sciendo
DOI: 10.2478/ssa-2019-0028

SOIL SCIENCE ANNUAL
Vol. 70 No. 4/2019: 314–323

JOLANTA KORZENIOWSKA [1*], EWA STANISŁAWSKA-GLUBIAK [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-Wesoła, Poland

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

Streszczenie: W ramach wdrożenia metody Mehlich 3 (M3) w laboratoriach okręgowych stacji chemiczno-rolniczych opracowano liczby graniczne niedoboru B, Cu, Fe, Mn i Zn w glebie dla pszenicy. Liczby zostały opracowane na podstawie 1921 pól z pszenicą rozmieszczonych równomiernie na terenie całego kraju. Z pól tych w 2016 roku pobrano próbki gleby wraz z rosnącymi na niej roślinami w fazie początku strzelania w źdźbło (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. Dodatkowo dla wszystkich pól uwzględniono plon ziarna po zbiorze pszenicy. 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=1921). Współczynnik bioakumulacji definiowany jest jako iloraz zawartości 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 ≥7,0 t ha^{-1} (n=578). Następnie w tej grupie wyliczono dolne kwintyle (QU1) dla zawartości poszczególnych mikroelementów w glebie oznaczonych w wyciągu M3 i przyjęto je jako liczby graniczne. Uznano, że QU1 jest dobrym wskaźnikiem najniższej zawartości mikroelementu w glebie, przy której można uzyskać plon co najmniej 7,0 t ha^{-1}. Porównanie liczb wyliczonych metodą równań regresji i metodą wysokich plonów wykazało ich duże podobieństwo, co potwierdziło wiarygodność tych liczb. Zaproponowane liczby określają granicę niskiej zasobności gleby w mikroelementy oznaczone metodą Mehlich 3, poniżej której zalecane jest nawożenie pszenicy tymi składnikami.

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

WSTĘP

W latach 2012–2014 w Głównym Laboratorium Analiz Chemicznych IUNG-PIB opracowano procedurę oznaczania przyswajalnych form składników pokarmowych w glebach Polski według metody Mehlich 3 (Boreczek i in. 2012). Roztwór Mehlich 3 jest mieszaniną pięciu składników, z których każdy pełni określone zadanie w trakcie przeprowadzanej ekstrakcji. W jego skład wchodzą: 0,2 M CH_3COOH + 0,013 M HNO_3 + 0,015 M NH_4F + 0,25 M NH_4NO_3 + 0,001 M EDTA. Podczas ekstrakcji kwas octowy pełni funkcję stabilizującą, utrzymując wartość pH na poziomie ok. 2,5 i zapobiegając wytrącaniu się wapnia. Kwas azotowy jest odpowiedzialny za ekstrakcję fosforanów wapnia, a fluorek amonu – fosforanów glinu i żelaza. Azotan amonu ekstrahuje potas, magnez i wapń, a EDTA odpowiada za kompleksowanie mikroelementów (Mehlich 1984). Metoda ta jest stosowana w wielu laboratoriach na świecie, a jej uniwersalność potwierdza wielu autorów (Bortolon i Gianello 2012; Brennan et al. 2008; Gediga et al. 2015; Kabała et al. 2018, Kantek i Korzeniowska 2013; Khan et al. 2005; Korzeniowska et al. 2016; Korzeniowska i Stanisławska 2015; Liu et al. 2011; Loide et al. 2005; Ostatek-Boczyński i Lee-Steere 2012; Sedlar et al. 2018; Zbiral 2016; Zbiral i Nemec 2000).

Metoda Mehlich 3 pozwala na jednoczesną ekstrakcję makro- i mikroelementów z gleby jednym roztworem ekstrakcyjnym (Mehlich 1984). Procedury stosowane wcześniej przez okręgowe stacje chemiczno-rolnicze (OSChR) w naszym kraju wymagały stosowania do tego celu trzech różnych roztworów: mleczanu wapnia dla P i K, chlorku wapnia dla Mg oraz kwasu solnego dla mikroelementów. Przeprowadzanie równoczesnej ekstrakcji wszystkich składników pokarmowych z gleby jednym roztworem Mehlich 3 jest znacznym uproszeniem i skróceniem procedury

* *dr hab. J. Korzeniowska, prof. IUNG-PIB j.korzeniowska@iung.wroclaw.pl*

analitycznej oraz wiąże się z redukcją kosztów analiz. Ponadto niższa cena analiz gleby umożliwia rolnikom częstsze ich wykonywanie, co przekłada się na właściwy dobór dawek nawozowych. Bardziej precyzyjne nawożenie rzutuje zarówno na uzyskiwany poziom plonów, jak również na ochronę środowiska w Polsce.

W 2015 roku metoda Mehlich 3 została wdrożona w laboratoriach OSCHR w zakresie oznaczania makroskładników – fosforu, potasu i magnezu wraz z liczbami granicznymi do oceny zawartości tych pierwiastków w glebie (Fotyma et al. 2015; Lipiński 2019; Kęsik et al. 2014; Kęsik et al. 2015). W celu wdrożenia tej metody do oznaczania zawartości mikroelementów, konieczne było opracowanie odpowiednich liczb granicznych dla warunków glebowo-klimatycznych naszego kraju, pozwalających na ocenę zasobności gleb. Dotychczasowe liczby, opracowane dla metody opartej o ekstrakcję mikroelementów w 1 M HCl, określały zawartość niską, średnią i wysoką i były stosowane do oceny zasobności gleby niezależnie od gatunku uprawianej rośliny (Zalecenia 1990).

Badania nad opracowaniem liczb granicznych zostały podjęte w 2015 roku w IUNG-PIB w ścisłej współpracy z Krajową Stacją Chemiczno-Rolniczą. Efektem tych prac są liczby graniczne służące do oceny niedoborów mikroelementów w glebie dla pszenicy, zaprezentowane w niniejszej pracy, oraz dla rzepaku zaprezentowane w pracy Stanisawska-Glubiak et al. (2019).

CHARAKTERYSTYKA KOLEKCJI PRÓBEK

Pobieranie kolekcji próbek

W celu opracowania liczb granicznych akredytowani próbobiorcy okręgowych stacji chemiczno-rolniczych pobrali w roku 2016 kolekcję próbek gleby i rosnących na nich roślin pszenicy z terenu całej Polski. Łącznie pobrano 2033 próbek glebowych i tyle samo roślinnych z pól uprawnych w 16 województwach, na ogół po 1 parze gleba-roślina z 1 gminy.

Próbki glebowe pobierano z powierzchni 1 m^2 przy użyciu laski glebowej Egnera. Każda próbka powstała przez zmieszanie gleby z 5 nakłóć pobranych z warstwy 0–20 cm. Razem z każdą próbką glebową pobierano próbkę roślin pszenicy rosnących na tej glebie. Rośliny pobierano w fazie początku strzelania w źdźbło (BBCH 30/31), ścinając całe pędy 2 cm nad ziemią. Każda próbka składała się z minimum 80 sztuk pędów pszenicy. Ponadto po zbiorze pszenicy, dla każdego pola, z którego pobierano próbki, został podany przez rolnika uzyskany plon ziarna.

Oznaczenia chemiczne

W pobranych 2033 próbkach glebowych i 2033 próbkach roślinnych w laboratoriach okręgowych stacji chemiczno-rolniczych oznaczono zawartość B, Cu, Fe, Mn i Zn. Zawartość mikroelementów w glebie oznaczono przy użyciu roztworu Mehlich 3 (Boreczek et al. 2012; Mehlich 1984). Stosunek gleba-roztwór wynosił 1:10, a czas wytrząsania na klasycznym mieszadle obrotowym, przy zachowaniu 35/40 obrotów na minutę, wynosił 10 minut. Zawartość Cu, Fe, Mn i Zn w roztworze ekstrakcyjnym była oznaczona przy użyciu techniki AAS, a boru ICP-AES. W próbkach glebowych oznaczano pH metodą potencjometryczną w 1 M KCl (PN-ISO 10390:1997), zawartość węgla organicznego (Corg) metodą miareczkową przez utlenianie dwuchromianem (IV) w środowisku kwasu siarkowego (IV) (PN-ISO14235: 2003), zawartość fosforu przyswajalnego (P_{M3}) metodą Mehlich 3 (Kęsik et al. 2014) oraz skład granulometryczny metodą dyfrakcji laserowej. Zawartość mikroelementów w próbkach roślinnych, po uprzedniej mineralizacji na sucho (PN-R-04014:1991), oznaczano metodą AAS, z wyjątkiem B, który oznaczano metodą ICP-AES. Wszystkie laboratoria OSChR posiadają akredytację PCA, która zapewnia wiarygodność analiz przez realizowanie systemu kontroli jakości na 3 poziomach, w tym kontrolę przez kompetentny podmiot zewnętrzny.

Stworzenie bazy danych do badań

Po skompletowaniu wszystkich wyników badań uzyskano bazę danych składającą się z 2033 rekordów. Każdy rekord reprezentował jedno pole pszenicy i zawierał informację o uzyskanym plonie ziarna, zawartości mikroelementów w roślinie i w glebie oraz o podstawowych cechach gleby na tym polu (pH, skład granulometryczny, Corg, i zawartość P_{M3}).

We wstępnym etapie badań uzyskany zbiór 2033 pól/rekordów oczyszczono z tzw. błędów grubych. Usunięto rekordy zawierające błędy typu literówek i wyniki nieprawdopodobne. Usunięto również rekordy, w których rośliny zawierały bardzo wysokie zawartości mikroelementów – dwa razy przekraczające górny zakres zawartości optymalnej według Bergmanna (Bergmann 1992), wychodząc z założenia, że nie powinny się one znaleźć w badaniach nad określeniem limitu niedoboru w glebach. Ponadto dla niektórych zmiennych konieczne było logarytmowanie danych w celu zmniejszenia skośności rozkładu, a tym samym przybliżenia go do rozkładu normalnego. W wyniku tych działań uzyskano zbiór zawierający 1921 pól/rekordów do dalszych prac, nazywany dalej „zbiorem 1921”.

Plony pszenicy

Plon ziarna pszenicy oszacowano jedynie dla 1760 z 1921 wybranych do badań pól. Średni plon z tych pól wynosił 5,98 i wahał się od 1,0 do 10,6 t ha^{-1}. Najczęściej występowały plony w zakresie 5,0–6,9 t ha^{-1} (45% pól). Plony w wysokości 7,0 t ha^{-1} i powyżej uzyskano dla 33% pól. Częstość rozkładu plonów w badanym zbiorze przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1. Częstość rozkładu plonów w zbiorze 1760
TABLE 1. Frequency of yield distribution in 1760 set

Plon, t ha^{-1} Yield	Liczba pól Number of fields	Udział pól, % Contribution of fields
<2,9	30	2
3,0–3,9	96	5
4,0–4,9	255	14
5,0–5,9	374	21
6,0–6,9	427	24
7,0–7,9	308	17
8,0–8,9	205	12
>9,0	65	4
Suma/Sum	1760	100

TABELA 2. Charakterystyka 1921 próbek glebowych
TABLE 2. Characteristic of 1921 soil samples

Cecha gleby Soil feature	Średnia Mean	SD	Zakres Range
pH w KCl	6,15	0,95	3,7–8,2
Piasek/ Sand 2,00–0,05 mm %	53,1	22,6	1,0–92,3
Pył/ Silt 0,05–0,002 mm %	43,2	21,4	7,6–99,8
Ił/Clay <0,002 mm %	3,7	2,3	0,1–46,5
Frakcja/ Fraction<0.02 mm %	24,7	11,9	3,9–70,4
Corg %	1,3	0,6	0,05–9,80
P_{M3} mg kg^{-1}	172	115	12–1150

Wyjaśniene/Explantation: SD – odchylenie standardowe/standard deviation.

Charakterystyka próbek glebowych

Średnie wartości pH, zawartości poszczególnych frakcji gleby oraz Corg i fosforu przyswajalnego z pól, z których pobierano próbki do badań pokazują przeciętne warunki glebowe uprawy pszenicy w Polsce w 2016 roku. Na podstawie danych zamieszczonych w tabeli 2 można stwierdzić, że pszenica w większości była uprawiana na glebach lekko kwaśnych, średnio zwięzłych, charakteryzujących się zawartością węgla organicznego ok. 1,3% i wysoką zawartością P_{M3}. Ponadto pH, zawartość Corg i P_{M3} nie były wysoko skorelowane ze sobą, ani z poszczególnymi frakcjami gleby. Współczynniki korelacji nie przekraczały 0.28 przy p<0,001 (tab. 3).

Zawartość mikroelementów w glebach i roślinach

Zawartość mikroelementów zarówno w glebach, jak i roślinach układała się w taki sam szereg. Próbki zawierały najwięcej Fe, a następnie kolejno coraz mniej Mn, Zn, Cu i B, przy czym różnice w zawartości pomiędzy poszczególnymi mikroelementami były znacznie większe w glebie niż w roślinie (tab. 4). Zwraca również uwagę fakt, że zawartość B, Cu i Zn była większa w roślinie niż w glebie, natomiast Fe i Mn odwrotnie, większa w glebie niż w roślinie.

WPŁYW CZYNNIKÓW GLEBOWYCH NA FITODOSTĘPNOŚĆ MIKROSKŁADNIKÓW DLA ROŚLIN

Pobieranie mikroelementów przez rośliny zależy od wielu czynników glebowych, które w różny sposób modyfikują ich dostępność z gleby (Kabata-Pendias i Mukherjee 2007). Ocena zawartości mikroskładników w glebie powinna uwzględniać ten fakt przez uzależnienie liczb granicznych od tych czynników. Na ogół przyjmuje się, że na pobieranie mikroelementów

TABELA 3. Współczynniki korelacji Pearsona dla cech gleby (n=1921)
TABLE 3. Pearson correlation coefficient for soil feature (n=1921)

Cecha gleby Soil feature	pH	Pył/Silt	Frakcja/Fraction <0,02	Pył/Silt	Corg
Pył/ Silt	0,10***	–	–	–	–
Frakcja/Fraction <0,02	ni	0,59***	–	–	–
Ił/Clay	ni	0,50***	0,90***	–	–
Corg	0,10***	0,16***	0,28***	0,27***	–
P_{M3}	0,14***	-0,16***	-0,22***	-0,20***	ni

Wyjaśnienie/Explanation: *, **, *** – poziom istotności odpowiednio p< 0,05; 0,01; 0,001/significant level p< 0.05; 0.01; 0.001 respectively; ni – nie istotne/non-significan.

TABELA 4. Zawartość mikroelementów w glebie i roślinie (w suchej masie) w zbiorze 1921w mg kg^{-1}
TABLE 4. The concentration of microelements in soil and plant (in dry mass) in 1921 set in mg kg^{-1}

Pierwiastek Element	Gleba/Soil[1]			Roślina/Plant[2]		
	Średnia/ Mean	SD	Zakres/ Range	Średnia Mean	SD	Zakres Range
B	0,58	0,48	0,01–3,84	4,22	3,11	0,12–24,50
Cu	2,20	1,38	0,05–12,60	5,29	2,91	0,60–33,20
Fe	339	339	36–934	121,8	88,0	12,5–699,0
Mn	87,2	87,2	7,1–270,0	42,6	27,0	3,75–171,0
Zn	7,6	5,7	0,7–45,0	27,1	12,0	3,00–117,0

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.

przez rośliny duży wpływ ma odczyn, zawartość frakcji pyłowej i ilastej oraz zwartość węgla organicznego w glebie (Mercik et al. 2004, Rutkowska et al. 2004, Rutkowska et al. 2006). Na pobieranie mają wpływ również inne czynniki, takie jak potencjał redox, interakcje pomiędzy składnikami pokarmowymi oraz warunki powietrzno-wodne i aktywność mikrobiologiczna gleby (Antonkiewicz et al. 2019, Kępka et al. 2017). Jednak liczby graniczne mogą być powiązane tylko z tymi cechami gleby, które można łatwo oznaczyć i ująć w postaci liczbowej. Dlatego przy opracowywaniu liczb, spośród wielu czynników wpływających na dostępność mikroelementów dla roślin, wzięto pod uwagę pH, zawartość frakcji spławialnej i węgla organicznego (Corg) oraz zawartość fosforu (P_{M3}), który może wchodzić w interakcje z niektórymi mikroelementami.

Stopień fitodostępności mikroelementów scharakteryzowano współczynnikiem bioakumulacji (R/G), który określa zależność pomiędzy zawartością mikroelementu w roślinie i w glebie:

$$R/G = \frac{\text{Zawartość pierwiastka w roślinie}}{\text{Zawartość pierwiastka w glebie}}$$

Obliczenie korelacji pomiędzy R/G a różnymi czynnikami glebowymi dla poszczególnych mikroelementów pozwoliło na stwierdzenie, który z czynników miał największy wpływ na ich przyswajalność dla roślin. Generalnie wzrost pH, zwięzłości gleby oraz zawartości węgla organicznego i fosforu powodował zmniejszenie przyswajalności mikroelementów dla roślin, z wyjątkiem Fe, dla którego korelacje były w większości dodatnie (tab. 5). Mniejsza dostępność mikroskładników przy wyższym pH i większej zawartości Corg jest powszechnie znanym zjawiskiem (Kabata Pendias i Pendias 2001). Ujemne współczynniki korelacji dla pyłu, części spławialnych i iłu sugerują, że w glebach zwięźlejszych większy był ich ujemny wpływ na fitodostępność związany z silnym wiązaniem mikroskładników przez minerały ilaste, niż dodatni związany z większą ich podażą. Uzyskane współczynniki korelacji dowodzą również, że przyswajalność Fe i Zn zmniejszała się wraz ze wzrostem zawartości fosforu w glebie.

Podsumowując, największy wpływ na przyswajalność B, Mn i Zn miał odczyn gleby, Cu – zawartość frakcji pyłowej, a Fe – zawartość części spławialnych.

WYDZIELENIE GRUPY WYSOKICH PLONÓW

Ze zbioru danych liczącego 1760 rekordów (tab. 1) wydzielono tzw. „grupę wysokich plonów". Za granicę wysokich plonów przyjęto 7,0 t ha^{-1}, a wydzielo-

TABELA 5. Współczynniki korelacji Pearsona dla współczynnika bioakumulacji (R/G) i cech gleby (n=1921)
TABLE 5. Pearson correlation coefficient for bioaccumulation factor (R/G) and soil features

R/G[1]	pH	Pył/Silt 0,05–0,002 mm	Frakcja/Fraction <0,02 mm	Ił/Clay < 0,002 mm	Corg	P_{M3}
$B_{R/G}$	-0,27***	0,08***	ni	ni	-0,10***	-0,04
CuR/G	-0,09***	-0,14***	-0,08***	-0,06**	-0,10***	ni
$Fe_{R/G}$	0,14***	0,10***	0,21***	0,19***	0,05	-0,14***
$Mn_{R/G}$	-0,37***	-0,07***	-0,10***	-0,08***	ni	ni
$Zn_{R/G}$	-0,29**	-0,11**	ni	0,07**	-0,08***	-0,22***

Wyjaśnienie/Explanation: 1 – Zwartość w glebie oznaczona metodą Mehlich 3/Mehlich 3-soil concentration; *, **, *** – poziom istotności odpowiednio p< 0,05; 0,01; 0,00/significant level p< 0.05; 0.01; 0.001 respectively; ni – nie istotne/non-significant.

ny zbiór w którym plony były równe lub wyższe od tej wartości liczył 578 obserwacji (zbiór 578). Przyjęto, że wysokie plony powinny o co najmniej 50% przewyższać średni plon ziarna pszenicy uzyskiwany w kraju. Według danych GUS (GUS 2018) średnie plony pszenicy w latach 2015–2017 kształtowały się w granicach 4,57–4,88, średnio 4,68 t ha^{-1}.

WYLICZENIE KRYTYCZNYCH ZAWARTOŚCI MIKROELEMENTÓW W ROŚLINACH PSZENICY

Zawartości krytyczne mikroelementów w roślinie służą do oceny ich niedoborów w trakcie wegetacji roślin. Zawartość mikroelementu w roślinie niższa niż wartość krytyczna świadczy o niewystarczającym odżywieniu rośliny i informuje o konieczności wyrównania niedoboru przez nawożenie. W literaturze są dostępne wartości krytyczne opracowane przez Bergmanna (1992) oraz przez Shnuga i Haneklaus (2008) dla fazy początku strzelania w źdźbło/pierwszego kolanka (tab. 6).

W naszych badaniach podjęto się oszacowania zawartości krytycznych dla pszenicy pobranej w fazie początku strzelania w źdźbło (BBCH 30/31) w oparciu o wydzielony zbiór wysokich plonów (zbiór 578). Założono, że rośliny osiągające wysokie plony charakteryzują się optymalną zawartością składników pokarmowych, w tym mikroelementów. Ułożenie w zbiorze wysokich plonów zawartości danego mikroelementu w kolejności od najmniejszej do największej pozwoliło na określnie zakresu zawartości optymalnej. W celu wyznaczenia poszukiwanej zawartości krytycznej, dla uszeregowanego zbioru zawartości danego mikroelementu wyznaczano 4 kwintyle, dzieląc tym samym zbiór na 5 kolejnych przedziałów – od zawartości najniższej do najwyższej. Za zawartość krytyczną przyjęto dolny kwintyl (QU1), czyli granicę I i II przedziału (tab. 6). Podobny sposób postępowania oparty na kwintalach opisali Fotyma et al. (2015) przy wyznaczaniu liczb granicznych do oceny zawartości makroelementów w glebie.

TABELA 6. Zawartość krytyczna w roślinie w fazie początku strzelania w źdźbło/pierwszego kolanka (BBCH 30/31) w mg kg^{-1}
TABLE 6. Critical value in plant in beginning of stem elongation/first node (BBCH 30/31) in mg kg^{-1}

Pierwiastek Element	Bergmann (pszenica ozima) (winter wheat)	Schnug (zboża) (cereal)	Korzeniowska i Stanisławska (pszenicaozima) (winter wheat)
B	6	3	2,7
Cu	7	4	4
Fe	–	60	80
Mn	35	28	25
Zn	25	25	20

Wyznaczone w opisany powyżej sposób wartości krytyczne były zbliżone do wartości Schnuga. Wartości opracowane prze Bergmanna ponad 30 lat temu dotyczyły starych, nieuprawianych już odmian, co może wskazywać na ich dezaktualizację. Większą wiarygodność wartości Schnuga niż Bergmanna dla B i Cu w odniesieniu do aktualnie uprawianych odmian pszenicy potwierdziły badania Korzeniowskiej (Korzeniowska 2008a, 2008b).

WYLICZENIE LICZB GRANICZNYCH METODĄ RÓWNAŃ REGRESJI PRZY UŻYCIU ZBIORU 1921

Liczby graniczne wyliczano na podstawie równań regresji opisujących zależność pomiędzy współczynnikiem bioakumulacji R/G (zmienna zależna) a określonymi cechami gleby (zmienna niezależna). Identyczną metodę wykorzystano do opracowania liczb granicznych dla 1 M HCl, stosowanych obecnie w OSChR (Gembarzewski i Korzeniowska 1996). Aktualnie równania regresji konstruowano za pomocą programu Stagraphics. Dla każdego mikroelementu testowano 8 modeli równań w poszukiwaniu równania o najwyższym współczynniku determinacji r^2 (tab. 7).

Na podstawie wybranego równania, cechującego się najwyższym współczynnikiem r^2, wyliczano liczby graniczne. W przypadku modelu prostoliniowego równanie przybierało postać:

$$R_{Mi}/G_{Mi} = a + bx$$

gdzie: R_{Mi} – zawartość mikroelementu w roślinie,
G_{Mi} – zawartość mikroelementu w glebie oznaczona metodą Mehlich 3,
x – cecha gleby (np. pH lub Corg),
a – stała równania,
b – współczynnik kierunkowy prostej.

W celu wyliczenia liczb granicznych równanie przekształcono tak, aby zmienną zależną była zawartość mikroelementu w glebie (GMi):

$$R_{Mi}/G_{Mi} = a + bx$$

$$G_{Mi} = R_{Mi}/(a + bx)$$

Do tak przekształconego równania za R_{Mi} podstawiano krytyczną wartość pierwiastka w roślinie oraz odpowiednie wartości wybranej cechy glebowej. Jako R_{Mi} podstawiano limity wyznaczone przez autorów (tab. 6).

TABELA 7. Testowane modele równań regresji
TABLE 7. Tested models of regression equations

Lp. No	Model według programu Statgraphics Model according Statgaphics program
1	Linear model: Y = a + b*X
2	Exponential model: Y = exp(a + b*X)
3	Reciprocal-Y model: Y = 1/(a + b*X)
4	Reciprocal-X model: Y = a + b/X
5	Logarithmic-X model: Y = a + b*ln(X)
6	Multiplicative model: Y = a*X^b
7	Square root-X model: Y = a + b*sqrt(X)
8	Square root-Y model: Y = (a + b*X)^2

Wybierając dla poszczególnych mikroelementów cechy glebowe wchodzące do równań kierowano się wysokością współczynników korelacji opisujących związek pomiędzy tymi cechami i współczynnikiem bioakumulacji R/G (tab. 5). I tak dla B konstruowano równania z pH gleby, dla Cu z zawartością frakcji pyłu i C org, dla Fe z zawartością frakcji części spławianych i zawartością P w glebie, dla Mn z pH gleby, a dla Zn z pH gleby i zawartością P w glebie.

Dla przykładu przedstawiono sposób wyliczenia liczb granicznych dla boru. Zgodnie z opisaną powyżej procedurą w pierwszej kolejności skonstruowano 8 modeli równań regresji, gdzie zmienną zależną była wartość współczynnika bioakumulacji boru (R_B/G_B), a zmienną niezależną pH (tab. 8). Najwyższym współczynnikiem determinacji r^2 wynoszącym 24,41% cechowało się równanie multiplikatywne nr 6, i to równanie zostało wybrane do wyliczenia liczb granicznych.

Liczby graniczne dla boru wyliczano przez podstawienie do odpowiednio przekształconego równania nr 6 wartości krytycznej w roślinie (2,7 mg kg^{-1}) oraz

TABELA 8. Równania regresji opisujące zależność współczynnika bioakumulacji boru (RB/GB) od pH gleby (n=1921)
TABLE 8. Regression equations describing the relation of boron bioaccumulation coefficient (RB/GB) and soil pH (n=1921)

Lp. No	Model	Równanie/Equation	r^2 (%)
1	Linear	R_B/G_B = 101,08 –13,04*pH	7,40 ***
2	Exponential	R_B/G_B = exp(5,82 – 0,58*pH)	23,99***
3	Reciprocal-Y	nie uzyskano modelu	–
4	Reciprocal-X	R_B/G_B = -57,74 + 471,21/pH	8,74***
5	Logarithmic	R_B/G_B = 164,89 – 79,82*ln(pH)	8,09***
6	**Multiplicative**	**R_B/G_B = exp(8,41–3,41*ln pH**	**24,41*** **
7	Square root-X	R_B/G_B = 181,09 – 64,79*sqrt(pH)	7,74***
8	Square root-Y	R_B/G_B = (10,83 – 1,16*pH)^2	16,74***

Explanation/Wyjaśnienie: r^2 – współczynnik determinacji/determination coefficient; *, **, *** – poziom istotności odpowiednio p< 0,05; 0,01; 0,001/ significant level p< 0,05; 0,01; 0,001 respectively.

średnich wartości zakresów pH, odpowiadających glebom bardzo kwaśnym i kwaśnym (4,55), lekko kwaśnym (6.05), obojętnym (6,90) i zasadowym (7,65). W wyniku tego otrzymano liczby podane w tabeli 9.

W analogiczny sposób wybrano równania i wyliczano liczby dla pozostałych mikroelementów, przy czym dla Cu, Fe i Zn testowano po 16, a nie po 8 równań ze względu na uwzględnienie dwóch, a nie jednej cech gleby jak dla B i Mn.

Pomimo wysokiej istotności (p<0,001), współczynniki determinacji (r^2) wybranych równań kształtowały się na bardzo niskim poziome i wynosiły w przypadku B: 24,40%, Cu: 3,19–4,60%, Fe: 5,14–5,50%, Mn: 21,43% i Zn: 6,61–10,84. W dużych kolekcjach prób, o znacznym zróżnicowaniu przestrzennym, zazwyczaj zależność pomiędzy naturalną zawartością mikroelementów w glebie i roślinie oraz pomiędzy ich fitodostępnością a cechami gleby jest słaba (Basar 2009, Brennan et al. 2008). Zróżnicowane opady i temperatura mają bardzo duży wpływ na pobieranie składników pokarmowych przez rośliny i zaburzają inne zależności. Wysokie korelacje uzyskuje się na ogół przy nadmiernych zawartościach mikroelementów w glebie (Black et al. 2011, Menzies et al. 2007). Przy naturalnej ich zawartości, silne korelacje występują w badaniach z niewielką ilością gleb lub w doświadczeniach, gdzie mikroelementy są dozowane na tle tych samych warunków glebowych (Adiloglu i Kursun 2003, Khan et al. 2005, Rodriguez i Ramirez 2005, Sarto et al. 2011, Seth et al. 2018). Wydaje się jednak, że występująca w dużych kolekcjach prób bardzo wysoka istotność współczynników korelacji pozwala na wykorzystanie ich w badaniach i prawidłowe wnioskowanie. Nie mniej jednak niskie współczynniki determinacji uzyskiwane przez nas równań regresji poddawały w wątpliwość wiarygodność obliczonych na ich podstawie liczb. W związku z tym powyższe liczby wymagały weryfikacji przy użyciu dodatkowej, innej metody obliczeń.

WYLICZENIE LICZB GRANICZNYCH METODĄ WYSOKICH PLONÓW PRZY UŻYCIU ZBIORU 578

Do weryfikacji liczb granicznych wyliczonych metodą równań regresji wykorzystano metodę nazywaną dalej „metodą wysokich plonów". Kierowano się zasadą, że poszukiwaną liczbą graniczną będzie najmniejsza zawartość mikroelementu w glebie, przy której można osiągnąć wysoki plon (co najmniej 7,0 t ha^{-1}). W tym celu wyliczono dolne kwintyle (QU1) zawartości poszczególnych mikroelementów w glebie dla zbioru wysokich plonów 578. Podobnie jak w przypadku zawartości krytycznej w roślinie, uznano, że

TABELA 9. Porównanie liczb granicznych niskiej zawartości BM3 w glebie wyliczonych różnymi metodami (mg kg^{-1})
TABLE 9. Comparison of the limit values of low BM3 concentration in soil calculated by various methods (mg kg^{-1})

Metoda/Method	pH gleby/soil pH			
	do 5,5	5,6–6,5	6,6–7,2	od 7,3
Równań regresji/ Regression equations	0,10	0,30	0,40	0,60
Wysokich plonów/High yields	0,10	0,20	0,40	0,50
Średnia/Mean	0,10	0,25	0,40	0,55

QU1 będzie dobrym wyznacznikiem najmniejszej zawartości mikroelementu, przy której można uzyskać plon od 7.0 t/ha wzwyż. W tabeli 9 przedstawiono dolne kwintyle dla boru, które przyjęto za liczby graniczne niedoboru tego pierwiastka w glebie. W analogiczny sposób wyliczono liczby graniczne dla pozostałych czterech mikroelementów.

OSTATECZNA KOREKTA LICZB

Porównanie liczb wyliczonych metodą równań regresji i metodą wysokich plonów wykazało ich bardzo duże podobieństwo, co potwierdziło wiarygodność pierwszej z metod (tab. 9). W przypadku gdy liczby wyliczone obiema metodami pokrywały się lub były do siebie bardzo zbliżone, to ostateczne liczby wyznaczano przez uśrednienie. W ten sposób wyznaczono większość liczb. Zdarzało się, że dla pozostałych mikroelementów i niektórych zakresów pH, P_{M3} lub Corg różnice pomiędzy liczbami wyliczonymi obiema metodami były większe. Wtedy ostatecznej korekty dokonywano na podstawie oceny niedoborów mikroelementów dla pszenicy w dużych kolekcjach próbek glebowych przy użyciu obu wariantów liczb. Ocenę taką przeprowadzono w zbiorze 1921, na podstawie którego opracowano liczby, jak również w zbiorze liczącym 1944 próbki, nie związanym z opracowaniem liczb dla pszenicy. Ustalając ostateczny poziom liczb, brano również pod uwagę liczby opracowane dla rzepaku (Stanisławska-Glubiak et al. 2019), sprawdzając czy różna wrażliwość obu gatunków na niedobór poszczególnych mikroelementów (tab. 10) ma swoje odzwierciedlenie w poziomie

TABELA 10. Wrażliwość pszenicy na niedobór mikroelementów w porównaniu do innych roślin (na podstawie Stanisławska-Glubiak i Korzeniowska 2007)
TABLE 10. Sensitivity of wheat to micronutrient deficiency compared to other plants (based on Stanisławska-Glubiak and Korzeniowska 2007)

Roślina/Plant	B	Cu	Mn	Zn
Pszenica/Wheat	2	4	4	2
Jęczmień/Barley	1	4	3	1
Owies/Oat	1	4	4	1
Żyto/Rye	1	1	3	1
Kukurydza/Maize	3	3	3	4
Burak cukrowy/ Sugar beet	4	3	4	2
Rzepak/Rape	4	1	3	1
Groch/Pea	3	3	4	1
Lucerna/Lucerne	4	4	3	3

Wyjaśnienie/Explanation: 1– mała/low, 2 – średnia/medium, 3 – duża/high, 4 – bardzo duża wrażliwość/very high sensitivity.

TABELA 11. Liczby graniczne niskiej zwartości mikroelementów w glebie oznaczanych metodą Mehlich 3 dla pszenicy w mg kg^{-1}
TABLE 11. Limits values for low concentration of micronutrients in soil determined by Mehlich 3 method for wheat in w mg kg^{-1}

Pierwiastek Element	Cecha gleby Soil feature	Niska zawartość mg kg^{-1} Low concentration mg kg^{-1}
B	pH	
	≤ 5,5	<0,10
	5,6–6,5	<0,25
	6,6–7,2	<0,40
	≥ 7,3	<0,55
Cu	Corg (%)	
	≤ 1,0	<1,4
	1,1–1,5	<1,6
	1,6–2,0	<1,8
	≥ 2,1	<2,2
Fe	P_{M3} (mg kg^{-1})	
	≤ 100	<190
	101–200	<240
	≥ 201	<280
Mn	pH	
	≤ 5,5	<30
	5,6–6,5	<45
	6,6–7,2	<60
	≥ 7,3	<75
Zn	P_{M3} (mg kg^{-1})	
	≤ 100	<3,0
	101–200	<3,5
	201–300	<4,5
	≥ 301	<6,0

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

wyznaczonych liczb. Ostateczne liczby graniczne dla pszenicy przedstawiono w tabeli 11.

PODSUMOWANIE

Zaproponowane liczby graniczne niskiej zawartości mikroelementów w glebie do oceny ich niedoboru w uprawach pszenicy, zostały opracowane na podstawie bardzo dużej ilości danych uzyskanych z kolekcji aż 1921par próbek gleba-roślina, pobranych z pól pszenicy zlokalizowanych w 16 województwach naszego kraju. Tak duża ilość wyników, jak również zastosowanie w procesie wyliczenia dwóch niezależnych metod, zwiększa precyzyjność i wiarygodność opracowanych liczb, co sprawia że mogą zostać wdrożone w stacjach chemiczno-rolniczych w Polsce.

Opracowane liczby wykazują pewną zgodność z liczbami stosowanymi w Czechach (tab. 12). Podobieństwo liczb proponowanych przez Zbirala (2016) dotyczy Cu i Mn, natomiast różnice dotyczą B, Zn i Fe. Szczególną uwagę zwraca duża rozbieżność liczb dla Fe. Podczas gdy nasze liczby oscylują w zakresie 190–280 mg kg^{-1}, czeska liczba wynosi jedynie 60 mg kg^{-1}. Wartość ta wydaje się zupełnie niedopasowana do naszych warunków. W wykorzystywanym przez nas zbiorze liczącym 1921 próbek, jedynie 6 z nich wykazywało zawartość Fe w glebie równą lub niższą od 60 mg kg^{-1}. Porównując liczby należy pamiętać, że nasze zostały wyznaczone specjalnie dla pszenicy, podczas gdy czeskie nie uwzględniają różnej wrażliwości poszczególnych gatunków roślin. Ponadto czeskie liczby są zwykłym przeliczeniem z liczb dla DTPA przy wykorzystaniu stosunkowo niewielkiego zbioru 95 (147 dla B) próbek glebowych.

Porównywanie liczb granicznych zaprezentowanych w tej pracy z liczbami opracowanymi dla ryżu w Indiach (Seth et al. 2018) lub stanie Arkansan USA (Slaton et al. 2002) jest mniej uzasadnione ze względu na zupełnie inne warunki klimatyczno-glebowe panujące w tych rejonach (tab. 12).

Pomimo wykazanej wiarygodności zaproponowanych w niniejszej pracy liczb, należy zdawać sobie sprawę, że najlepszą metodą opracowania granicy niedoboru mikroelementów w glebie byłoby przeprowadzenie ścisłych doświadczeń polowych, które umożliwiłyby ocenę reakcji roślin na nawożenie mikroelementami. Pozytywna reakcja lub brak reakcji rośliny na nawożenie, przy określonej zawartości mikroelementu w glebie, byłaby najlepszym wyznacznikiem niezbędnego dla niej poziomu zawartości mikroskładnika w glebie. W takim przypadku konieczne byłoby zlokalizowanie co najmniej kilkudziesięciu doświadczeń na terenie całego kraju w różnych warunkach glebowo-klimatycznych, które modyfikują dostępność mikroelementów dla roślin. Ze względów organizacyjnych i finansowych taka metoda jest trudna do zrealizowania.

LITERATURA

Adiloglu A., Kursun I., 2003. Determination of suitable chemical extraction methods for available zinc content of paddy soils at thrace region in Turkey. Communications in Soil Science and Plant Analysis 34(17–18): 2607–2617.

Antonkiewicz J., Kołodziej B., Bielińska E.J., Gleń-Karolczyk K., 2019. Research on the uptake and use of trace elements from municipal sewage sludge by multiflora rose and Virginia fanpetals. Journal of Elementology 24(3): 987–1005.

Başar H., 2009. Methods for estimating phytoavailable metals in soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis 40(7–8): 1087–1105.

Bergmann W., 1992. Nutritional disorders of plants-development, visual and analytical diagnosis. Gustav Fischer Verlag, Jena, Stuttgart, New York.

Black A., McLaren R.G., Reichman S.M., Speir T.W., Condron L.M., 2011. Evaluation of soil metal bioavailability estimates using two plant species (L. perenne and T. aestivum) grown in a range of agricultural soils treated with biosolids and metal salts. Environmental Pollution 159(6): 1523–1535.

Boreczek B., Sumorek-Gołąbek A., Janda B., 2012. Wielopierwiastkowa analiza gleb metodą Mehlich III. Główne Laboratorium Analiz Chemicznych IUNG-PIB, Puławy: 17 pp. (materiały niepublikowane do użytku wewnętrznego).

TABELA 12. Liczby graniczne niedoboru mikroelementów w glebie proponowane przez innych autorów
TABLE 12. Limits of micronutrient deficiency in soil proposed by other authors

Autor/Author	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Slaton et al. 2002	x	x	x	x	pH 6,2: 1,3 pH 7,0: 3,5 pH 7,8: 4,2
Seth et al. 2018	pH 5,1: 0,40 pH 6,2: 0,65	x	x	x	pH 5,1: 2,15 pH 6,2: 1,27
Zbiral 2016	gleby lekkie light soils <0,55 gleby średnie medium soils <0,70 gleby ciężkie heavy soils <0,85	zboża cereal <2,0 inne others <1,6	wszystkie gleby all soils < 60,0	wszystkie gleby all soils < 45,0	wszystkie gleby all soils < 2,2

Brennan D., Coulter B., Mullen G., Courtney R., 2008. Evaluation of Mehlich 3 for extraction of copper and zinc from Irish grassland soils and for prediction of herbage content. Communications in Soil Science and Plant Analysis 39(13–14): 1943–1962.

Bortolon L., Gianello C., 2012. Multielement extraction from southern Brazilian soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis 43(12): 1615–1624.

Fotyma M., Kęsik K., Lipiński W., Filipiak K., Purchała L., 2015. Testy glebowe jako podstawa doradztwa nawozowego. Studia i Raporty IUNG-PIB 42(16): 9–51.

Gediga K., Spiak Z., Piszcz U., Bielecki K., 2015. Suitability of different soil extractants for determination of available Cu and Mn contents in Polish soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis 46: 81–93.

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.

Kabala C., Galka B., Labaz B., Anjos L., de Souza Cavassani R., 2018. Towards more simple and coherent chemical criteria in a classification of anthropogenic soils: A comparison of phosphorus tests for diagnostic horizons and properties. Geoderma 320: 1–11.

Kabata-Pendias A., Mukherjee A.B., 2007. Trace elements from soil to human. Springer Science & Business Media: 550 pp.

Kabata-Pendias A., Pendias H., 2001.Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Boca Raton, Fla., USA: 413 pp.

Kantek K., Korzeniowska J., 2013. The usefulness of Mehlich 3 and 1 M HCl extractant to assess copper deficiency in soil for environmental monitoring purpose/Przydatność ekstrahentów Mehlich 3 i 1 M HCl do oceny niedoborów miedzi w glebie pod kątem monitoringu środowiska. Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych 24(3): 1–5.

Kępka W., Antonkiewicz J., Gambuś F., Witkowicz R., 2017. The effect of municipal sewage sludge on the content, use and mass ratios of some elements in spring barley biomass. Soil Science Annual 68(2): 99–105.

Kęsik K., Jadczyszyn T., Lipiński W., Jurga B., 2015. Adaptacja testu Mehlicha 3 do rutynowych oznaczeń zawartości fosforu, potasu i magnezu w glebie. Przemysł Chemiczny 94(6): 973–976.

Kęsik K., Lipiński W., Jadczyszyn 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 pp.

Khan M.A.R., Bolan N.S., 2005. Soil test to predict the copper availability in pasture soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis 36(17–18): 2601–2624.

Korzeniowska J., 2008a. Response of ten winter wheat cultivars to boron foliar application in a temperate climate (South West Poland). Agronomy Research 6(2): 471-476.

Korzeniowska J., 2008b. Potrzeby nawożenia pszenicy cynkiem, miedzią i borem w warunkach glebowo-klimatycznych Polski. Monografie i Rozprawy Naukowe 20, IUNG-PIB Puławy: 92 pp.

Korzeniowska J., Stanisławska-Glubiak E., 2015. Comparison of 1 M HCl and Mehlich 3 for assessment of the micronutrient status of polish soils in the context of winter wheat nutritional demands. Communications in Soil Science and Plant Analysis 46(10): 1263–1277.

Korzeniowska J., Stanisławska-Glubiak E., Lipiński W., 2016. Porównanie wyników ekstrakcji mikroelementów z gleby roztworem 1 M HCl i Mehlich 3. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu: Rolnictwo 619: 59–68.

Lipiński W., 2019. Agrochemiczne właściwości gleb użytkowanych rolniczo. Inżynieria Ekologiczna 20(1): 1–12.

Liu J., Liao Z., Hu C., Qiu W., Sun X., Tan Q., 2011. Relationship between Mehlich-3, ASI and routine methods of soil available nutrients analysis for paddy soils in China. Journal of Food, Agriculture & Environment 9(1): 516–520.

Loide V., Noges M., Rebane J., 2005. Assessment of the agrochemical properties of the soil using the extraction solution Mehlich 3 in Estonia. Agronomy Research 3(1): 73–80.

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.

Menzies N.W., Donn M.J., Kopittke P.M., 2007. Evaluation of extractants for estimation of the phytoavailable trace metals in soils. Environmental Pollution 145(1): 121–130.

Mercik S., Stępień W., Matysiak B., 2004. Mobilność i pobieranie miedzi oraz cynku przez rośliny w zależności od właściwości gleby. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych 502: 235–245.

Ostatek-Boczyński Z., Lee-Steere P., 2012. Evaluation of Mehlich 3 as a universal nutrient extractant for Australian sugarcane soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis 43: 623–630.

Rodriguez B., Ramirez R., 2005. A soil test for determining available copper in acidic soils of Venezuela. Interciencia 30(6): 361–364.

Rutkowska B., Szulc W., Łabętowicz J., 2004. The effect of the content of organic carbon in the soil on the chemical composition of the soil solution. Polish Journal of Soil Science 37: 105–12.

Rutkowska B., Szulc W., Łabętowicz J., 2006. Skład granulometryczny gleby jako czynnik determinujący stężenie jonów w roztworze glebowym. Journal of Elementology 11(1): 89–98.

Sarto M.V.M., Steiner F., Lana M.C., 2011. Assessment of micronutrient extractants from soils of Parana, Brazil. Revista Brasileira de Ciência do Solo 35(6): 2093–2103.

Seth A., Sarkar D., Masto R.E., Batabyal K., Saha S., Murmu S., Das R., Padhan D., Mandal B., 2018. Critical limits of Mehlich 3 extractable phosphorous, potassium, sulfur, boron and zinc in soils for nutrition of rice (*Oryza sativa* L.). Journal of Soil Science and Plant Nutrition 18(2): 512–523.

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, WI: 219–233 pp.

Sedlar O., Balík J., Kulhanek M., Cerny J., Kos M., 2018. Mehlich 3 extractant used for the evaluation of wheat-available phosphorus and zinc in calcareous soils. Plant, Soil and Environment 64(2): 53–7.

Slaton N.A., Wilson Jr C.E., Norman R.J., Gbur Jr E.E., 2002. Development of a critical Mehlich 3 soil zinc concentration for rice in Arkansas. Communications in Soil Science and Plant Analysis 33(15–18): 2759–2770.

Stanisławska-Glubiak E., Korzeniowska J., 2007. Zasady nawożenia mikroelementami roślin uprawnych. Studia i Raporty IUNG-PIB 8: 99–110.

Stanisławska-Glubiak E., Korzeniowska J., Lipiński W., 2019. Opracowanie liczb granicznych niedoboru mikroelementów w glebie oznaczanych przy użyciu ekstrahenta Mehlich 3 dla polskich warunków glebowych. Część II. Rzepak. Soil Science Annual 70(4): 324-330.

Zalecenia nawozowe. Praca zbiorowa. 1990. Część I. Liczby graniczne do wyceny w glebach makro- i mikroelementów. Wydawnictwo IUNG Puławy P(44): 1–26.

Zbíral J., 2016. Determination of plant-available micronutrients by the Mehlich 3 soil extractant-a proposal of critical values. Plant, Soil and Environment 62(11): 527–531.

Zbíral J., Nemec P., 2000. Integrating of Mehlich 3 extractant into the Czech soil testing scheme. Communications in Soil Science and Plant Analysis 31(11–14): 2171–2182.

Received: October 2, 2019
Accepted: November 8, 2019
Associated editor: C. Kabała

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

Abstract: To implement the Mehlich 3 method in Polish agro-chemical laboratories, limit values for deficiency of B, Cu, Fe, Mn and Zn in soil for wheat were developed. The values were developed on the basis of 1921 fields with wheat, evenly distributed throughout Poland. Soil samples were collected from these fields in 2016, together with the plants growing on them, at the stage of stem elongation (BBCH 30/31). The concentration of micronutrients was determined in all soil and plant samples. In addition, pH, texture, and the content of organic carbon and available phosphorus were determined in soil samples. Moreover, grain yield after wheat harvest was estimated for all fields. Limit values were developed by two independent methods: 1) the regression equation method and 2) the so-called high yield method. In the first case, the limit microelement concentration in soil was calculated from the equation describing the relationship between the bioaccumulation factor (R/G) and a specific soil feature (n=1921). The bioaccumulation factor is the quotient of the concentration of a micronutrient in a plant (R) and its concentration in the soil (G) determined by the Mehlich 3 method. The equations were constructed using the Stagraphics program. For each micronutrient, 8 models were tested in search for the equation with the highest determination coefficient r^2. Limit values were calculated after substituting the critical value of microelements in the plant (R) to the selected model and transforming the equation accordingly. The basis of the second method was to separate the "high yield group" ≥7.0 t ha^{-1} (n=578) from the entire data set. In this group, lower quintiles for the Mehlich 3-concentration of individual microelements in soil were calculated. The lower quintiles (QU1) were taken as limit values. It was assumed that QU1 is a good indicator of the lowest micronutrient concentration in the soil at which a yield of 7.0 t ha^{-1} or higher can be obtained. The comparison of the values calculated with the regression equations method and the high yield method showed their similarity, which confirmed the reliability of these values. The proposed values define the limit for low microelements concentration in soil determined with the Mehlich 3 method, below which wheat fertilization with these nutrients is recommended.

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