Mehlich 3 extractant for assessing their deficits in rapeseed crops. The values were prepared on the basis of 1944 fields with rapeseed, covering the whole Poland. In 2017, the samplers of Polish agro-chemical laboratories took soil samples and corresponding plant samples at the BBCH 30/31 stage. In the plant samples, the concentration of microelements was determined, and in the soil samples, apart from microelements, also pH, texture and the concentration of organic carbon and available phosphorus, were determined. Moreover, for each field, data on rapeseed yield were collected. Limit values were determined by two independent methods: 1) the method of regression equations and 2) the so-called high yield method. In the first case, the limit microelement concentration in the soil was calculated from the equation describing the relationship between the R/G bioaccumulation coefficient and a specific soil feature (n=1944). The bioaccumulation coefficient is a quotient of the concentration of a microelement in a plant (R) and its concentration in the soil determined by the Mehlich 3 (G) method. Limit values were calculated after substituting the critical concentration of microelements in the plant (R) to the equation, and subsequently, an appropriate conversion of the equation. The second method was based on the separation of a group of high yields $\geq 4.0 \text{ t ha}^{-1}$ (n=755) from the whole data set. Then in this group, the lower quintiles (QU1) were calculated for the concentration of individual microelements in the soil determined in Mehlich 3 extract and adopted as limit values. It was found that QU1 is a good indicator of the lowest microelement concentration in the soil at which a yield of at least 4.0 t ha^{-1} can be obtained. The final limit values were worked out by averaging the values calculated by the equations and high yield method and their appropriate correction. In the combined soil sample collections for wheat and rapeseed (n=3865), the values were checked by evaluating the percentage of soils with microelement shortage separately for rape and wheat. The results of this evaluation were compared with the evaluation using the old system based on the 1 M HCl, which did not take into account the plant species.

Keywords: micronutrients, universal extractant, soil, deficiency limits, rapeseed