

**Mariusz Fotyma, Kazimierz Kęsik, Wojciech Lipiński¹, Krystyna Filipiak,
Leszek Purchała**

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

¹Krajowa Stacja Chemiczno-Rolnicza w Warszawie

TESTY GLEBOWE JAKO PODSTAWA DORADZTWA NAWOZOWEGO*

Słowa kluczowe: testy glebowe, test Mehlich 3, kalibracja testu, metoda DRIS

Wstęp

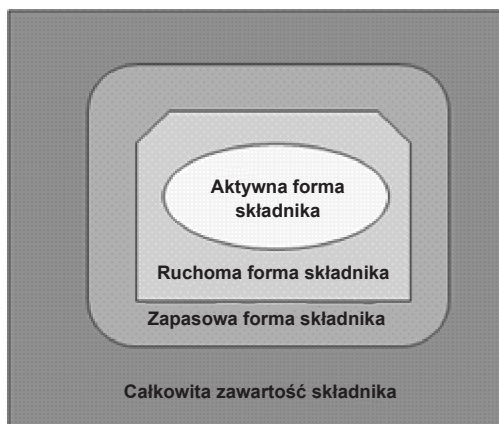
Testy glebowe stanowią podstawę apriorycznego, to znaczy obejmującego okres przed siewem lub sadzeniem roślin, doradztwa nawozowego. W grupie testów glebowych wiodącą pozycję zajmują testy chemiczne polegające na ekstrakcji i oznaczaniu zawartości tak zwanych przyswajalnych form składników mineralnych (6). Przedmiotem tej pracy są chemiczne testy oznaczania przyswajalnych form fosforu, potasu i magnezu oraz odczynu gleby (pH). Nawożenie azotem oraz mikroelementami stanowić będzie przedmiot oddzielnych opracowań. Na system nawożenia wykorzystujący testy glebowe składają się trzy zasadnicze elementy: wybór testu, kalibracja testu oraz określenie wielkości dawek nawozów. Artykuł obejmuje dwa pierwsze z wymienionych elementów.

Wybór testu glebowego

W poszczególnych krajach europejskich stosuje się różne testy glebowe, co wynika w większej mierze z tradycji i przyjętego kierunku badań agrochemicznych, niż ze zróżnicowania warunków glebowych i klimatycznych. Teoretycznie o wyborze testu powinny decydować trzy czynniki: komplementarność testu z procesami przemian składnika w glebie, uniwersalność i łatwość procedur laboratoryjnych, wysoka korelacja wartości testu ze wskaźnikami roślinnymi. Przebieg procesów glebowych

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 3.1 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

jest odmienny dla poszczególnych składników mineralnych. W uproszczeniu można jednak przyjąć, że wszystkie składniki mineralne występują w formach aktywnej, ruchomej i zapasowej (rys.1).



Rys. 1. Formy występowania składnika w glebie.

Każda następna forma składnika obejmuje wszystkie formy poprzednie (11)

Forma aktywna obejmuje jony proste i kompleksowe danego pierwiastka znajdujące się w roztworze glebowym, forma ruchoma – składniki w związkach rozpuszczalnych lub adsorbowane przez fazę stałą gleby, a forma zapasowa – składniki wbudowane w minerały glebowe lub glebową substancję organiczną. Składniki w formie aktywnej są bezpośrednio dostępne dla korzeni roślin, ale ich aktualne stężenie w roztworze glebowym jest zbyt małe w zestawieniu z potrzebami pokarmowymi roślin. Składniki w formie aktywnej są uzupełniane z formy ruchomej w wyniku procesów rozpuszczania lub desorpcji z fazy stałej gleby. Procesy te zachodzą stosunkowo szybko w skali jednego okresu wegetacyjnego roślin. Pomiędzy formą ruchomą i zapasową istnieje również stan równowagi, ale procesy przemian ustalają się w długim okresie czasu i składniki w formie stałej nie są praktycznie dostępne dla roślin. Chemiczne testy glebowe powinny pozwalać na ekstrakcję z gleby całej ilości składnika w formie aktywnej i określonej jego ilości w formie ruchomej. Suma tak wyodrębnionej ilości składnika określana jest potocznie jako forma przyswajalna (10).

Komplementarność testu z procesami przemian składnika w glebie

Odczyn i kwasowość gleby, wartość pH

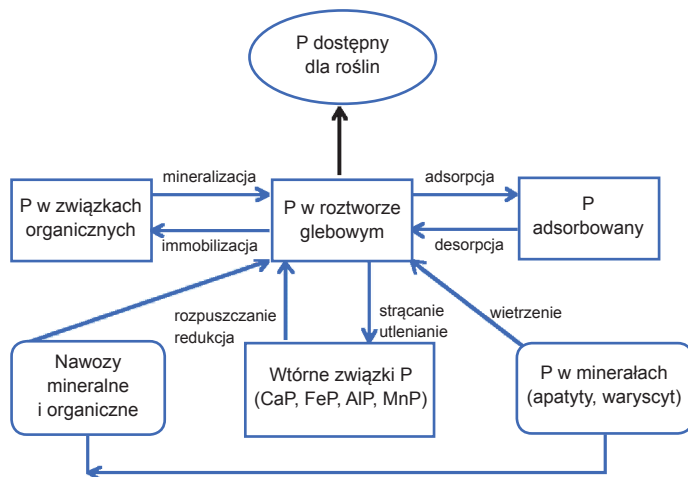
Odczyn gleby, w dużym uproszczeniu jest miarą równowagi pomiędzy jonami „kwaśnymi” i „zasadowymi”. Do jonów kwaśnych należą kation wodoru H^+ i kation glinu Al^{3+} , natomiast jony zasadowe to aniony OH^- i HCO_3^- . Kationy występują w stanie wolnym w roztworze glebowym i w stanie związanym (adsorbowanym)

w glebowym kompleksie sorpcyjnym. Jony glinu w roztworze glebowym ulegają hydrolizie, w toku której uwalniają się jony wodorowe. Ostatecznie o odczynie roztworu glebowego decyduje stężenie, a właściwie aktywność jonów wodorowych. Aktywność jonów wodorowych wyrażona w mili równoważnikach H^+ jest bardzo mała i dlatego już w 1909 r. Sorensen (5) zaproponował jako miarę odczynu ujemny logarytm naturalny tej aktywności $pH = -\log A_{H^+}$. Stała dysocjacji wody destylowanej $K_w = A_{H^+} + A_{OH^-} = 10^{14}$. Po zlogarytmowaniu otrzymujemy $pH^+ + pOH^- = 14$. Przy wartości $pH = 7$ aktywności jonów H^+ i OH^- są jednakowe i odczyn wody jest obojętny. Wartości pH poniżej 7 wskazują na przewagę jonów H^+ i odczyn kwaśny, a wartości powyżej 7 – na przewagę jonów OH^- i odczyn zasadowy. Wartość pH jest podstawową miarą odczynu gleby, a właściwie odczynu roztworu glebowego. Dla celów agrotechnicznych pomiaru pH dokonuje się jednak nie w roztworze glebowym, a w określonym roztworze ekstrakcyjnym. Najczęściej stosowanymi roztworami są woda, $0,01 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3} \text{ CaCl}_2$ i $1 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3} \text{ KCl}$. Wartości pH tej samej gleby mierzone w trzech roztworach ekstrakcyjnych układają się w szereg: $pH_{H_2O} > pH_{CaCl_2} > pH_{KCl}$. Wynika to z praw wymiany jonowej, gdyż kationy Ca^{2+} lub K^+ wypierają z kompleksu sorpcyjnego pewne ilości kationów H^+ i Al^{3+} stanowiących źródło kwasowości gleby. Jest to część tak zwanej kwasowości wymiennej, która nie ujawnia się, jeżeli roztworem ekstrakcyjnym jest czysta woda (19). Wartość pH stanowi podstawowy wskaźnik stanu żyzności gleby, gdyż koreluje bardzo silnie z szeregiem wskaźników biologicznych, chemicznych i fizycznych tego stanu. Nie może ona jednak stanowić jedynej podstawy regulacji odczynu, to znaczy naliczania wielkości dawek nawozów wapniowych. Zastosowanie wapna uruchamia bowiem kwasowość wymienną, wielokrotnie większą od kwasowości czynnej roztworu glebowego. Obok odczynu gleby konieczne jest zatem oznaczanie potrzeb jej wapnowania. Potrzeby wapnowania można oznaczyć metodami pośrednimi lub bezpośrednimi. W Polsce stosuje się metodę pośrednią, w której oprócz kwasowości czynnej, czyli wartości pH_{KCl} , uwzględnia się teksturę gleby (kategorie agronomiczne) jako prostą, aczkolwiek niedoskonałą, miarę jej pojemności sorpcyjnej. W większości krajów europejskich do oznaczania potrzeb wapnowania stosuje się metody bezpośrednie poprzez pomiar kwasowości wymiennej w różnych roztworach buforowych (5). Do zagadnienia tego powrócono w ostatniej części artykułu.

Procesy przemian fosforu w glebie

Nie licząc azotu, najbardziej złożone są przemiany fosforu w glebie. Całkowita zawartość fosforu w glebach waha się w szerokich granicach $35\text{--}5300 \text{ mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$ z medianą ok. $800 \text{ mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$. W warstwie $0\text{--}30 \text{ cm}$ gleby mineralnej o przeciętnej gęstości 1500 kg m^{-3} znajduje się zatem około 3600 kg P , co odpowiada potrzebom pokarmowym ponad 100 dużym plonom roślin. Stosunek $C_{org} : P$ wynosi około $80:1$. Gdy wartość tego stosunku jest szersza niż $10:1$ następuje immobilizacja fosforu przez mikroorganizmy glebowe, w których stężenie fosforu jest o rząd wielkości

większe w porównaniu z roślinami wyższymi. Niewielka tylko część fosforu ogólnego jest bezpośrednio dostępna dla roślin. Większość fosforu glebowego znajduje się w związkach trudno rozpuszczalnych lub nierozpuszczalnych w wodzie (rys. 2).



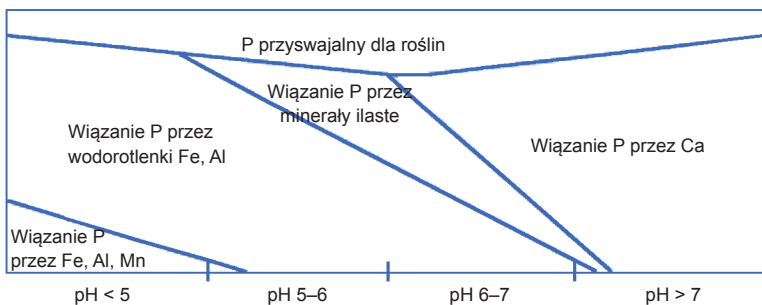
Rys. 2. Formy i obieg fosforu w agrosystemach

Źródło: Soon, 2008 (33)

W roztworze glebowym gleb o odczynie kwaśnym fosfor występuje w formie pierwszorzędowych H_2PO_4^- , a w glebach o odczynie lekko kwaśnym i obojętnym w formie drugorzędowych HPO_4^{2-} ortofosforanów. Dopiero w glebach o odczynie alkalicznym pojawiają się fosforany trzeciorzędowe PO_4^{3-} . Stężenie jonów ortofosforanowych łatwo dostępnych dla roślin nie przekracza jednak na ogół $1 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ albo około $1,5 \text{ kg P-PO}_4 \cdot \text{ha}^{-1}$. W większości gleb fosfor w związkach organicznych, głównie fityna i fosfolipidy, stanowi 30–60%, a w glebach o wysokiej zawartości substancji organicznej nawet do 90% ogólnej ilości tego pierwiastka. Fosfor z tych związków przechodzi w formę rozpuszczalną (jonową) w wyniku procesu mineralizacji zachodzącego pod wpływem enzymu fosfatazy uwalnianego do środowiska z korzeni roślin i biomasy mikroorganizmów. Krótkotrwała ekstrakcja gleby za pomocą testów chemicznych nie wykrywa tej znacznej ilości fosforu.

W kwaśnych glebach mineralnych zawierających znaczne ilości jonów żelaza i glinu oraz półtoratlenków obu metali tworzą się słabo rozpuszczalne ich połączenia z ortofosforanami o charakterze pojedynczych lub podwójnych kompleksów znanych jako hydroksyfosforany. Końcowymi produktami tych reakcji są nierozpuszczalne fosforany glinu – waryscyt ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), i żelaza – strengit ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). W glebach zawierających minerały ilaste typu kaolinitu powstają połączenia pomiędzy zewnętrznymi grupami $-\text{OH}$ tych minerałów i jonami fosforanowymi o różnej, na ogół słabej rozpuszczalności. Związki żelaza i glinu z fosforanami wykazują określoną

rozpuszczalność w roztworach ekstrakcyjnych o niskim pH. Jak już wspomniano, roztwory takie dominują w testach fosforu przyswajalnego stosowanych w krajach europejskich, m.in. w Polsce (Egner-Riehm DL). Siłę ekstrakcyjną roztworów kwaśnych zwiększają zawarte w niektórych z nich związki tworzące kompleksy z żelazem i glinem oraz chroniące fosforany przed wiązaniem z tymi metalami. W zyskującym popularność teście Mehlich 3 związkiem kompleksującym jest EDTA. Rozpuszczalność fosforanów żelaza zależy również od potencjału oksydoredukcyjnego gleby. W glebach dobrze natlenionych przeważają fosforany żelaza trójwartościowego o słabej rozpuszczalności, a w glebach nadmiernie uwilgotnionych (zalewanych) – znacznie lepiej rozpuszczalne związki żelaza dwuwartościowego. W glebach o odczynie alkalicznym występują natomiast wolne i adsorbowane wymiennie jony wapnia Ca^{2+} , a także węglan wapnia CaCO_3 . W glebach tych tworzą się trudno rozpuszczalne fosforany wapnia, jak hydroksy-, oxy- i fluoroapatyty $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_3\text{F}$. Związki te są nierozpuszczalne w wodzie, natomiast ulegają rozpuszczaniu w kwaśnych roztworach ekstrakcyjnych stosowanych w testach. Oceniana takimi testami ich przyswajalność dla roślin może być pozornie duża. Z tego powodu w Wielkiej Brytanii, gdzie przeważają gleby alkaliczne, stosuje się test Olsena lub test H_2O . Na rysunku 3 przedstawiono w dużym uproszczeniu związki fosforu przeważające w glebach o różnym odczynie i rozpuszczalność fosforu wynikającą z charakteru tych związków.



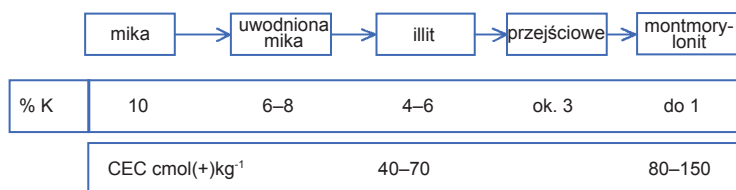
Rys. 3. Przeważalność fosforu zależnie od pH gleby

Źródło: Kim, 1993 (19), zmodyfikowane

Procesy przemian potasu w glebie

Potas, po tlenie, wodorze i glinie, należy do najbardziej rozpowszechnionych pierwiastków w przyrodzie. Stanowi on przeciętnie 2,6% w skorupie ziemskiej i całkowite rezerwy tego pierwiastka w glebie, w zestawieniu z potrzebami pokarmowymi roślin, wydają się w praktyce niewyczerpywalne. Z uwagi na przedmiot tej pracy interesujące są dwie główne formy występowania potasu w glebie – forma

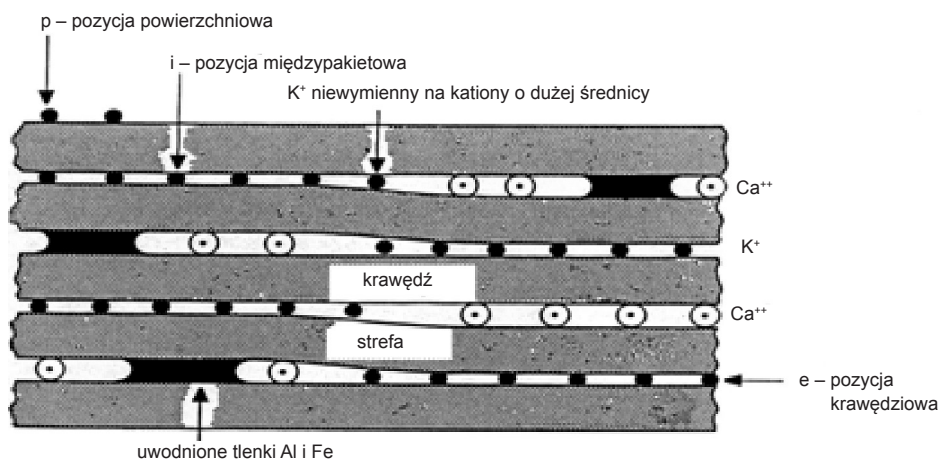
strukturalna i jonowa. Potas strukturalny jako bezwodny kation K^+ o średnicy 0,266 nm tworzy wiązania koordynacyjne z jonami krzemu i glinu w siatkach pierwotnych minerałów glinokrzemianowych. Należy tu przede wszystkim wymienić minerały typu skaleni, jak ortoklaz – $KAlSi_2O_3$ i mikroklin – $KAlSi_2O_3$ oraz typu mik jak muskowit – $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ i biotyt – $K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$. Żaden z testów potasu przyswajalnego nie ekstrahuje składnika z tych minerałów. W procesie wietrzenia minerałów glinokrzemianowych, który przebiega w kierunku od miki do montmorylonitu i wermikulitu (rys. 4), uwalniają się stopniowo jony potasu.



Rys. 4. Przebieg wietrzenia pierwotnych glinokrzemianów (muskowit)

Źródło: Schroeder, 1984 (30)

Miki zawierają ok. 10% K, a minerały dwuwarstwowe (montmorylonit) zaledwie poniżej 1% K. Minerały dwuwarstwowe mają natomiast znacznie większą pojemność wymienną w stosunku do kationów, która osiąga nawet 200 cmol(+) \cdot kg⁻¹ w porównaniu z ok. 10 cmol(+) \cdot kg⁻¹ dla minerałów jednowarstwowych (kaolinit). Uwolniony do roztworu glebowego jon potasu występuje w formie uwodnionej o średnicy 0,464 nm i liczbie hydratacyjnej 7. Stężenie jonu potasu w roztworze glebowym jest stosunkowo niewielkie, jakkolwiek znacznie większe od jonu fosforanowego i wynosi 0,1–1,0 mmol $K^+ \cdot dm^{-3}$ to znaczy do 40 mg $K^+ \cdot dm^{-3}$. W warstwie gleby o miąższości 30 cm, optymalnie uwilgotnionej, zawartość potasu w roztworze glebowym wynosi 5–25 kg $K \cdot ha^{-1}$ i jest większa o rząd wielkości w porównaniu z zawartością jonów fosforanowych. Ta forma potasu ulega łatwo ekstrakcji wszystkimi roztworami stosowanymi w testach potasu przyswajalnego dla roślin, nawet w teście wodnym. Jon potasu ulega łatwo sorpcji na powierzchniach zewnętrznych i w przestrzeniach międzypakietowych minerałów ilastych oraz na powierzchniach tlenków oraz wodorotlenków żelaza i glinu, a także na cząsteczkach związków organicznych. Zależnie od miejsca sorpcji i siły wiązania sorpcja jonu potasowego może mieć charakter wymienny lub trudno wymienny (rys. 5). Siły wiązania jonu K^+ są znacznie mniejsze na powierzchniach zewnętrznych i krawędziach minerałów glinokrzemianowych (powierzchnie p i e na rys. 5), a znacznie większe na powierzchniach wewnętrznych (pozycja i na rys. 5).



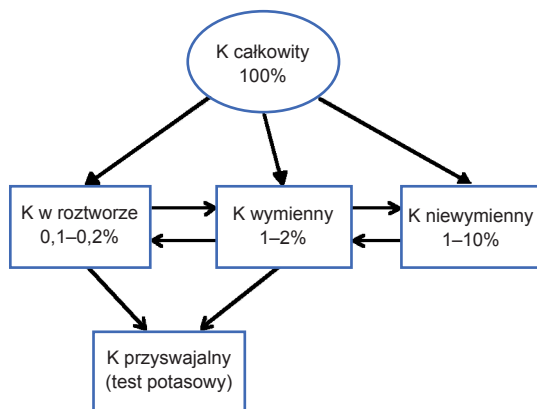
Rys. 5. Pozycje zajmowane przez jony potasu w jednostce strukturalnej uwodnionego illitu

Źródło: Mengel i Kirkby, 1982 (22)

O sile wiązania jonów potasowych K^+ świadczy wartość stałej równowagi wymiany tych jonów na jony wapnia Ca^{2+} znana jako współczynnik Gajona K_G . Wyższa wartość tego współczynnika świadczy o większej sile wiązania jonu potasowego. Wartości współczynników Gajona wynoszą $2,21 \text{ (mmol} \cdot \text{dm}^{-3})^{-1/2}$ w pozycji p , $102 \text{ (mmol} \cdot \text{dm}^{-3})^{-1/2}$ w pozycji e i zbliża się do nieskończoności w pozycji i . Kationy różnych metali znajdujące się w roztworze glebowym lub roztworze ekstrakcyjnym stosowanym w testach glebowych mają różną zdolność uwalniania (wymiany) potasu adsorbowanego wymiennie i trudno wymiennie. Większą zdolność wymiany mają kationy o mniejszej średnicy i większej wartościowości, co wyznacza ich miejsce w tzw. szeregu liotropowym. Szereg ten układa się w kierunku $Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$, a więc jon potasu uwalniany jest najłatwiej. Stan potasowy gleby zależy zatem od zawartości trzech form i równowagi procesów zachodzących pomiędzy tymi formami składnika (rys. 5).

Potas w roztworze glebowym stanowi zaledwie 0,1–0,2% ogólnej zawartości składnika, potas adsorbowany wymiennie (w pozycjach p i e) ok. 1–2% i wreszcie potas adsorbowany niewymiennie (w pozycji i) ok. 1–10% potasu ogólnego (22). Reszta potasu jest trwale związana w siatkach minerałów ilastych i ulega jedynie powolnemu uwalnianiu w wyniku procesów wietrzenia minerałów. O zaopatrzeniu roślin w ten pierwiastek w przeciągu jednego, a nawet kilku sezonów wegetacyjnych decydują formy potasu w roztworze glebowym i potasu wymiennego. W praktyce wszystkie roztwory ekstrakcyjne używane w testach chemicznych mają podobną zdolność do uwalniania (wymiany) jonów potasu z obydwu tych form. Punktem odniesienia jest zawsze ilość potasu wymiennego przechodzącego do roztworu octanu amonowego, który w niektórych krajach stanowi test potasu przyswajalnego. Z reguły jednak

stosuje się testy podwójne dla fosforu i potasu (jeden roztwór ekstrakcyjny), a ilości tak ekstrahowanego składnika zawsze wysoko korelują z ilością potasu wymiennego.



Rys. 6. Formy potasu w glebie

Źródło: Fotyma, 2011 (13)

Procesy przemian magnezu w glebie

Magnez znajduje się w glebach w mniejszym niż potas, ale znaczącym stężeniu podawanym średnio na około 0,5%. Do najczęściej występujących w glebach minerałów zawierających magnez należą węglany (dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) oraz krzemiany (serpentytyn $\text{H}_4\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_9$). W wyniku procesów wietrzenia, a następnie rozpuszczania tych minerałów zawarty w nich magnez przechodzi do roztworu glebowego w formie jonów prostych Mg^{2+} lub par jonów połączonych z anionami HCO_3^- , SO_4^{2-} i Cl^- . Rozpuszczalność dolomitu zależy w decydującym stopniu od zawartości CO_2 w roztworze glebowym i przebiega zgodnie z reakcją: $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 4\text{HCO}_3^-$. Stężenie magnezu w roztworze glebowym jest mniejsze, lub znacznie mniejsze od stężenia jonów potasu i wynosi średnio ok. $10 \text{ mg Mg}^{2+} \cdot \text{dm}^{-3}$ (22). Średnica uwodnionego jonu magnezu jest większa (0,856 nm), a jego liczba hydratacyjna (36) znacznie większa od analogicznych wartości dla jonu potasu. W szeregu liotropowym jon magnezu znajduje się dalej niż jon wapnia, a bliżej niż jon potasu i w procesie wymiany jest uwalniany do roztworu trudniej od tego ostatniego. Magnez, podobnie jak wapń, a w przeciwieństwie do potasu, nie ulega natomiast sorpcji niewymiennej. O dostępności magnezu dla roślin bardziej decydują stosunki Al:Mg i Ca:Mg, niż zawartość samego magnezu (32). Przyjmuje się, że w glebach o uregulowanym odczynie (pH 5,5–6,5), z wyjątkiem gleb bardzo lekkich, zawartość tego pierwiastka w formach dostępnych dla roślin jest prawie

zawsze wystarczająca. Z tego względu testom przyswajalności magnezu poświęcono znacznie mniej uwagi niż testom przyswajalności potasu. Do ekstrakcji magnezu stosuje się najczęściej „słabe” roztwory ekstrakcyjne, to znaczy wodę lub roztwór chlorku wapnia (por. tab. 1). Jedną z zalet testu Mehlicha jest oznaczanie zawartości wszystkich kationów, w tym również kationu magnezu.

Uniwersalność i łatwość procedur laboratoryjnych

Jak już wspomniano przy fosforze, ilość chemicznych testów glebowych nawet na obszarze Europy jest bardzo znaczna i wszystkie, w mniejszym lub większym stopniu, spełniają wymóg komplementarności z glebowymi procesami przemian odpowiednich składników. Zdecydowana większość testów nastawiona jest na oznaczanie ruchomej (rys. 1) formy składnika, a tylko nieliczne na oznaczanie formy aktywnej lub, przynajmniej częściowo, formy zapasowej. W tej sytuacji czynnikami w znacznym stopniu decydującymi o wyborze testu są: uniwersalność i prostota testu oraz taniść procedur laboratoryjnych. Przez uniwersalność należy rozumieć możliwość oznaczania w jednym roztworze ekstrakcyjnym przynajmniej kilku składników mineralnych. W tabeli 1 zestawiono testy glebowe stosowane w wybranych krajach europejskich wraz z ich krótką charakterystyką.

Tabela 1

Testy glebowe stosowane w wybranych krajach europejskich

Nazwa testu ¹	Skład roztworu	Zasada ekstrakcji	Oznaczone składniki	Kraj
AL – Egner (1960)	mleczan amonu, kwas octowy, pH = 3,7	hydroliza kwaśna, wymiana jonowa	P, K	Belgia, Węgry, Litwa, Norwegia, Słowenia, Szwecja
CAL – Schuler (1969)	octan wapnia, mleczan wapnia, kwas octowy, pH = 4,1	hydroliza kwaśna, wymiana jonowa	P, K	Austria, Niemcy
DL – Egner, Riehm (1962)	mleczan wapnia, kwas chlorowodorowy, pH = 3,7	hydroliza kwaśna, wymiana jonowa	P, K	Łotwa, Polska
Olsen (1954)	dwuwęglan sodu, pH = 8,5	kompleksowanie	P	Dania, Francja, Hiszpania, Wlk. Brytania, Włochy
Mehlich 3 (1984)	fluorek amonu, kwas octowy, azotan amonu, kwas azotowy, pH = 2,5	hydroliza kwaśna, wymiana jonowa	P,K,Mg (mikroelementy)	Estonia, Republika Czeska, Słowacja

cd. tab. 1

Nazwa testu ¹	Skład roztworu	Zasada ekstrakcji	Oznaczone składniki	Kraj
NH ₄ Ac EDTA (1960)	octan amonu, kwas octowy, EDTA, pH = 4,65	hydroliza kwaśna, kompleksowanie	P, K	Belgia, Szwajcaria
Bray P1 (1945)	fluorek amonu, kwas chlorodoworowy, pH < 6,8	hydroliza kwaśna, wymiana jonowa	P, K	Włochy
NH ₄ OAc	octan amonowy	wymiana jonowa	K	Wlk, Brytania
Dyer (1894)	kwas cytrynowy, pH = 7,0	hydroliza kwaśna, wymiana jonowa	P, K	Francja
Schachtschabel (1960)	CaCl ₂ , pH = 7,0	rozpuszczanie	Mg	Niemcy, Polska,
H ₂ O (1930)	woda, CO ₂	rozpuszczanie	P, K, Mg	Holandia, Szwajcaria

¹ w nawiasach podano lata opracowania testu

Źródło: Jordan-Meille i in., 2012 (16)

Jak wynika z tego zestawienia, większość testów glebowych została opracowana w połowie ubiegłego wieku, a niektóre z nich nawet w XIX w. W większości testów stosuje się kwaśne roztwory ekstrakcyjne, które powodują hydrolizę związków trudno rozpuszczalnych lub wymianę jonową. Najbardziej uniwersalny jest test Mehlich 3, którym oznaczane są wszystkie interesujące nas makroelementy (34).

Badania odczynu i zasobności gleb w przyswajalne formy makro- i mikroelementów prowadzone są w Polsce według jednolitej metodyki opartej na Polskich Normach i wytycznych IUNG w Puławach. W tym celu, dla określenia podstawowych właściwości fizykochemicznych i chemicznych gleb mineralnych wykorzystuje się następujące metody:

- pH – 1 mol KCl·dm⁻³,
- fosfor i potas przyswajalny – metoda Egnera-Riehma (DL),
- magnez przyswajalny – metoda Schachtschabela (CaCl₂ 0,0125 mol·dm⁻³).

Ocena odczynu i zasobności gleb w składniki mineralne dokonywana jest na podstawie liczb granicznych zawartych w polskich normach: PN-ISO 10390 (pH) (25), PN-R-04020 (magnez) (26), PN-R-04022 (potas) (27) i PN-R-04023 (fosfor) (28). Dodatkowo coraz częściej badany jest azot mineralny, a także mikroelementy. Te ostatnie ocenia się po ekstrakcji gleby wyciągiem 1 mol HCl·dm⁻³ (metoda Rinkisa). Metoda ta jest jednak dość często krytykowana, ale mimo to udało się w niej w jednym wyciągu uzyskać komplet niezbędnych dla roślin mikroelementów – B, Cu, Mn, Fe, Zn. Ponadto praktyka rolnicza interesuje się badaniem siarki w glebie, do ekstrakcji

której wykorzystuje się kilka różnych ekstrahentów. Tak więc różnorodność stosowanych metod badania gleb jest duża i wszelkie próby uproszczeń są bardzo wskazane.

Pojawienie się realnej możliwości wdrożenia do badań agrochemicznych metody Mehlich 3 (21) stwarza szansę uproszczenia badań, nie pozostawiając również wątpliwości, co do kwestii technicznych i ekonomicznych. W tym kontekście można dokonać porównania niektórych uwarunkowań dla stosowanych obecnie metod ekstrakcji przyswajalnych form makroelementów – P, K i Mg z uniwersalną ekstrakcją metodą Mehlich 3. Porównanie aktualnie stosowanych metod badania gleb można rozpatrywać wielokierunkowo – pod kątem zakresu stosowania metody, odczynników, czasu trwania badania, zużycia energii, bezpieczeństwa dla pracowników laboratoryjnych, bezpieczeństwa dla środowiska, jak też i pracochłonności oraz możliwości technicznych związanych ze sprzętem i aparaturą pomiarową. Niektóre ważniejsze wskaźniki porównania metod ekstrakcji i oznaczania pierwiastków na potrzeby doradztwa nawozowego zawarto w tabelach 2–7.

Tabela 2

Zakres analityczny porównywanych metod badania gleb na zawartość przyswajalnych form pierwiastków w glebie

Metoda	Zakres analityczny			
	P	K	Mg	inne (S, Ca, mikroelementy)
Metoda Egnera-Riehma DL	+	+	-	-
Metoda Schachtschabela	-	-	+	-+
Mehlich 3	+	+	+	+

+ tak; - nie; -+ możliwy (niestosowany w praktyce)

Źródło: opracowanie własne, W. Lipiński

Tabela 3

Zużycie sączków na jedną próbkę w porównywanych metodach badania gleby

Metoda	Liczba sączków (szt.)		
	P	K	Mg
Metoda Egnera-Riehma DL	1		x
Metoda Schachtschabela	x	x	1
Mehlich 3	1		

x – zakres analityczny metody nie obejmuje danego parametru

Źródło: opracowanie własne, W. Lipiński

Tabela 4

Ilość ekstrahentów stosowanych w porównywanych metodach badania gleby

Metoda	Ekstrakcja			
	P	K	Mg	inne (S, Ca, mikroelementy)
Metoda Egnera-Riehma DL	150 ml ekstrahenta (3 g gleby)		x	-
Metoda Schachtschabela	x	x	50 ml ekstrahenta (5 g gleby)	brak zastosowania w praktyce
Mehlich 3	25 ml ekstrahenta (2,5 ml gleby)			

x – zakres analityczny metody nie obejmuje danego parametru

Źródło: opracowanie własne, W. Lipiński

Tabela 5

Techniki pomiarowe stosowane w porównywanych metodach badania gleby

Metoda	Technika pomiarowa		
	P	K	Mg
Metoda Egnera-Riehma DL	kolorymetria	fotometria płomieniowa	-
Metoda Schachtschabela	-	-	spektrofotometria AA
Mehlich 3	kolorymetria (lub ICP)	fotometria płomieniowa (lub ICP)	spektrofotometria AA (lub ICP)

Źródło: opracowanie własne, W. Lipiński

Tabela 6

Czas ekstrakcji w porównywanych metodach badania gleby

Metoda	Czas ekstrakcji		
	P	K	Mg
Metoda Egnera-Riehma DL	90 min		-
Metoda Schachtschabela	-	-	1440 min (metoda statyczna)
Mehlich 3	5 min		

Źródło: opracowanie własne, W. Lipiński

Tabela 7

Inne wskaźniki porównawcze wybranych metod badania gleby

Metoda	Szacunkowa różnica w kosztach odczynników (%)	Szacunkowa różnica w pracochłonności (%)	Różnica w zużyciu wody (%)	Różnica w zużyciu energii na ekstrakcję (%)	Różnica w sprzęcie i aparaturze
Metody stosowane aktualnie	100	100	100	100	brak
Mehlich III	80	60	17	5	

Źródło: opracowanie własne, W. Lipiński

Porównanie niektórych technicznych warunków badania gleby na zawartość przyswajalnych form fosforu, potasu i magnezu, jako podstawowych wskaźników wykorzystywanych w doradztwie nawozowym, wskazuje na wiele korzyści płynących z wdrożenia do praktyki laboratoryjnej metody Mehlich 3. Metoda ta nie wymaga wymiany sprzętu i aparatury, a tym samym jej wdrożenie jest możliwe w krótkim czasie, natomiast różnice w kosztach mogą przyczynić się do znaczących korzyści w wyniku redukcji nakładów materiałowych, a w szczególności ograniczenia pracochłonności w badaniach P, K i Mg. Te pozytywne efekty mogą znacząco obniżyć koszty badania gleby zwiększyć zainteresowanie rolników badaniami agrochemicznymi i zmniejszyć nakłady w produkcji roślinnej. Pod względem laboratoryjnym test Mehlicha został sprawdzony w warunkach naszego kraju we współpracy ze służbami agrochemicznym Republiki Czeskiej i Słowacji (14). Przedmiotem dalszej części pracy jest sprawdzenie możliwości wprowadzenia tego testu w Polsce w zastępstwie testów DL –Egnera DL i Schachtschabela, a w przyszłości również testu Rinkisa dla mikroelementów.

Korelacja ze wskaźnikami roślinnymi

Ilość składnika ekstrahowanego z gleby dowolnym testem chemicznym, określana umownie jako ilość „przyswajalna” dla roślin, nie może być jednak bezpośrednio odnieszona do ich potrzeb pokarmowych. Poprawna teoretycznie metoda oceny wartości testu polega na określeniu siły związku (korelacji) pomiędzy ilością ekstrahowanego składnika a biologicznymi wskaźnikami jego dostępności dla roślin. Pojęcie dostępności składnika wchodzi w zakres fizjologii mineralnego żywienia roślin i nie należy go mylić, a tym bardziej utożsamiać z pojęciem przyswajalności. Bezpośredni pomiar ilości składnika dostępnego nie jest możliwy z nierozwijanych tutaj przyczyn teoretycznych (4). Dobre przybliżenie tej ilości stanowi zawartość składnika w pożywce wodnej o niezbyt dużym jego stężeniu, gdy nastąpi całkowite pobranie tego składnika przez uprawianą w kulturze hydroponicznej roślinę. W warunkach kontrolowanych, gdy wielkość plonu rośliny jest limitowana tylko przez badany składnik, jego ilość dostępną dla roślin określa się z przybliżeniem metodami pośrednimi lub bezpośrednimi.

W metodach pośrednich jako wskaźniki dostępności przyjmuje się najczęściej wartość b ze zmodyfikowanego równania Mitscherlicha, lub wartości E , L i A oznaczane z zastosowaniem rozcieńczenia izotopowego. Zmodyfikowane równanie Mitscherlicha po zlogarytmowaniu ma postać:

$$\log(A - y) = c(x + b)$$

gdzie:

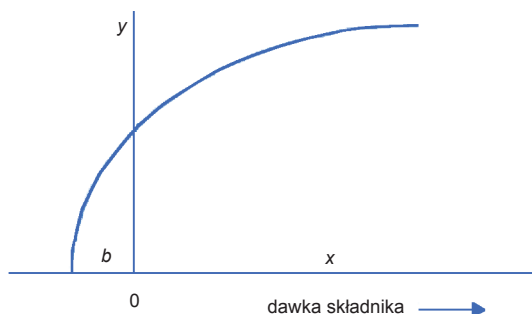
y – plon uzyskany na dawce x składnika,

A – plon maksymalny uzyskany na bardzo dużej („nieskończonej”) dawce składnika x ,

c – wskaźnik efektywności działania danego składnika w miarę wzrostu jego dawki x ,

b – wskaźnik dostępności składnika dla rośliny.

Mitscherlich przyjmował początkowo, że wartość c jest stała dla danego składnika, niezależnie od rośliny, pod którą składnik ten zastosowano. Wykres równania Mitscherlicha ma postać krzywej wykładniczej (rys. 7). Każdej następnej dawce składnika x pomnożonej przez wartość c odpowiada zatem coraz mniejszy przyrost plonu, aż do osiągnięcia plonu A . Przyjmując stałość wartości c można łatwo wyznaczyć wielkość wskaźnika dostępności składnika b , ekstrapolując krzywą plonowania na rysunku do punktu jej przecięcia z osią $(x + b)$. Mitscherlich wdrożył swoją metodę wyznaczania wskaźnika dostępności, głównie fosforu, na dużą skalę w rolnictwie Prus Wschodnich, gdzie pracował przez wiele lat w obecnym Gorzowie Wielkopolskim. Przetrwwały tam do końca ubiegłego wieku hale wegetacyjne, w których prowadzono doświadczenia w wazonach określanych do dzisiaj Jego imieniem. Metoda Mitscherlicha nie jest obecnie stosowana, ale wydaje się, że z jej wykorzystaniem zostały pierwotnie wykalibrowane testy AL, CAL i DL (tab. 1), z których test DL jest stosowany nadal w Polsce.



Rys. 7. Ideogram krzywej Mitscherlicha pokazujący sposób wyznaczania wartości b

Źródło: Black, 1993a (4)

Do wyznaczenia wartości E (od *exchangeable*), L (od Larsena – autora metody) lub A (od *availability*) stosuje się dodatek do gleby składnika nawozowego w formie izotopu promieniotwórczego, np. ^{32}P lub stabilnego, np. ^{15}N . Po pewnym czasie ustala się stan równowagi pomiędzy labilną formą tego składnika w glebie i dodaną do gleby formą izotopową. Rośliny testowe pobierają w odpowiednich proporcjach obydwie formy składnika, a formę izotopową można łatwo oznaczyć w materiale roślinnym. Po odpowiednich przeliczeniach otrzymuje się wymienione wyżej wskaźniki dostępności danego składnika zawartego w glebie (15).

W metodach bezpośrednich określa się wskaźniki dostępności składnika przez pomiar jego ilości pobranej przez rośliny z małej masy gleby całkowicie przerośniętej ich korzeniami. W najbardziej znanej klasycznej metodzie Neubaera w naczynkach zawierających 100 g gleby i 350 g przemytego piasku zasiewa się 100 nasion żyta, następnie po 17 dniach sprząta i waży gęsty porost roślinny. Ilość pobranego z gleby składnika (głównie fosfor i potas) traktowana jest jako wskaźnik jego dostępności dla roślin. Metody pośrednie i bezpośrednie nie są na ogół stosowane w warunkach polowych z uwagi na wielość czynników, poza zaopatrzeniem w dany składnik, de-

cydujących tutaj o wielkości plonu roślin. Metody te są jednak niekiedy stosowane do oceny przydatności i kalibracji testów chemicznych. Najczęściej jednak w ocenie przydatności testów jako wskaźniki dostępności przyjmuje się po prostu wielkość plonów roślin, różnicę pomiędzy plonami roślin nawożonych i nienawożonych tym składnikiem lub ilość składnika znajdującą w plonie końcowym, czy też różnicę ilości w plonie roślin nawożonych i nienawożonych. Przy klasycznym podejściu do testów chemicznych podane wyżej korelacje wyznacza się w doświadczeniach prowadzonych na polach o zróżnicowanej zawartości składnika przyswajalnego lub też na poletkach doświadczalnych, na których ilość składnika przyswajalnego została zróżnicowana w wyniku uprzedniego stosowania wzrastających jego dawek. Wyniki doświadczeń są interpretowane z zastosowaniem rachunku regresji i korelacji z wyznaczeniem odpowiednich funkcji:

$$y = f(x)$$

gdzie:

y – wartość wskaźnika roślinnego,

x – ilość składnika oznaczonego testem chemicznym.

Ilość taką można już prawidłowo określić jako ilość przyswajalną. Za „najlepszy” uważa się taki test chemiczny, którego wartości są najściślej skorelowane z prostymi wskaźnikami roślinnymi. Wszystkie testy wymienione w tabeli 1 wykazują dobrą zgodność z prostymi wskaźnikami roślinnymi i pod tym względem (wartości R^2) trudno uznać któryś z nich za „najlepszy”.

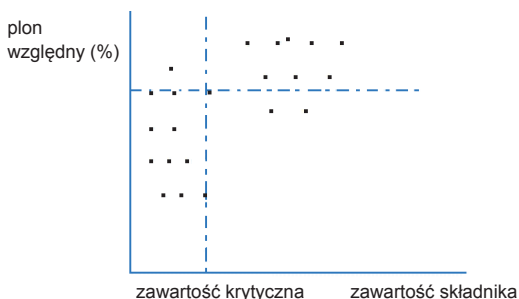
Kalibracja testu

U podstaw kalibracji testu chemicznego leży pojęcie krytycznej zawartości składnika oznaczanego danym testem. Za krytyczną uważa się zawartość składnika, przy której uprawiane rośliny nie dają zwyżek plonu pod wpływem nawożenia tym składnikiem lub uzyskiwane pod jego wpływem zwyżki plonu są nieopłacalne. Krytyczna wartość testu dzieli zatem gleby na takie, na których uprawiane rośliny reagują na nawożenie oraz na których nie wykazują reakcji na dany składniki nawozowy. Wyznaczenie krytycznej zawartości jest trudne wobec zróżnicowania warunków glebowych i klimatycznych i z tego względu częściej wyznacza się przedział tej zawartości o możliwie małej szerokości. W praktyce cały zakres zawartości składnika od bardzo małej (bliskiej zeru) do zawartości krytycznej dzieli się na kilka przedziałów lub klas określanymi umownie jako zawartość bardzo mała, mała itd. do dużej i bardzo dużej. Najczęściej stosowany jest przy tym podział pięcioklasowy. Idealna kalibracja powinna uwzględniać czynniki glebowe, klimatyczne i biologiczne, a więc gatunki lub rodzaje uprawianych roślin. W związku z tym można wyróżnić kalibracje jednokierunkowe – gdy jedynym czynnikiem jest zawartość składnika, dwukierunkowe – gdy oprócz tej zawartości występuje drugi czynnik, np. tekstura gleby czy odczyn gleby, a nawet trójkierunkowe. Kalibracje bardziej szczegółowe niż dwukierunkowa

są stosowane bardzo rzadko z uwagi na trudność wyznaczenia wielu przedziałów zawartości składnika i posługiwania się taką kalibracją w doradztwie nawozowym. Z wymienionych w tabeli 1 testów glebowych kalibrację trójkierunkową stosuje się w odniesieniu do fosforu i potasu tylko na Węgrzech, a kalibrację dwukierunkową w odniesieniu do potasu w testach DL, CAL i AL. Kalibracje testów fosforowych są z reguły jednokierunkowe. Kalibracji testów można dokonać kilkoma metodami opisanymi poniżej.

Kalibracja z wykorzystaniem wskaźników roślinnych

Kalibracja oznaczeń glebowych tą metodą przeprowadzana jest równocześnie z oceną przydatności i wyborem testu. Kalibracja wymaga prowadzenia doświadczeń ścisłych lub obserwacji z dużych pól produkcyjnych o zróżnicowanej naturalnie lub sztucznie (poprzez stosowanie wzrastających dawek nawozów) zawartości składnika z jednoczesnym zapisem wielkości plonów. Porównując (korelując) wielkość plonów z zawartością składnika, wyznacza się jego wartość krytyczną, a następnie dokonuje podziału całego przedziału zawartości na klasy testu. Jeden ze sposobów interpretacji wyników zaproponowali jeszcze w latach 70. Cate i Nelson (7). W wersji graficznej tego sposobu na wykresie współrzędnych oś y wyskalowana jest w jednostkach plonu lub zwyczaj plonu w stosunku do plonu maksymalnego, a oś x w jednostkach zawartości składnika (rys. 8). Punkty zaznaczone na wykresie odpowiadają plonom (zwyczajom plonów) dla określonej zawartości składnika. Wykres dzielony jest dwoma liniami prostopadłymi na 4 części, tak aby w lewej dolnej i prawej górnej znalazła się maksymalna liczba punktów. W punkcie przecięcia linii odczytuje się na osi y wielkość plonu (zwyczaj plonu), a na osi x krytyczną zawartość składnika ocenianego w teście. Autorzy metody zaproponowali również statystyczną interpretację wyników, co przyczyniło się do ponownego wzrostu zainteresowania tą metodą.



Rys. 8. Metoda graficzna Cate-Nelsona wyznaczenia krytycznej zawartości składnika

Źródło: Cate i Nelson, 1971 (7)

Najczęściej jednak stosowaną metodą interpretacji wyników doświadczeń polowych lub obserwacji pomiarów z pól produkcyjnych jest rachunek regresji i korelacji. Przyjmując plony lub zwyczki plonów jako zmienną zależną y, a zawartości składnika jako zmienną niezależną x uzyskuje się szereg linii regresji, z których wybiera się

funkcję najlepiej „dopasowaną” do danych doświadczalnych. Z reguły są to krzywa kwadratowa:

$$y = cx^2 + bx + a,$$

lub krzywa wykładnicza:

$$y = ab^x,$$

gdzie:

a i b – współczynniki regresji.

Za wartość krytyczną testu przyjmuje się z reguły zawartość składnika, przy której uzyskuje się 90–95% plonu maksymalnego. Jak wynika z tabeli 1, większość glebowych testów chemicznych została opracowana jeszcze w pierwszej połowie ubiegłego wieku i z tego okresu wywodzi się również ich kalibracja. Zarówno wybór testu, jak i jego kalibracja zostały w poszczególnych krajach utrwalone historycznie i istnieje duży opór przed ich zmianą zarówno ze strony służb agrochemicznych, jak i samych rolników. Nowe trendy w podejściu do nawożenia, ze szczególnym zwróceniem uwagi na aspekty środowiskowe wymagają jednak zmiany poglądów również na zagadnienie doboru testów chemicznych i ich kalibracji.

Kalibracja przez odniesienie do testu już skalibrowanego

Kalibracja „pierwotna” w odniesieniu do wskaźników roślinnych jest obecnie rzadko stosowana, gdyż wiąże się z dużym nakładem pracy i kosztów. Szczególnie w naszym kraju, w projektowym systemie finansowania nauki, liczba doświadczeń polowych została dramatycznie ograniczona. Decydując się na nowy test, jedyną możliwą alternatywą jest jego kalibracja w odniesieniu do testu obowiązującego obecnie w kraju (29). Przykład takiego podejścia w Polsce zostanie przedstawiony w wynikowej części artykułu.

Kalibracja na podstawie analizy wyników badań masowych

W krajach rozwiniętego rolnictwa wykonuje się corocznie dużą lub bardzo dużą liczbę analiz na zawartość przyswajalnych form składników mineralnych, zgodnie z obowiązującymi metodami testowymi. Wyniki tych badań służą przede wszystkim rolnikom do planowania gospodarki nawozowej w gospodarstwach rolnych, ale są one również gromadzone w centralnej lub rejonowych bazach danych. W Polsce badania zasobności i odczynu gleb prowadzone są przez 17 okręgowych stacji chemiczno-rolniczych działających według jednolitych metod pod nadzorem Krajowej Stacji Chemiczno-Rolniczej z siedzibą w Wesołej k. Warszawy. Krajowa Stacja dysponuje centralną bazą wyników wszystkich badań agrochemicznych w skali kraju i na mocy porozumienia stron udostępnia tę bazę dla celów badawczych Instytutowi Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – PIB w Puławach. Corocznie baza ta uzupełniana jest wynikami ok. 250 tysięcy analiz odczynu pH i zawartości przyswajalnych form fosforu, potasu i magnezu. W odstępach 4-letnich dokonywane są syntezy wyników tych badań służące do oceny aktualnego stanu chemicznej żyzności gleb w Polsce. Ostatnio taka synteza została wykonana dla wyników badań z lat 2007–2011 jako

praca doktorska (23) w ścisłej współpracy pomiędzy IUNG-PIB i KSChR. Synteza obejmowała wyniki badań przeprowadzonych w całej Polsce w liczbie ponad 950 tys. rekordów. Przy takiej liczbie wyników należy założyć, że próba powinna charakteryzować populację generalną gleb w Polsce. Dzielnąc całą liczbę wyników dla poszczególnych składników na pentyle (po 20% wyników), uzyskano pięć przedziałów zawartości przyswajalnych form fosforu, potasu i magnezu (tab. 8, 9 i 10).

Tabela 8

Przedziały zawartości fosforu przyswajalnego według metody Egnera DL

Zawartości fosforu (mg P·kg ⁻¹ gleby) w pentylach i przedziałach					Mediana	Liczba danych
0–20% b. niska	20–40% niska	40–60% średnia	60–80% wysoka	80–100% b. wysoka		
<34 (<22)*	34–50 (23–44)	51–68 (45–66)	69–94 (67–88)	>95 (>88)	58	957551

*w nawiasach przedziały aktualnie obowiązujące

Źródło: Ochal, 2013 (23) oraz Anonymous, 1990 (1)

Tabela 9

Przedziały zawartości potasu przyswajalnego według metody Egnera – DL w zależności od kategorii agronomicznej gleby

Kategoria gleby	Zawartość potasu (mg K·kg ⁻¹ gleby) w pentylach i przedziałach					Mediana	Liczba danych
	0-20 % b.niska	20-40 % niska	40-60 % średnia	60-80 % wysoka	80-100 % b. wysoka		
B. lekka	<35 (<21)	35-54 (22- 62)	55-75 (63-104)	76-110 (105-145)	>110 (>145)	63	37170
Lekka	<55 (<41)	56-81 (42-83)	82-108 (84-124)	109-146 (125-166)	>146 (>166)	93	376602
Średnia	<67 (<62)	68-102 (63-104)	103-137 (105-166)	138-188 (167-207)	>188 (>207)	119	413098
Ciężka	<92 (<83)	93-133 (84-125)	134-173 (126-207)	173-217 (208-249)	>217 (>249)	152	130681
Całość	<62	63-92	93-126	127-176	>176	109	957551

*w nawiasach przedziały aktualnie obowiązujące

Źródło: Ochal, 2013 (23) oraz Anonymous, 1990 (1)

Tabela 10

Przedziały zawartości magnezu przyswajalnego według metody Schachtschabela w zależności od kategorii agronomicznej gleby

Kategoria gleby	Zawartości magnezu (mg Mg·kg ⁻¹ gleby) w pentylach i przedziałach					Mediana	Liczba danych
	0–20% b. niska	20–40% niska	40–60% średnia	60–80% wysoka	80–100% b. wysoka		
B. lekka	>16 (<10)*	17–25 (11–20)	26–35 (21–40)	36–53 (41–60)	>53 (>60)	30	37170
Lekka	>23 (<20)	24–34 (21–30)	34–47 (31–50)	47–67 (51–70)	>67 (>70)	40	376602

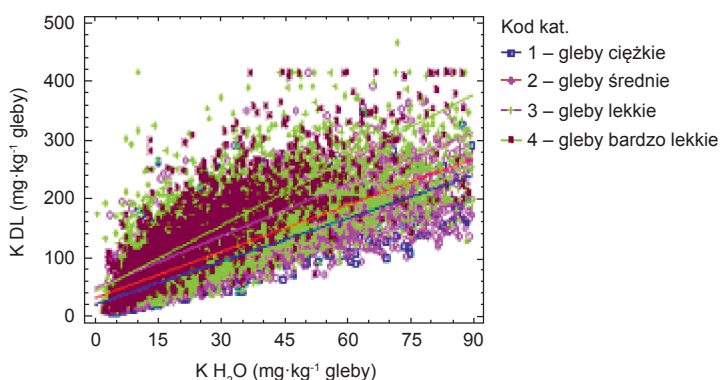
cd. tab. 10

Kategoria gleby	Zawartości magnezu ($\text{mg Mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ gleby) w pentylach i przedziałach					Mediana	Liczba danych
	0–20% b. niska	20–40% niska	40–60% średnia	60–80% wysoka	80–100% b. wysoka		
Średnia	>36 (<30)	37–54 (31–50)	55–73 (51–70)	74–103 (71–90)	>103 (>90)	63	413098
Ciężka	>52 (<40)	53–74 (41–60)	75–96 (61–100)	97–130 (101–140)	>130 (>140)	74	130681
Całość	>29	30–45	46–64	65–93	>94	54	957551

* w nawiasach przedziały aktualnie obowiązujące

Źródło: Ochal, 2013 (23) oraz Anonymous, 1990 (1)

Tak uzyskane „liczby kalibracyjne”, szczególnie dla fosforu i magnezu wykazują dużą zgodność z liczbami przyjętymi oficjalnie w kraju. Liczby graniczne dla potasu wynikające z podziału na pentyle danych badań masowych są nieco „spłaszczone” w porównaniu z liczbami obowiązującymi oficjalnie w kraju. Oznacza to, że zalecane na podstawie liczb z badań masowych dawki nawozów potasowych byłyby większe na glebach o bardzo niskiej i niskiej zawartości przyswajalnego potasu, a mniejsze na glebach o zawartości wysokiej i bardzo wysokiej. Już wcześniej Fotyma (12) na podstawie badań własnych podniósł sprawę zbyt wysokich, jego zdaniem, liczb kalibracyjnych dla potasu obowiązujących w Polsce. Badania autora polegały na porównaniu zawartości potasu ekstrahowanego wodą i ekstrahowanego roztworem Egnera-DL w dużej liczbie (ok. 27 tys.) próbek gleby pobranych przez okręgowe stacje chemiczno-rolnicze z obszaru całej Polski. Jak wcześniej stwierdzono, potas rozpuszczalny w wodzie stanowi formę składnika bezpośrednio dostępną dla roślin. Wyniki oznaczeń podzielono na pentyle i w obrębie każdego pentylu wyznaczono zależność pomiędzy zawartością potasu w wodzie i oznaczonego metodą Egnera DL. Odpowiednie linie regresji liniowej przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Zależność pomiędzy zawartością potasu rozpuszczalnego w wodzie i oznaczonego metodą Egnera DL

Źródło: Fotyma, 2010 (12)

Na podstawie równań regresji dla każdego przedziału pentylowego zawartości potasu w wodzie wyznaczono przedziały pentylowy zawartości potasu oznaczonego metodą Egnera DL. Tak wyznaczone przedziały pentylowe stanowią zmodyfikowane klasy zawartości potasu przyswajalnego oznaczanego tą metodą (tab. 11).

Tabela 11

Zmodyfikowane klasy zawartości potasu przyswajalnego K_{DL} w glebach Polski

Kategoria agronomiczna gleby	Liczba porównań (wyników)	K_{DL} (mg·kg ⁻¹ gleby) w klasach zawartości potasu przyswajalnego					Mediana (zawartość krytyczna)
		bardzo niska	niska	średnia	wysoka	bardzo wysoka	
Bardzo lekka	2104	<46	47–70	71–94	95–125	>125	82
Lekka	10476	<56	57–82	83–108	109–141	>141	95
Średnia	10758	<75	76–105	106–135	136–170	>170	120
Ciężka	3610	<82	83–113	114–142	143–178	>178	128

Źródło: Fotyma, 2010 (12)

Jak wynika z porównania danych w tabelach 9 i 11, zmodyfikowane klasy zawartości potasu przyswajalnego są bardziej zbliżone do klas wyznaczonych na podstawie wyników badań masowych, niż do klas oficjalnie obowiązujących w Polsce. Jedyny wyjątek stanowią klasy zawartości dla kategorii gleb bardzo lekkich, ale liczba analizowanych próbek pobranych z takich gleb była stosunkowo niewielka i mało reprezentatywna.

Metoda DRIS

Metoda DRIS (Diagnosis Recommendations Integrated System) została opracowana przez Beaufilsa w 1950 r. (3) do analizy roślin i rozwijana przez wielu autorów, z których najbardziej znanymi są Walworth i Summer (31). W Polsce metodę tę zastosowali po raz pierwszy Faber i in. (8), a następnie Barłóg (2). W metodzie DRIS wykorzystywane są wzajemne stosunki składników mineralnych, np. N:P, P:K itd, a nie ich bezwzględne zawartości. Metoda ta wymaga jednoczesnego oznaczenia wielkości plonu rośliny i zawartości poszczególnych składników we wskaźnikowych jej częściach. Duża populacja wyników pochodzących z poletek doświadczalnych lub z pól produkcyjnych dzielona jest według wielkości plonów na kilka części, np. na kwartyly. Dalszej analizie podlega kwartył plonów największych i kwartył plonów najmniejszych. W każdym kwartylu obliczane są średnie wartości i wariancje stosunków wszystkich oznaczanych składników mineralnych. Na tej podstawie metoda jest kalibrowana, to znaczy wybierane są średnie wartości i wariancje stosunków składników w populacji plonów dużych różniące się istotnie od średnich wartości i wariancji stosunków tych samych składników w popula-

cji plonów małych. Wybrane w ten sposób stosunki składników i ich wariancje w populacji plonów dużych stanowią normy DRIS. W następnym kroku wyliczane są indeksy DRIS dla poszczególnych składników mineralnych wchodzących w zakres normy, a więc występujących we wszystkich stosunkach z pozostałymi składnikami w populacji plonów wysokich. Sposób „ręcznego” wyliczania indeksów jest dosyć skomplikowany i przedstawiono go dla jasności wykładu dla trzech wybranych składników mineralnych – fosforu, potasu i magnezu (tab. 12). W dalszej części pracy wyliczanie indeksów zostało zautomatyzowane z zastosowaniem odpowiedniego programu komputerowego.

Tabela 12

Sposób wyliczania indeksów P, K, Mg

Charakterystyka	Zapis i sposób obliczania
Kolejność zapisu danych analitycznych w próbce	fosfor, potas, magnez
Zapis stosunków składników i ich wariancji w normie DRIS	p/k cv, p/mg cv, k/mg cv
Zapis stosunków składników w analizowanej próbce	P/K, P/Mg, K/Mg
Obliczanie funkcji	$f(P/K) = 100(P/K:p/K-1)k/cv$; gdy $P/K > p/k$ lub: $f(P/K) = 100(1-p/k:P/K)k/cv$; gdy $P/K < p/k$ $f(P/Mg) = 100(P/Mg:p/mg-1)k/cv$; gdy $P/Mg > p/mg$ lub: $f(P/Mg) = 100(1-p/mg:P/Mg)k/cv$; gdy $P/Mg < p/mg$ $f(K/Mg) = 100(K/Mg:k/mg-1)k/cv$; gdy $K/Mg > k/mg$ lub: $f(K/Mg) = 100(1-k/mg:K/Mg)k/cv$; gdy $K/Mg < k/mg$
Obliczanie indeksów	$I(P) = [f(P/K) + f(P/Mg)]/2$; $I(P)$ może być dodatni lub ujemny $I(K) = [f(K/Mg) - f(P/K)]/2$; $I(K)$ może być dodatni lub ujemny $I(Mg) = [-f(P/Mg) - f(K/Mg)]/2$; $I(Mg)$ może być dodatni lub ujemny
Obliczanie sumy indeksów	$I(P) + I(K) + I(Mg)$ z uwzględnieniem znaków, zawsze równy 0 $I(P) + I(K) + I(Mg)$ bez uwzględnienia znaków, jest z reguły większa od 0

Źródło: Faber i in. 1988 (8)

Ujemna wartość indeksu świadczy o względnym niedoborze danego składnika, a wartość dodatnia o jego względnym nadmiarze w stosunku do normy. Wartość liczbowa indeksu wskazuje na rozmiar niedoboru lub nadmiaru składnika i umożliwia uszeregowanie składników, od znacznego niedoboru do nadmiaru, według ich wpływu na wielkość plonu rośliny. Suma indeksów, bez uwzględnienia ich znaków, stanowi syntetyczny miernik stanu odżywienia rośliny badanymi składnikami.

Fotyma (w tej pracy) zaproponował zastosowanie oryginalnej metody DRIS do interpretacji wyników glebowych wskaźników chemicznej żyzności gleb, łącznie

z kalibracją testu Mehlicha. Jak już wspomniano, w tym teście wszystkie składniki przyswajalne dla roślin oznaczane są w jednym wyciągu, co stanowi analogię do analizy roślin, dla której opracowano metodę DRIS. Szczegóły tego podejścia przedstawiono w wynikowej części pracy.

Przydatność testu Mehlicha 3 w świetle badań własnych

Jak już częściowo wykazano w poprzedniej części artykułu test Mehlich 3 (21) wykazuje wiele zalet w stosunku do testów stosowanych aktualnie w naszym kraju. Jest to test uniwersalny. Do wyciągu Mehlicha przechodzą przyswajalne formy wszystkich makro- i mikroelementów stanowiących składniki pokarmowe roślin. Składniki wyciągu są stosunkowo tanie, a procedura ekstrakcji gleby jest prosta i oszczędna czasowo. Test Mehlicha stosowany jest obecnie w Republice Czeskiej, na Łotwie i w Słowacji, a zainteresowane są nim również służby agrochemiczne Estonii i Litwy. Po ewentualnym jego wprowadzeniu w Polsce powstałby duży blok krajów o podobnych warunkach glebowych i klimatycznych posługujących się jednolitym testem oceny chemicznej żyzności gleby. Prace nad wprowadzeniem tego testu w Polsce były poprzedzone kilkuletnimi konsultacjami z przedstawicielami służb agrochemicznych wymienionych wyżej krajów współdziałających od ponad 10 lat w ramach grupy MOEL (Mittel Ostern Europaeische Landern) (20). W latach 2010–2011, we współpracy z Krajową Stacją Chemiczno-Rolniczą w Wesolej k. Warszawy, w IUNG-PIB dokonano adaptacji tej metody do warunków Polski i opracowano odpowiednie instrukcje procedur laboratoryjnych. W latach 2012–2013 przeprowadzono na skalę pilotową próbę oceny przydatności metody Mehlich 3 w warunkach polowych. Wstępne wyniki tych badań zostały podane w pracy Kęsika (18). Pełne wyniki badań stanowią przedmiot dalszej części monografii.

Metodyka i wyniki badań własnych

Próbki gleby

W latach 2012–2013 okręgowe stacje chemiczno-rolnicze pobrały ok. 5000 próbek gleby z pól gospodarstw rolnych w Polsce, w ramach badań monitoringowych prowadzonych według odrębnego programu. W próbkach gleby oznaczono skład granulometryczny metodą dyfrakcyjną, zawartość węgla organicznego metodą suchego spalania, odczyn pH gleby w 1 mol dm³ KCl oraz zawartość przyswajalnych form fosforu, potasu i magnezu równoległe metodami obowiązującymi (Egner DL i Schachtschabel) oraz metodą uniwersalną Mehlich 3. Na podstawie wywiadu z rolnikami określono również wielkość plonów roślin uprawianych na polach, z których pochodziły próbki gleb. Wszystkie wyniki zapisano w bazie danych utworzonej w arkuszu kalkulacyjnym Excel. Wyniki opracowano z zastosowaniem metody porównawczej (test Mehlich 3 z testami obowiązującymi), metodą DRIS (tylko test

Mehlich 3), a dodatkowo obliczono syntetyczny wskaźnik żyzności gleb (tylko testy obowiązujące). Szczegóły postępowań statystycznych podano przy omawianiu poszczególnych metod. Wszystkie opracowania statystyczne zostały przeprowadzone przy użyciu pakietu Statgraphics Plus.

Analiza statystyczna

Analizę statystyczną przeprowadzono dla ponad 4700 wyników badań dotyczących tylko gleb mineralnych. Pominięto wyniki dla gleb organicznych charakteryzujących się zawartością węgla organicznego przekraczającą 10%, ze względu na ich specyfikę w zakresie przyswajalności składników pokarmowych. W tabeli 13 zestawiono podstawowe charakterystyki statystyczne wszystkich oznaczanych cech gleby. Z uwagi na temat opracowania najbardziej interesujące są wyniki dotyczące zawartości przyswajalnych form fosforu, potasu i magnezu wykonane równocześnie metodami obecnie przyjętymi i metodą Mehlich 3. Średnie zawartości wymienionych składników oznaczonych metodą Mehlich 3 były większe od oznaczonych metodami obecnie przyjętymi. Największe różnice stwierdzono w przypadku fosforu przyswajalnego, którego zawartość oznaczona metodą Mehlich 3 była niemal dwukrotnie większa od oznaczanej metodą Egnera DL. Współczynnik zmienności dla zawartości fosforu dla metody Egnera DL przekraczał 105%, natomiast dla pozostałych składników i metod ich oznaczania wahał się w granicach 70–81%. Rozkłady danych dla wszystkich badanych cech i metod odbiegają od rozkładu normalnego. Charakteryzują się one prawostronną asymetrią (dodatnia wartość współczynnika skośności) oraz wyraźnie większe skupienie wyników (dodatnia wartość współczynnika kurtozy). Najbardziej zbliżony do normalnego był rozkład wartości odczynu pH gleby.

Tabela 13

Podstawowe charakterystyki statystyczne wskaźników żyzności i wyników analizy gleby wykonanej porównywanymi metodami (składniki pokarmowe w mg·kg⁻¹ gleby)

Charakterystyka	% frakcji <0,02mm	pH w 1n KCl	C _{org.} (%)	Egner DL		Schacht.	Mehlich 3		
				P	K	Mg	P	K	Mg
Liczebność	4706	4706	4705	4706	4706	4704	4706	4706	4704
Średnia	23,7	5,9	1,6	80,8	126	78,5	154	154	109
Odch. std.	20,0	1,02	1,10	85,1	99,2	55,3	124	121	88,3
Wsp. zmien. (%)	84,4	17,3	69,0	105	78,6	70,5	80,4	78,4	80,6
Mediana	17,0	6,0	1,33	65,9	103	66,0	128	124	87,0
Dolny kwartyl	10,0	5,1	0,9	37,1	58,1	40,0	65,0	72,0	49,0
Górny kwartyl	31,8	6,8	1,9	109	164	101	209	200	140
Wsp. skośności	45,5	-4,57	80,8	49,6	52,7	40,9	57,1	58,0	43,8
Kurtoza	33,5	-14,0	174	51,0	70,9	35,7	25,0	32,8	39,5

Źródło: opracowanie własne, K. Filipiak

W dalszym części opracowania stałe cechy gleby, zawartość cząstek spławialnych i zawartość węgla organicznego oraz wartość pH określano jako zmienne dodatkowe, a zawartości przyswajalnych form fosforu, potasu i magnezu, oznaczanych obydwu metodami, jako zmienne główne. Zmienne główne wykazywały istotne, jakkolwiek w większości słabe korelacje (dla $p < 0,05$) z zawartością frakcji cząstek spławialnych ($<0,02\text{mm}$) i pH gleby (tab. 14) oraz z zawartością węgla organicznego. Na zmienne główne, z wyjątkiem fosforu oznaczanego metodą Mehlich 3, największy wpływ miała wartość pH, a na zawartość magnezu również zawartość cząstek spławialnych. Zawartość węgla wpływała w znaczącym stopniu tylko na magnez przyswajalny.

Tabela 14

Współczynniki korelacji prostej (wartości r) pomiędzy zmiennymi głównymi i dodatkowymi

Charakterystyka	% frakcji <0,02 mm	pH w 1n KCl	C _{org.} (%)	Egner DI		Schacht.	Mehlich 3		
				P	K	Mg	P	K	Mg
Liczebność	4706	4706	4705	4706	4706	4704	4706	4706	4704
% frakcji <0,02mm	-	0,018	0,044*	-0,108*	0,081*	0,292*	-0,229*	0,150*	0,277*
pH	0,018	-	0,103*	0,401*	0,263*	0,189*	0,052*	0,256*	0,327*
C _{org.}	0,044*	0,103*	-	-0,033*	-0,001	0,266*	-0,155*	0,034*	0,326*

* istotna wartość współczynnika korelacji dla poziomu istotności $p < 0,05$

Źródło: opracowanie własne, K. Filipiak

Z uwagi na przedmiot monografii najbardziej interesujące są związki pomiędzy zawartościami przyswajalnych form fosforu, potasu i magnezu oznaczonymi metodami dotychczas stosowanymi a metodą Mehlich 3. Charakterystykę tych związków podano w tabeli 15 dla wyróżnionych czterech kategorii agronomicznych gleb. Podejście takie było uzasadnione faktem, że dotychczasowe kalibracje testów potasu i magnezu były dwukierunkowe i uwzględniały skład granulometryczny gleby. Dla zachowania jednolitości wywodu włączono tutaj fosfor, mimo że kalibracja testu Egner DL dla tego składnika jest jednokierunkowa. W tabeli 15 zamieszczono również współczynniki korelacji pomiędzy zmiennymi głównymi i dodatkowymi, tzn. wartością pH i zawartością węgla organicznego. Związki pomiędzy parami zmiennych głównych oznaczanych dwiema metodami, w obrębie wszystkich wyróżnionych kategorii agronomicznych gleb, były zawsze istotne i silne. Wielkości odpowiednich współczynników korelacji malały w kierunku: potas > magnez > fosfor. Współczynniki korelacji dla zawartości potasu i magnezu niezależnie od kategorii agronomicznej gleby przekraczały wartość $r = 0,8$, a dla fosforu wartość $r = 0,6$. Z uwagi na istotne związki pomiędzy zmiennymi głównymi i dodatkowymi zrezygnowano z zastosowania regresji wielokrotnej do opisu zależności pomiędzy parami zmiennych głównych z uwzględnieniem zmiennych dodatkowych.

Tabela 15

Współczynniki korelacji prostej dla zmiennych głównych i dwóch zmiennych dodatkowych z podziałem na kategorie agronomiczne gleb

Porównywane zmienne (zestawione parami)	Wartość r dla kategorii agronomicznej gleb			
	b. lekkie	lekkie	średnie	ciężkie
fosfor przyswajalny				
P wg Mehlicha 3 – P ₂ O ₅ wg Egnera DL	0,645**	0,666**	0,638**	0,700**
P wg Mehlicha 3 – C _{org.} (%)	-0,234**	-0,200**	-0,043	-0,148**
P wg Mehlicha 3 – pH w 1nKCl	-0,060	0,035	0,176**	0,212**
P ₂ O ₅ wg Egnera DL – C _{org.} (%)	-0,068	0,011	-0,006	-0,030
P ₂ O ₅ wg Egnera DL – pH w 1nKCl	0,338**	0,417**	0,461**	0,374**
potas przyswajalny				
K wg Mehlicha 3 – K ₂ O wg Egnera DL	0,899**	0,917**	0,860**	0,917**
K wg Mehlicha 3 – C _{org.} (%)	-0,058*	0,046	0,153**	-0,014
K wg Mehlicha 3 – pH w 1nKCl	0,230**	0,200**	0,240**	0,268**
K ₂ O wg Egnera DL – C _{org.} (%)	-0,067	0,015	0,073*	-0,036
K ₂ O wg Egnera DL – pH w 1nKCl	0,232**	0,210**	0,251**	0,243**
magnez przyswajalny				
Mg wg Mehlicha 3 – Mg wg Schachtschabela	0,837**	0,773**	0,807**	0,846**
Mg wg Mehlicha 3 – C _{org.} (%)	0,322**	0,294**	0,152**	0,379**
Mg wg Mehlicha 3 – pH w 1nKCl	0,460**	0,360**	0,264**	0,252**
Mg wg Schachtschabela – C _{org.} (%)	0,346**	0,246**	0,318**	0,007
Mg wg Schachtschabela – pH w 1nKCl	0,422**	0,201**	0,105**	-0,018

*p < 0,05; **p < 0,01

Źródło: opracowanie własne, K. Filipiak oraz K. Kęsik

Odrębnego omówienia wymaga sprawa fosforu. Zawartość tego składnika oznaczana metodą Egnera DL była zawsze istotnie i dosyć silnie skorelowana z odczynem pH gleby. Zależności od pH gleby nie wykazywała natomiast zawartość fosforu oznaczanego metodą Mehlich 3. Do zagadnienia tego powrócono w dalszej części artykułu.

Kalibracja testu Mehlich 3 w stosunku do testów Egner DL i Schachtschabel

Dla trzech analizowanych składników pokarmowych w obrębie każdej kategorii agronomicznej gleby wyznaczono równania regresji wielomianowej między wynikami obu metod, przyjmując za zmienną zależną (Y) wyniki uzyskane metodą Mehlich 3, a za zmienną niezależną wyniki uzyskane metodą Egnera DL lub Schachtschabela. Najlepsze dopasowanie uzyskano, stosując albo wielomian 3. stopnia, albo prostą regresji. Tę drugą funkcję wybierano wówczas, gdy współczynnik determinacji równania 3. stopnia nie był większy o co najmniej 5% od współczynnika determinacji dla równania liniowego. Współczynniki przyjętych równań i współczynniki determinacji zamieszczono w tabeli 16. Funkcja liniowa najlepiej opisywała związki pomiędzy

zawartościami potasu i magnezu oznaczanymi dwoma porównywanymi metodami dla gleb wszystkich kategorii agronomicznych. Jedyny wyjątek stanowiła zawartość magnezu w glebach lekkich, gdy lepiej dopasowana okazała się funkcja wielomianowa 3. stopnia. Odmienne przedstawiała się sytuacja w przypadku fosforu, gdy wyższe współczynniki determinacji uzyskano dla funkcji wielomianowej. Współczynniki te miały zresztą znacznie mniejsze wartości od współczynników funkcji liniowej dla potasu i magnezu. W dalszych rozważaniach przyjęto wielkość współczynnika determinacji na poziomie 60% jako wystarczającą siłę związku do przeliczenia danych analizy chemicznej uzyskanych dotychczas stosowanymi metodami na wyniki metody Mehlich 3. Warunek ten został spełniony w odniesieniu do potasu i magnezu, dla wszystkich kategorii agronomicznych gleb. W stosunku do fosforu równania 3. stopnia ustalone dla poszczególnych kategorii agronomicznych gleb (za wyjątkiem gleb ciężkich) okazały się za mało precyzyjne. Współczynnik determinacji w odniesieniu do gleb bardzo lekkich, lekkich i średnich nie przekraczał bowiem 50%.

Tabela 16

Współczynniki równań regresji wielomianowej i determinacji w obrębie wydzielonych kategorii gleb

Zmienna Y (metoda Mehlich 3)	Kategoria gleby	Stała równania	Współczynniki regresji			Istotność modelu	R ² (%)
			X	X ²	X ³		
Fosfor (mg P·100 g ⁻¹ gleby)	fosfor; zmienna X – metoda Egner DL (mg P ₂ O ₅ ·100 g ⁻¹ gleby)						
	b. lekka	3,696	0,969	-0,0069	0,000018	0,000	45,5
	lekka	2,972	0,826	-0,0068	0,000020	0,000	49,5
	średnia	1,265	0,818	-0,0066	0,000018	0,000	45,8
	ciężka	0,411	0,802	-0,0058	0,000010	0,000	61,6
Potas (mg K·100 g ⁻¹ gleby)	potas; zmienna X – metoda Egner DL (mg K ₂ O·100 g ⁻¹ gleby)						
	b. lekka	1,019	0,870			0,000	80,7
	lekka	0,624	0,924			0,000	84,1
	średnia	3,735	0,815			0,000	74,0
	ciężka	2,943	0,963			0,000	84,1
Magnez (mg Mg·100 g ⁻¹ gleby)	magnez; zmienna X – metoda Schachtschabela (mg Mg·100 g ⁻¹ gleby)						
	b. lekka	-0,783	1,460			0,000	70,0
	lekka	0,818	1,093	0,0207	-0,000491	0,000	67,1
	średnia	0,421	1,454			0,000	65,1
	ciężka	1,949	1,227			0,000	71,5

Źródło: opracowanie własne, K. Filipiak oraz K. Kęsik

Z poprzednich rozważań wynika, że zawartość fosforu oznaczanego metodą Egnera DL była istotnie i dosyć silnie skorelowana z odczynem pH gleby. W związku z tym sprawdzono siłę związku pomiędzy zawartościami fosforu oznaczanymi

metodami Egnera DL i Mehlicha 3 z uwzględnieniem czterech przedziałów odczynu gleb (tab. 17). Do opisu tych zależności we wszystkich przedziałach odczynu najlepiej dopasowana była funkcja podwójnie logarytmiczna i uzyskane współczynniki determinacji okazały się podobne do współczynników dla potasu i magnezu.

Tabela 17

Współczynniki równań regresji podwójnie logarytmicznej dla zawartości fosforu w obrębie wydzielonych przedziałów odczynu gleb

Zmienna niezależna Y	Przedziały pH gleby	Stała równania	Zmienna zależna X ($\ln P_2O_5$)	Istotność modelu	R ² (%)
lnP	<4,5	-0,316	1,195	0,000	82,47
	4,5-5,5	-0,119	1,064	0,000	71,56
	5,5-6,5	-0,158	0,959	0,000	61,54
	>6,5	-0,538	0,945	0,000	65,40

Źródło: opracowanie własne, K. Filipiak oraz K. Kęsik

Po podstawieniu liczb granicznych przyjętych dla metod Egnera i Schachtschabela do odpowiednich równań regresji zamieszczonych w tabeli 16 (dla potasu i magnezu) oraz w tabeli 17 (dla fosforu) uzyskano liczby graniczne dla metody Mehlich 3. Obliczone w ten sposób wartości liczb granicznych podano w końcowej części artykułu.

Metoda DRIS

Obliczenie norm DRIS

Na pierwszym etapie analizy danych obliczono normy DRIS. W tym celu plony roślin towarowych z gruntów ornych wyrażono w wartościach względnych, przyjmując za 100 największy uzyskany plon określonego gatunku rośliny. Dla użytków zielonych nie wyznaczono norm DRIS z uwagi na małą liczbę obserwacji i małą precyzję określania wielkości plonu przez rolnika. Całą populację plonów względnych podzielono na kwartyle i do wyznaczenia norm DRIS przyjęto kwartył dolny i kwartył górny plonów względnych. Dla obydwu kwartyli plonów obliczono wartości średnie i wariancje sześciu parametrów żyzności gleby oraz wszystkich stosunków pomiędzy tymi parametrami (tab. 18).

Tabela 18

Wartości średnie i wariancje parametrów żyzności gleby i stosunków pomiędzy tymi parametrami dla dolnego i górnego kwartyła plonów względnych

Parametr	Dolny kwartył plonów n = 780		Górny kwartył plonów n = 829 ¹	
	wartość parametru	wariancja	wartość parametru	wariancja
Plon względny (%)	33,93	82,0811	77,151	84,5533
pH	5,688	1,092	6,175	0,93
Cząstki spławialne (%)	21,113	345,954	22,879	314,557
C _{org.} (g·kg ⁻¹)	12,876	58,308	15,451	83,952
Pmehlich P (mg·kg ⁻¹)	173,8	18145,7	177,229	15458,8
Kmehlich K (mg·kg ⁻¹)	146,767	11788,4	190,469	19935,3
Mgmehlich Mg (mg·kg ⁻¹)	94,106	7092,95	118,371	7705,01
pH: cząstki spławialne	0,546	0,3387	0,489	0,4173
pH: C organiczny	0,5567	0,0933	0,5099	0,078
pH: Pmeh	0,0662	0,0088	0,065	0,0078
pH: Kmeh	0,0609	0,0023	0,0508	0,0019
pH: Mgmeh	0,1255	0,0179	0,0851	0,0055
Cząstki spławialne: C _{org.}	1,9712	4,7724	1,8516	3,4168
Cząstki spławialne: Pmeh	0,3137	0,4428	0,304	0,555
Cząstki spławialne: Kmeh	0,1928	0,0647	0,1608	0,0365
Cząstki spławialne: Mgmeh	0,3884	0,595	0,2643	0,1059
C _{org.} : Pmeh	0,157	0,0821	0,1847	0,1655
C _{org.} : Kmeh	0,1384	0,0376	0,1323	0,03
C _{org.} : Mgmeh	0,2849	0,1688	0,209	0,0593
Pmeh: Kmeh	1,7457	3,426	1,2295	1,2012
Pmeh: Mgmeh	4,561	58,1955	2,7213	16,6069
Kmeh: Mgmeh	2,4142	4,4207	2,1513	2,7825

¹ zacieniowana część tabeli obejmuje normy DRIS

Źródło: opracowanie własne, M. Fotyma oraz L. Purchała

Względne plony roślin towarowych w kwartylu plonów największych przewyższały niemal dwukrotnie plony w kwartylu plonów najmniejszych. W górnym kwartylu plonów większe były również podstawowe parametry żyzności gleb, pH, % cząstek spławialnych, zawartość C_{org.}, oraz zawartości przyswajalnych form P, K i Mg oznaczanych metodą Mehlich 3. Jak podano wcześniej, za normy DRIS uważa się wartości stosunków parametrów żyzności gleby i wartości ich wariancji w populacji plonów największych (górnym kwartylu plonów). Tak rozumiane normy DRIS zaznaczono w zacieniowanej części tabeli. Należy podkreślić, że wielkość plonów roślin była podawana przez rolników i ma wartość szacunkową. Liczebność punktów kontrolnych przyjętych do wyliczenia norm DRIS była również ograniczona i dlatego wyznaczone normy, jak również obliczone z ich wykorzystaniem indeksy odnoszą się jedynie do analizowanego materiału doświadczalnego. Pozytywny jest tutaj fakt, że wartości

parametrów żyzności gleby były większe w górnym kwartylu plonów, co przemawia za zgodnością wyników badań agrochemicznych z podawanymi szacunkami plonów.

Indeksy DRIS

Na podstawie wyznaczonych norm obliczono indeksy DRIS dla wszystkich punktów, z których pobierano próbki gleb zlokalizowanych na gruntach ornym. Zarówno wartości indeksów dla poszczególnych parametrów żyzności, jak i suma indeksów (bez uwzględnienia znaków) wykazywały bardzo dużą zmienność (tab. 19).

Tabela 19

Charakterystyka statystyczna indeksów DRIS dla gleb gruntów ornym

Indeks	Liczebność	Indeks średni	Odch. std.	Min.	Max	Skośność	Kurtoza	Wsp. zm.
pH	4682	-3,36	8,89	-34	+32	3,43	14,6	-264
Cz. spł.	4500	-3,29	15,4	-60	+50	-7,8	28,0	-469
C _{org.}	4678	2,83	18,1	-90	+130	69	160	640
P	4643	-2,84	26,9	-150	+100	-48	92	-949
K	4698	-0,40	17,2	-100	+65	-30	69	-4256
Mg	4698	10,4	26,4	-90	+175	56	118	254
Suma	4779	80	81,4	0	608	81	147	1012

Źródło: opracowanie własne, M. Fotyma oraz L. Purchała

Obliczone średnie indeksy DRIS można uszeregować następująco w kierunku rosnącym: indeks pH < indeks cząstek spławialnych < indeks P < indeks K < indeks C_{org.} < indeks Mg. Gdyby takie uszeregowanie indeksów dotyczyło pojedynczego pola, należałoby przyjąć, że czynnikiem najbardziej ograniczającym wielkość plonu był kwaśny odczyn gleby, a następnie niedobór potasu, natomiast we względnym nadmiarze była zawartość magnezu. Ujemny indeks dla zawartości cząstek spławialnych świadczyłby o zbyt lekkiej glebie, a dodatni dla zawartości węgla o wystarczającej zawartości próchnicy. Suma indeksów bez uwzględnienia znaków odbiegała od zera, co wskazuje na stan żyzności gleby niezapewniający uzyskiwania dużych plonów roślin.

Próba oceny przydatności indeksów DRIS

Próby takiej dokonano, porównując wartości indeksów dla poszczególnych parametrów żyzności gleby z rzeczywistymi wartościami tych parametrów pogrupowanymi w przedziały klasowe (tab. 20)

Tabela 20

Wartości indeksów DRIS w przedziałach klasowych odczynu i zawartości części spławialnych oraz zawartości C, P, K i Mg

Przedział klasowy	Średnia wartość indeksu ¹						
	pH	cz. spł.	C _{org.} ²	P	K ₁ ³	K ₂ ⁴	Mg
B. niska	-2,78(484)	-22,9(920)	-22,6(206)	-53,9(462)	-14,0(723)	-12,5(1048)	-16,9(439)
Niska	-2,19(938)	-4,02(1274)	-1,44(3474)	-7,40(646)	-3,80(874)	-1,18(570)	-4,51(463)
Średnia	-2,17(1134)	2,82(722)	bd	1,66(658)	3,73(892)	2,21(496)	3,63(1007)
Wysoka	-2,07(723)	9,94(502)	bd	8,67(563)	6,88(488)	5,26(516)	0,53(673)
B. wysoka	1,23(402)	35,2(261)	bd	13,87(1352)	16,1(702)	13,8(1049)	26,2(977)

¹ w nawiasach liczba próbek; ² wyniki tylko dla gleb gruntów ornyczych; ³ według klas oficjalnie obowiązujących; ⁴ według klas zaproponowanych przez Fotymę

bd – brak danych

Źródło: opracowanie własne, M. Fotyma

Wartości indeksów DRIS ulegały zmianie w kierunku od najbardziej ujemnych do najbardziej dodatnich w kolejnych klasach zawartości odpowiednich składników w glebie. Układ wartości wszystkich indeksów odpowiadał zatem układowi klas wartości parametrów chemicznej żyzności gleby. Potwierdza to pośrednio przydatność metody DRIS do klasyfikacji gleb według stanu ich żyzności chemicznej. Dodatkowym potwierdzeniem mogą być zależności regresyjne pomiędzy wartościami indeksów i zawartościami analizowanych składników w glebach (tab. 21, rys. 10–14).

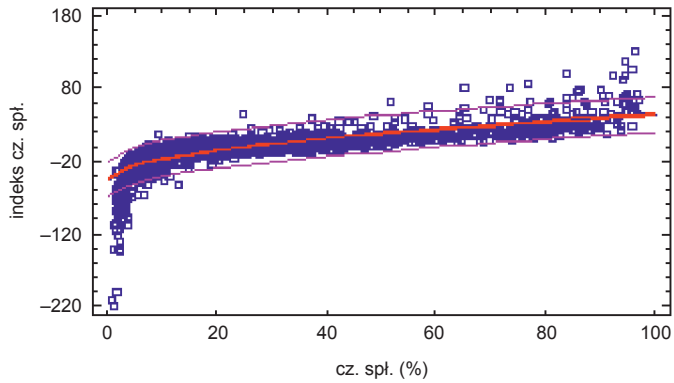
Tabela 21

Wartości współczynników funkcji opisujących zależność pomiędzy zawartością przyswajalnych form składników Y i indeksami DRIS X

Składnik	Typ funkcji	Wartość a	Wartość b	R ²	Y dla X = 0
Cz. spławialne (%)	$Y = a + b^{1/2X}$	-42,3155	8,8384	62,3	23
C _{org.} (mg C·kg ⁻¹)	$Y = a + b^{1/2X}$	-44,8976	12,4999	31,0	12,5
mg P·kg ⁻¹ gleby	$Y = a + b^{1/2X}$	-51,132	4,8718	43,8	145
mg K·kg ⁻¹ gleby	$Y = a + b^{1/2X}$	-31,18	2,8375	56,7	125
mg Mg·kg ⁻¹ gleby	$Y = a + b^{1/2X}$	-42,3917	5,4069	47,3	60

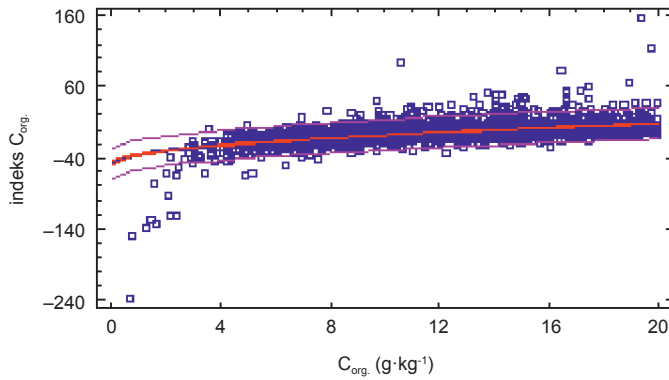
Źródło: opracowanie własne, M. Fotyma

Zależności pomiędzy wartościami liczbowymi parametrów żyzności gleby i ich indeksami najlepiej opisuje równanie pierwiastkowe (rys. 10–14). Z równań można odczytać wartości parametrów, przy których ich indeksy przybierają wartość zero, co oznacza optymalny stan żyzności gleby. Tak wyznaczone wartości parametrów mieszczą się z reguły w średnim przedziale kalibracyjnym. Według klasycznej interpretacji testów chemicznej żyzności gleby zawartość średnia danego składnika jest optymalna dla roślin i zaleca się wówczas nawożenie danym składnikiem według prawa zwrotu.



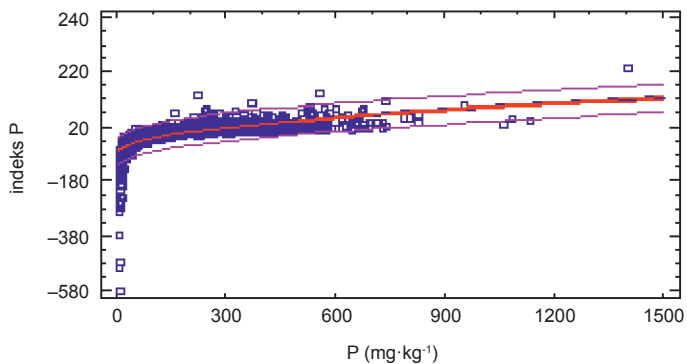
Rys. 10. Zależność pomiędzy zawartością cząstek spławianych w glebie i indeksem DRIS dla tego parametru

Źródło: opracowanie własne, M. Fotyma



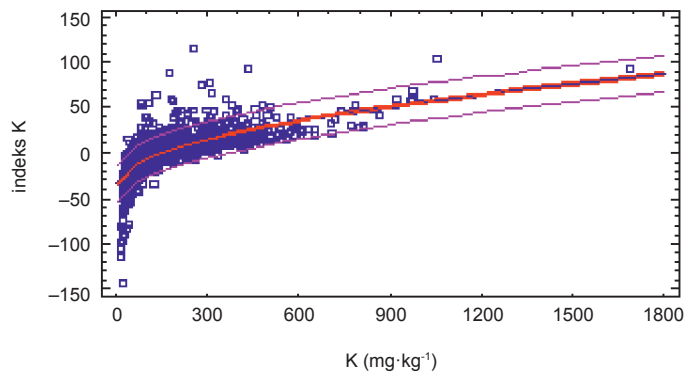
Rys. 11. Zależność pomiędzy zawartością węgla organicznego w glebie i indeksem DRIS dla tego parametru

Źródło: opracowanie własne, M. Fotyma



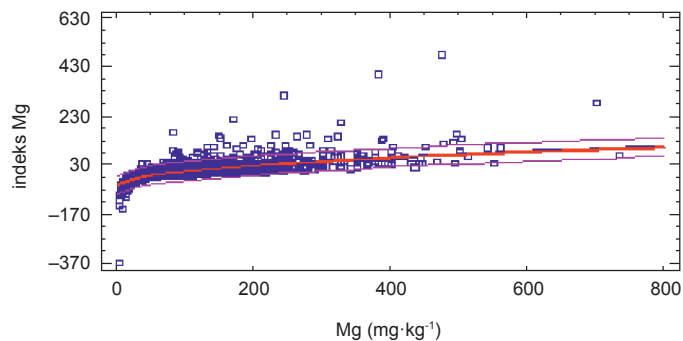
Rys. 12. Zależność pomiędzy zawartością fosforu przyswajalnego w glebie i indeksem DRIS dla tego parametru

Źródło: opracowanie własne, M. Fotyma



Rys. 13. Zależność pomiędzy zawartością potasu przyswajalnego w glebie i indeksem DRIS dla tego parametru

Źródło: opracowanie własne, M. Fotyma



Rys. 14. Zależność pomiędzy zawartością magnezu przyswajalnego w glebie i indeksem DRIS dla tego parametru

Źródło: opracowanie własne, M. Fotyma

Zależność regresyjna pomiędzy wartością pH i indeksem dla tego parametru okazała się nieistotna, co można tłumaczyć małym zróżnicowaniem wartości pH i ograniczonym zakresem ich pomiaru (pH od 4 do pH 8).

Wskaźnik syntetycznej żyzności gleby

Jako uzupełnienie badań nad porównaniem testów glebowych omówiono sposób wyliczania wskaźnika syntetycznej żyzności gleby zaproponowanego przez Filipiak (9). Wskaźnik ten wyliczono dla metod oficjalnie przyjętych w Polsce, Egnera DL i Schachtschabela, posługując się opisanymi wcześniej wynikami analiz ok. 5000 próbek gleb.

Material i metody badań

Wejściowa baza danych w formie arkusza kalkulacyjnego Excel obejmowała 4826 rekordów charakteryzujących próbki gleb pobrane przez stacje chemiczno-rolnicze. W każdej z próbek oznaczono pH gleby, zawartość węgla organicznego, udział cząstek spławialnych oraz zawartość w glebie przyswajalnych form fosforu, potasu i magnezu, a także mikroelementów: cynku, miedzi, manganu i żelaza. Oznaczeń przyswajalnych form składników dokonano aktualnie obowiązującymi metodami oraz nową, uniwersalną metodą Mehlich 3. Dane dotyczące oznaczeń metodami standardowymi wykorzystano do wyznaczenia analizą czynnikową syntetycznego wskaźnika żyzności gleby. Następnie dla tego wskaźnika wyznaczono 5 przedziałów żyzności gleb. Analizy statystyczne przeprowadzono na danych „poprawionych” poprzez wyeliminowanie obserwacji odstających, zgodnie z opisaną poniżej metodyką.

Eliminacja grubych błędów

Bardzo często w dużych zbiorach danych występują wyniki odstające, obarczone tzw. grubym błędem. Błąd taki powstaje najczęściej na etapie wprowadzania danych do tworzonego zbioru. Wartość obserwacji można zmienić poprzez postawienie przecinka dziesiętnego w niewłaściwym miejscu (np. zamiast 13,65 wpisano 136,5 lub 1365) albo pominięcie przecinka (z 34,7 mamy wówczas 347). Innym sposobem popełnienia błędu w nanoszeniu danych może być zbyt mocne lub zbyt długie przytrzymanie klawisza (np. dla klawisza z cyfrą 8 z liczby 8,6 otrzymamy 88,6). Oczywiście w nanoszeniu danych mogą występować i inne błędy, np. czeski błąd polegający na przestawieniu cyfr, ale nie powoduje on zwiększenia wartości dziesięcio-, stu-, a nawet kilkusetkrotnie.

Dlatego przed analizą statystyczną wyników zamieszczonych w dużych zbiorach liczbowych należy obserwacje zweryfikować i odpowiednio poprawić. Po pierwsze, o ile jest to możliwe należy każdą z cech zbioru poddać weryfikacji merytorycznej. Jeżeli znamy zakres wartości danej cechy, np. plony ziarna zbóż ($t \cdot ha^{-1}$), po wy-sortowaniu można poprawić wartość 46 na 4,6 bo podano wynik nie w $t \cdot ha^{-1}$, lecz

w $\text{dt} \cdot \text{ha}^{-1}$. Jednak dla takich cech, jak zawartości mikro- i makroskładników w glebie, wodach lub roślinach taki sposób poprawiania danych jest niemożliwy, ze względu na duże zróżnicowanie wartości tych zmiennych. W niektórych opracowaniach wartości zasobności gleb w fosfor i potas powyżej 100 zastępuje się liczbą 99,9, pod warunkiem, że zbiór danych liczy co najmniej tysiąc rekordów. Wówczas zasobność gleby pozostaje nadal bardzo wysoka, a spłaszczenie obserwacji przy dużej liczebności zbioru nie powinno wpłynąć na zależności korelacyjne między cechami.

Kolejnym etapem weryfikacji danych powinna być weryfikacja statystyczna. Za wyniki obarczone grubym błędem uznaje się obserwacje leżące poza przedziałem średnia $\pm 3 \times$ odchylenie standardowe ($\mu \pm 3\sigma$). W zależności od przyjętego sposobu postępowania obserwacje obarczone grubym błędem odrzuca się lub podstawia się za nie wartości graniczne przedziału ($\mu \pm 3\sigma$). Jednak taki sposób postępowania jest poprawny tylko w przypadku cech o rozkładzie normalnym lub asymptotycznie normalnym, dla których zakłada się, że 99% wszystkich obserwacji należy do przedziału ($\mu \pm 3\sigma$). W przypadku cech o rozkładach skośnych poprzez pewną analogię przyjęto, że można uznać 1% obserwacji za wartości odstające i nie usuwać wyników, lecz podstawiać w ich miejsce wartość 99% fraktyla (percentyla). Zastąpienie odstających obserwacji przez 99% fraktyl powoduje częściowe spłaszczenie skośności weryfikowanych cech. Mediany, czyli środkowe wartości uporządkowanego ciągu liczb są takie same dla obserwacji źródłowych i poprawionych, natomiast różnią się wartością średnich, jednak w przypadku rozkładów skośnych, to nie średnia obrazuje wartość przeciętną cechy, lecz mediana.

Podstawowe charakterystyki statystyczne analizowanych cech

W obliczeniach uwzględniono próbki pobrane z gleb mineralnych, łącznie 4707 rekordów. Po wyznaczeniu podstawowych charakterystyk statystycznych stwierdzono silną skośność rozkładów analizowanych cech. Wskazywały na to standaryzowane wartości skośności i kurtozy, leżące poza przedziałem $\langle -2, 2 \rangle$, a także znacznie wyższe wartości średnich w stosunku do median. W takim przypadku lepszą od średniej oceną wartości przeciętnej rozkładu jest mediana.

Duże różnice wartości między górnym kwartylem, 95% i 99% fraktylem oraz wartością maksymalną dla analizowanych cech wskazywały na istnienie wyników odstających od przewidywanego zakresu danych. Dlatego w celu częściowego „spłaszczenia” rozkładu zmiennych 1% największych obserwacji każdej cechy zastąpiono wartością jej 99% fraktyla (tab. 22). Oczywiście, takie przekształcenie wyników nie wpływa na ich przynależność do klasy bardzo wysokich zawartości każdego ze składników i „obcięte” wyniki mogły stanowić bazę wyjściową do wyznaczenia syntetycznego wskaźnika żyzności gleb i przestrzennego zróżnicowania tej oceny. Zawartości w glebie mikro- i makroelementów większe niż 99% fraktyl potraktowano więc jako wyniki odstające i zastąpiono je tą wartością.

Tabela 22

Wartości 99% fraktyla dla makro- i mikrośladników

Metoda analizy	Pierwiastek						
	P*	K*	Mg	Zn	Cu	Mn	Fe
Standardowa	88,0	60,0	28,2	73,2	15,0	609	7600
Mehlicha	57,1	58,0	43,8	44,1	8,1	219	847

* w metodzie standardowej fosfor podaje się w formie P_2O_5 , a potas jako K_2O

Źródło: opracowanie własne, K. Filipiak

Podstawowe parametry statystyczne po dokonaniu spłaszczenia danych dla zawartości makrośladników w glebie oraz odczynu gleby pH, zawartości węgla organicznego i udziału frakcji spawalnych zamieszczono w tabelach 23 i 34.

Tabela 23

Parametry statystyczne dla przekształconych zawartości makroelementów (n = 4686)

Statystyki	Oznaczenia metodą standardową			Oznaczenia metodą Mehlicha		
	P_2O_5 (mg·100 mg ⁻¹ gleby)	K_2O (mg·100 mg ⁻¹ gleby)	Mg (mg·100 mg ⁻¹ gleby)	P (mg·100 mg ⁻¹ gleby)	K (mg·100 mg ⁻¹ gleby)	Mg (mg·100 mg ⁻¹ gleby)
Średnia	19,7	15,0	7,8	15,3	15,2	10,8
Mediana	15,1	12,4	6,6	12,8	12,4	8,7
Odchylenie standardowe	16,35	11,45	5,22	11,67	10,95	8,42
Minimum	0,2	0,0	0,48	0,2	0,4	0,1
Maksimum	88,0	73,0	28,2	57,1	58,0	43,8
Współczynnik skośności	49,6	52,7	40,9	57,1	58,0	43,8
Współczynnik kurtozy	51,0	70,9	35,7	25,0	32,8	39,5

Źródło: opracowanie własne, K. Filipiak

Tabela 24

Podstawowe charakterystyki statystyczne odczynu, części spawalnych oraz zawartości węgla organicznego w glebie

Parametry statystyczne	Odczyn gleby (pH)	Udział części spawalnych (%)	Zawartość węgla organicznego (% C_{org})
Średnia	5,9	23,7	1,61
Mediana	6,0	17,0	1,32
Odchylenie standardowe	1,02	20,00	1,10
Minimum	3,5	0,0	0,06
Maksimum	8,0	97,9	9,77

Parametry statystyczne	Odczyn gleby (pH)	Udział części spławialnych (%)	Zawartość węgla organicznego (% C _{org.})
Współczynnik skośności	-4,57	45,52	80,76
Współczynnik kurtozy	-14,06	33,55	174,45

Źródło: opracowanie własne, K. Filipiak

Syntetyczny wskaźnik żyzności gleb

Cechy, których rozkłady scharakteryzowano w tabelach 23 i 24 określa się jako zmienne wskaźnikowe opisujące żyzność gleb. Najczęściej na podstawie wartości oznaczonych przez stacje chemiczno-rolnicze określa się klasę odczynu oraz klasę zasobności gleb w każdy z makroskładników niezależnie, z tym że poziom zasobności gleb w potas i magnez zależy od składu granulometrycznego gleb.

Ocenę żyzności gleb wyrażoną jednym, liczbowym wskaźnikiem opracowano w 2010 r. w IUNG-PIB (9). Do wyznaczenia tego wskaźnika wykorzystano metodę analizy czynnikowej. Zakłada ona, że zbiór zmiennych skorelowanych można odwzorować za pomocą znacznie mniejszej liczby sztucznych zmiennych (czynników). Udział poszczególnych zmiennych w czynnikach jest wyrażony poprzez ładunki czynnikowe, które po rotacji, najczęściej metodą Varimax, stanowią odpowiedniki współczynników korelacji. Im większa wartość ładunku, tym silniej czynnik jest skorelowany ze zmienną wejściową, czyli tym większe znaczenie w zmienności czynnika ma dana cecha. Jeżeli przekształcenie danych wejściowych w jeden czynnik jest odpowiednio wysokie, np. większe od 60%, wówczas taki czynnik można potraktować jako syntetyczny wskaźnik uwzględniający zmienność wszystkich cech wejściowych.

Wykorzystując zmienne, których charakterystyki statystyczne zamieszczono w tabelach 23 i 24, wyliczono za pomocą analizy czynnikowej syntetyczny wskaźnik żyzności gleb. Odwzorowanie zbioru sześciu zmiennych w jeden syntetyczny wskaźnik F_{st} wyniosło 67%, więc czynnik ten można potraktować jako syntetyczny wskaźnik żyzności gleb. Czynnik ten, po rotacji, opisuje standaryzowane równanie:

$$F_{st} = 0,540 \text{ pH}^* + 0,049 \text{ fr} < 0,02^* + 0,076 \text{ C}_{org.}^* + 0,712 \text{ P}_2\text{O}_5^* + 0,674 \text{ K}_2\text{O}^* + 0,289 \text{ Mg}^*,$$

przy czym wartości zmiennych(*) są standaryzowane poprzez odjęcie od każdej obserwacji wartości średniej i podzielenie tej różnicy przez odchylenie standardowe. Po przeliczeniu na dane rzeczywiste równanie przyjmuje postać:

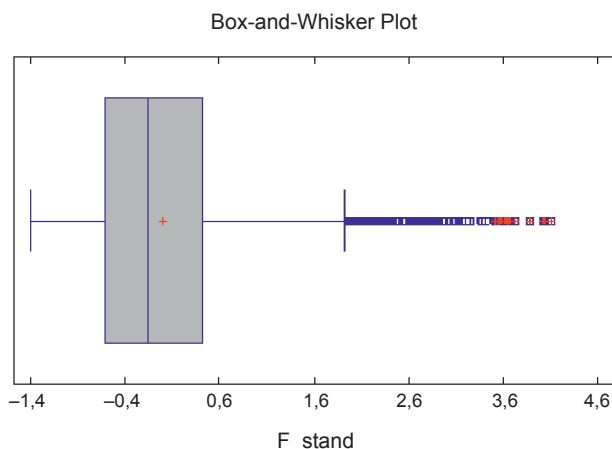
$$F_{st} = 0,528 \text{ pH} + 0,002 \text{ fr} < 0,02 + 0,069 \text{ C}_{org.} + 0,044 \text{ P}_2\text{O}_5 + 0,059 \text{ K}_2\text{O} + 0,055 \text{ Mg} - 5,423.$$

Z wartości ładunków czynnikowych (współczynników standaryzowanego równania) wynika, że największy udział w zmienności czynnika ma zasobność gleb

w fosfor (0,712) i potas (0,674) oraz odczyn pH gleby (0,540), natomiast niski jest wpływ zawartości magnezu i właściwie brak wpływu frakcji spławialnych oraz zawartości węgla organicznego.

Klasyfikacja wskaźnika żyzności gleb

Syntetyczny wskaźnik żyzności gleb (SWŻG) jest zmienną znormalizowaną ze średnią = 0 i odchyleniem standardowym = 0,838. Jednak rozkład tego wskaźnika różni się istotnie od rozkładu normalnego (rys. 15), jest niesymetryczny i skośny, więc jego klasyfikacji nie można dokonać na podstawie odchyłeń standardowych od średniej. Dlatego klasy żyzności gleb wyznaczono na podstawie stabilizowanej częstości empirycznego rozkładu wskaźnika (tab. 25). Analogicznie do klas zasobności gleb w makroelementy i oceny odczynu gleby przyjęto 5 klas żyzności. Bardzo niską i niską żyzność gleby stwierdzono w 30,7% próbek, średnią dla 47,2%, a wysoką i bardzo wysoką żyznością charakteryzowało się 22,1% próbek gleby.



Rys. 15. Empiryczny rozkład syntetycznego wskaźnika żyzności gleb

Źródło: opracowanie własne, K. Filipiak

Tabela 25

Klasy żyzności gleb

Klasa żyzności	Żyzność gleby	SWŻG	Liczba obserwacji	Procent obserwacji
5	bardzo niska	$\leq -1,0$	299	6,4
4	niska	$-1,0 - -0,5$	1141	24,3
3	średnia	$-0,5 - 0,5$	2222	47,2
2	wysoka	$0,5 - 1,0$	482	10,2
1	bardzo wysoka	$\geq 1,0$	561	11,9

Źródło: opracowanie własne, K. Filipiak

Sugestie do nowego systemu doradztwa nawozowego

Obowiązujący obecnie w Polsce system nawożenia został stworzony w latach 80. ubiegłego wieku i w warstwie koncepcyjnej nie ulegał znaczącym modyfikacjom. W odniesieniu do odczynu i składników mineralnych nagromadzających się w glebie (P, K, Mg) system ten opiera się o starą (24) zasadę „zbuduj i utrzymaj żyzność gleby” (build up and maintenance). Zgodnie z tą zasadą dawki składników nawozowych powinny odpowiadać ich ilości pobranej z plonem roślin, zwiększonej lub zmniejszonej zależnie od wartości testu glebowego. Na tej zasadzie opierały się systemy nawożenia w większości krajów europejskich i konsekwentne jej stosowanie, praktycznie do końca XX w., doprowadziło do znacznego wzrostu żyzności gleb. Obecnie rolnicy w części świadomie, w części intuicyjnie odchodzą od tej zasady i coraz częściej eksploatują nabytą żyzność gleb, zmniejszając dawki nawozów, zwłaszcza fosforowych i potasowych. W związku z tym następuje coraz większy rozdziew pomiędzy zalecanymi przez doradztwo dawkami nawozów a dawkami stosowanymi w praktyce gospodarowania (17). Wymaga to dokonania zmian, a lepiej opracowania nowego systemu doradztwa uwzględniającego zmiany, jakie zachodzą w rolnictwie. Nowy system powinien opierać się na koncepcji „równowagi składników mineralnych” z zachowaniem „salda bilansowego”, pod którym należy rozumieć różnice pomiędzy potrzebami pokarmowymi rośliny i ilością określonego składnika, którą roślina może pobrać z gleby. Na nowoczesny system nawożenia składają się przynajmniej 3 elementy: precyzyjne określenie potrzeb pokarmowych roślin, dobrze skalibrowany uniwersalny test glebowy i ocena zdolności buforowej gleby w stosunku do wnoszonych w nawozach składników mineralnych. System ten musi również uwzględniać sytuacje nadmiarowe, gdy ilość składnika przyswajalnego w glebie przewyższa potrzeby pokarmowe roślin i zachodzi obawa rozpraszania tego składnika (głównie azotu i fosforu) do środowiska wodnego i atmosfery. Monografię ograniczono do jednego z wymienionych trzech elementów, to znaczy do testów glebowych, ze szczególnym uwzględnieniem testu Mehlich 3. Zalety testu Mehlicha od strony teoretycznej (możliwość oznaczenia tej samej formy wszystkich składników w jednym wyciągu) i od strony laboratoryjnej (prostota i taniść postępowań) zostały pokrótce omówione w poprzednich częściach artykułu.

Kalibracja testu Mehlicha w odniesieniu do testów aktualnie obowiązujących

Przed wprowadzeniem do praktyki badań agrochemicznych konieczna jest dobra kalibracja testu. Kalibracji takiej, ze względu na praco- i czasochłonność, nie można dokonać w klasyczny sposób, to znaczy w odniesieniu do wskaźników roślinnych w doświadczeniach wegetacyjnych czy polowych. Z tego względu zastosowano drugą z wcześniej wymienionych w artykule metod, to znaczy wstępnie skalibrowano test Mehlicha w odniesieniu do testu Egnera DL (dla fosforu i potasu) i testu Schachtschabela (w odniesieniu do magnezu). Z wykorzystaniem rachunku regresji

i korelacji stwierdzono dużą zgodność wymienionych testów i zaproponowano przedziały kalibracyjne dla testu Mehlicha. Postępowania kalibracyjnego dla testu Mehlicha nie zakończono, gdyż przeprowadzono je z wykorzystaniem niespełna 5 tysięcy wyników analiz glebowych. Każda następna analiza, która znajdzie się w bazie danych Krajowej Stacji Chemiczno-Rolniczej posłuży jednak do precyzowania tych liczb. Według autorów artykułu wstępnie wyznaczone liczby kalibracyjne można wykorzystać już teraz w gospodarstwach rolnych zainteresowanych wprowadzeniem nowej metody oceny chemicznej żyzności gleb. Wprowadzenie testu Mehlicha nie wymaga na razie zmiany dotychczasowego systemu doradztwa nawozowego, gdyż w doradztwie uwzględnia się również pięć przedziałów kalibracyjnych, analogicznie jak w testach obowiązujących. Do testu Mehlicha zaproponowano jednak dwie dosyć zasadnicze poprawki dotyczące kalibracji testów dla fosforu i potasu.

Test fosforu z jednokierunkowego w wersji metody Egnera DL, stał się dwukierunkowy w wersji metody Mehlicha. Jako drugi czynnik glebowy w teście P Mehlicha wprowadzono odczyn gleby pH. Jak wykazano w pierwszej części artykułu, dostępność (przyswajalność) fosforu dla roślin zależy w znacznej mierze od odczynu gleby. W latach 70. odczyn gleby był już uwzględniany w formie dwukierunkowej tabeli kalibracyjnej dla fosforu, ale później z bliżej autorom nieznanymi powodów zrezygnowano z tego podejścia i uproszczono liczby kalibracyjne do pięciu, bez uwzględnienia odczynu. Dokonując obecnie kalibracji testu Mehlicha w stosunku do testu Egnera DL, stwierdzono, że wprowadzenie odczynu gleby znacznie zwiększa siłę związku pomiędzy obydwoma testami i zdecydowano się na zaproponowanie testu dwukierunkowego (tab. 26).

Tabela 26

Klasy zawartości fosforu przyswajalnego oznaczanego metodą Mehlicha

Klasa odczynu pH _{KCl}	Zawartość fosforu przyswajalnego wg metody Mehlicha (mg P·kg ⁻¹ gleby)				
	bardzo niska	niska	średnia	wysoka	bardzo wysoka
Bardzo kwaśny	<50	50–110	111–186	187–262	>262
Kwaśny	<49	49–103	104–158	159–215	>215
Lekko kwaśny	<47	47–99	100–152	153–207	>207
Obojętny	<27	27–54	55–75	76–99	>99
Zasadowy	<27	27–54	55–75	76–99	>99

Źródło: opracowanie własne, K. Kęsik

Test potasu dla metody Mehlicha pozostał dwukierunkowy, podobnie jak w metodzie Egnera DL. Drugim uwzględnianym czynnikiem jest skład granulometryczny gleby określany obecnie w uproszczeniu jako kategoria agronomiczna. Z uwagi na wyposażenie stacji chemiczno-rolniczych w dyfraktometry laserowe do precyzyjnego oznaczania składu granulometrycznego będzie wkrótce możliwe sprecyzowanie liczb kalibracyjnych dla określonej zawartości w glebie części koloidalnych lub spławianych. Dostyc duża, jakkolwiek niedostrzegalna zmiana w teście Mehlicha polega na skalibrowaniu go nie w odniesieniu do oficjalnie obowiązującej tabeli kalibracyjnej dla potasu oznaczanego metodą Egnera DL, ale w odniesieniu do tabeli zaproponowanej na podstawie badań przez Fotymę (12). Zagadnienie to omówiono obszerniej w poprzedniej części artykułu. Zmodyfikowane liczby kalibracyjne dla potasu oznaczanego metodą Mehlicha przedstawiono w tabeli 27.

Tabela 27

Klasy zawartości potasu przyswajalnego oznaczanego metodą Mehlicha

Kategoria agronomiczna gleby	Zawartość potasu przyswajalnego wg metody Mehlicha (mg K·kg ⁻¹ gleby)				
	bardzo niska	niska	średnia	wysoka	bardzo wysoka
Bardzo lekka	<32	32–75	75–119	120–162	>162
Lekka	<52	52–99	100–145	146–191	>191
Średnia	<98	98–139	140–200	201–241	>241
Ciężka	<126	126–174	175–270	270–318	>318

Źródło: opracowanie własne, K. Kęsik

Zawartość magnezu została skalibrowana w stosunku do obecnie obowiązujących liczb kalibracyjnych według metody Schachtschabela, bez dokonywania żadnych modyfikacji (tab. 28).

Tabela 28

Klasy zawartości magnezu przyswajalnego oznaczanego metodą Mehlicha

Kategoria agronomiczna gleby	Zawartość magnezu przyswajalnego wg metody Mehlicha (mg Mg·kg ⁻¹ gleby)				
	bardzo niska	niska	średnia	wysoka	bardzo wysoka
Bardzo lekka	<7	7–21	22–51	52–80	>80
Lekka	<31	31–43	44–67	68–93	>93
Średnia	<48	48–77	78–106	107–135	>135
Ciężka	<69	70–93	94–142	143–191	>191

Źródło: opracowanie własne, K. Kęsik

Kalibracja testu Mehlicha z wykorzystaniem metody DRIS

Zupełnie nowe możliwości w zakresie opracowania i wdrożenia do praktyki rolniczej nowego systemu doradztwa nawozowego stwarza metoda DRIS. W metodzie tej nie przewiduje się wyznaczania zawartości krytycznych czy liczb kalibracyjnych dla składników mineralnych, które zostały zastąpione normami DRIS. Normy DRIS są to stosunki składników i ich wariacje w populacji dużych plonów roślin. W odniesieniu do norm DRIS oblicza się indeksy dla poszczególnych składników, układające się w szereg odpowiadający ich względnym nadmiarom lub niedoborom w glebie. W badaniach własnych, których wyniki przedstawiono w niniejszej pracy, normy DRIS wyznaczono w sposób bardzo przybliżony i nie mogą być one obecnie wykorzystywane w praktyce, a stanowią jedynie ilustrację tego podejścia. Dla wyznaczenia wiarygodnych norm DRIS należy dysponować znacznie większą populacją próbek gleby oraz bardziej precyzyjnie określoną wielkością plonów roślin z pól, z których pobrano te próbki. Informacje te będą nagromadzać się w miarę upowszechniania metody Mehlicha w rolnictwie polskim. Drugim warunkiem, możliwym do spełnienia od zaraz, jest oznaczanie w wyciągu Mehlicha wszystkich podstawowych składników mineralnych nagromadzających się w glebie, to znaczy P, K, Ca i Mg oraz Al i Fe. Metoda DRIS została opracowana dla potrzeb analizy roślin i po raz pierwszy w tej pracy zaproponowano ją do oceny stanu żyzności gleby i w przyszłości wykorzystania w doradztwie nawozowym. Oddzielnego omówienia wymaga zagadnienie oceny zasobności gleby w azot, który jest składnikiem labilnym i wymaga innego podejścia.

Podsumowanie

We wstępnej części artykułu dokonano przeglądu aktualnego stanu wiedzy dotyczącego glebowych testów żyzności gleby jako podstawy doradztwa nawozowego. Podkreślono korzyści ze stosowania testów uniwersalnych określających przyswajalność wszystkich składników pokarmowych roślin. Zwrócono szczególną uwagę na upowszechniający się w krajach Środkowej i Wschodniej Europy test Mehlich 3. Przewiduje się wprowadzenie tego testu do praktyki badań agrochemicznych w Polsce. W wynikowej części pracy przedstawiono rezultaty wstępnych badań nad przydatnością testu Mehlich 3 w warunkach glebowych naszego kraju i dokonano, również wstępnie, kalibracji tego testu w odniesieniu do testów obecnie obowiązujących. Wyniki tych badań wskazują na celowość zastąpienia testów Egner DL (dla fosforu i potasu) oraz testu Schachtschabel (dla magnezu) uniwersalnym testem Mehlich 3 oraz na możliwość wykorzystania tego testu do oznaczania przyswajalnych form cynku i miedzi. Przedstawiono zupełnie nową koncepcję kalibracji testu Mehlicha z zastosowaniem metody DRIS. Metoda ta jest obecnie stosowana tylko

w analizie roślin. Wyznaczono wstępnie normy DRIS dla podstawowych wskaźników żyzności gleby. Zagadnienie to wymaga dalszych badań z wykorzystaniem odpowiednio licznych próbek gleb pobranych z pól produkcyjnych.

Literatura

1. Anonymus: Zalecenia nawozowe. Cz. I. Liczby graniczne do wyceny zawartości w glebach makro- i mikroelementów. IUNG Puławy, 1990, **P(44)**: 1-26.
2. Barłóg P.: Studia nad żywieniem buraka cukrowego makroelementami ze szczególnym uwzględnieniem sodu. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2009, **35**: 39-44.
3. Beaufils E.R.: Diganosis and recommendations integrated system (DRIS). University of Natal. Soil Science Bulletin 1, 1973.
4. Black C.A.: Soil testing and fertilizer requirements. In: Soil fertility evaluation and control, C.A. Black (ed.). Lewis Publ., 1993a, pp. 271-324.
5. Black C.A.: Soil testing and lime requirement. In. Soil fertility evaluation and control, C.A. Black (ed.). Lewis Publ., 1993b, pp. 647-690.
6. Carter M.R.: Soil Sampling and Methods of Analysis. Can. Soc. Soil Sci., Lewis Publ., 1993.
7. Cate R.B., Nelson L.A.: A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1971, **35**: 658-660.
8. Faber A., Filipiak K., Kryszkowska T.: Kontrola stanu odżywienia roślin metoda DRIS. IUNG Puławy, 1988, **P(37)**: 5-35.
9. Filipiak K.: Syntetyczny wskaźnik żyzności gleb. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2010, **41**: 7-16.
10. Fotyma M.: Przeważalność składników pokarmowych dla roślin. W: Chemiczne podstawy żyzności gleb i nawożenia, M. Fotyma, S. Mercik i S. Faber (red.). PWRiL, Warszawa 1987, ss. 22-33.
11. Fotyma M.: Forms of potassium and tests of available potassium in soils. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2009, **34**: 9-24.
12. Fotyma M.: Kalibracja testu potasu przyswajalnego dla roślin. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2010, **41**: 17-25.
13. Fotyma M.: Potas w agrosystemach. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization. 2011, **45**: 5-78.
14. Fotyma M., Dobers E.S.: Soil testing methods and fertilizers recommendations in Central-Eastern European countries. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2008, **30**: 7-49.
15. Fried M., Dean L.A.: A concept concerning the measurement of available soil nutrients. Soil Sci., 1952, **73**: 263-271.
16. Jordan-Meille L., Rubek G.H., Ehlert P.A.I., Gonet V., Hofman G., Goulding K., Recknagel J., Provaolo G., Barraclough P.: An overview of fertilizer-P recommendations in Europe: soil testing, calibration and fertilizer recommendations. Soil Use Manage., 2012, **28**: 419-435.
17. Kęsik K., Krasowicz S., Zarychta M.: Dawki NPK stosowane w praktyce rolniczej pod zboża ozime na tle zaleceń nawozowych. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2011a, **44**: 51-98.

18. Kęsik K., Jadczyśzyn T., Kocoń A., Janda B., Boreczek B., Pikuła D., Tujaka A., Podleśna A., Ochal P., Bochniarz A.: Wstępne wyniki badań nad wprowadzeniem w Polsce testu glebowego Mehlich 3. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2011b, **45**: 129-150.
19. Kim H.T.: Soil reaction. In: Principles of soil chemistry. Marcel Dekker, 1993, pp. 269-271.
20. Loch J.: 12 years of MOEL consultative meetings in retrospect. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2009, **37**: 7-16.
21. Mehlich A.: Mehlich 3 soil extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. Commun. Soil Sci. Plant, 1984, **15**: 1409-1416.
22. Mengel A., Kirkby E.A.: Principles of plant nutrition. 3ed. Edition. IPI, Bern, 1982.
23. Ochal P.: Wykorzystanie syntetycznego wskaźnika do oceny stanu agrochemicznego gleb w Polsce. Praca doktorska. IUNG-PIB, Puławach 2013.
24. Olson R.A., Frank K.D., Grabouski P.H., Rehm G.W.: Economic and agronomic impacts of varied philosophies of soil testing. Agron. J., 1982, **74**: 492-499.
25. PN-ISO 10390:1997. Jakość gleby. Oznaczanie pH.
26. PN-R-04020:1994/Az1:2004. Analiza chemiczno-rolnicza gleby. Oznaczanie zawartości przyswajalnego magnezu.
27. PN-R-04022:1996/Az1:2002. Analiza chemiczno-rolnicza gleby. Oznaczanie zawartości przyswajalnego potasu w glebach mineralnych.
28. PN-R-04023:1996. Analiza chemiczno-rolnicza gleby. Oznaczanie zawartości przyswajalnego fosforu w glebach mineralnych.
29. Reijneveld J.A.: Unravelling changes in soil fertility of agricultural land in the Netherlands. Ph.D. thesis. Wageningen 2013.
30. Schroeder D.: Soils. Facts and concepts. IPI, Bern 1984.
31. Walworth J.L., Sumner M.E.: The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). Adv. Soil Sci., 1987, **6**: 149-188.
32. White P.J., Greenwood D.J.: Properties and management of cationic elements for crop growth. In: Soil Conditions and Plant Growth, J. Gregory and S. Nortcliff (eds). Wiley and Blackwell, 2013, 164.
33. Soan Y.K.: Phosphorus cycle. In: Encyclopedia of soil science, W. Chestwort (ed.). Springer 2008, pp. 547-553.
34. Ziaidi N., Sen Tran T.: Mehlich-3 extractable elements. In: Soil sampling and methods of analysis, M.R. Carter and E.G. Gregorich. Tayl 2008.

Adres do korespondencji:

prof. dr hab. Mariusz Fotyma
Zakład Żywnienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. (81) 886 34 21
e-mail: fot@iung.pulawy.pl

