

INSTYTUT UPRAWY NAWOŻENIA
I GLEBOZNAWSTWA
PAŃSTWOWY INSTYTUT
BADAWCZY



STUDIA
I
RAPORTY
IUNG-PIB

42(16)

PROGRAM WIELOLETNI

2011-2015

PUŁAWY 2015

PODSTAWY NOWOCZESNEGO
DORADZTWA NAWOZOWEGO
W POLSCE

WSPIERANIE DZIAŁAŃ
W ZAKRESIE KSZTAŁTOWANIA
ŚRODOWISKA ROLNICZEGO
I ZRÓWNOWAŻONEGO
ROZWOJU PRODUKCJI ROLNICZEJ
W POLSCE

INSTYTUT UPRAWY NAWOŻENIA I GLEBOZNAWSTWA
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

Dyrektor: *prof. dr hab. Wiesław Oleszek*

Redakcja naukowa: *dr Kazimierz Kęsik*

Autorzy:

*dr Guillaume Debaene, dr Krystyna Filipiak, prof. dr hab. Mariusz Fotyma,
mgr inż. Beata Jurga, dr Kazimierz Kęsik, prof. dr hab. Wojciech Lipiński,
dr inż. Jacek Niedźwiecki, prof. dr hab. Alicja Pecio,
mgr Leszek Purchała, mgr Damian Wach*

Recenzenci:

*prof. dr hab. Antoni Faber, dr Kazimierz Kęsik,
dr Anna Kocoń, dr hab. Rafał Pudelko*

Opracowanie redakcyjne i techniczne: *mgr Katarzyna Mikulska*

ISBN 978-83-7562-185-3

Egzemplarz bezpłatny

Nakład 250 egz., B5,
Dział Upowszechniania i Wydawnictw IUNG-PIB w Puławach
tel. (81) 8863421 w. 301 i 307; fax (81) 8864547
e-mail: iung@pulawy.pl; <http://www.iung.pulawy.pl>

PODSTAWY NOWOCZESNEGO DORADZTWA NAWOZOWEGO
W POLSCE

SPIS TREŚCI

Wstęp	7
1. M. F o t y m a, K. K ę s i k, W. L i p i ń s k i, K. F i l i p i a k, L. P u r c h a ł a – Testy glebowe jako podstawa doradztwa nawozowego.....	9
2. D. W a c h – Metody oceny stanu odżywienia roślin.....	53
3. J. N i e d ź w i e c k i, G. D e b a e n e, A. P e c i o – Klasyczne i zaawansowane metody badania przestrzennego zróżnicowania żyzności gleb i łanu roślin	69
4. B. J u r g a – Indeks fosforowy jako narzędzie do szacowania ryzyka strat fosforu do wód (przegląd piśmiennictwa)	91

Wstęp

Jednym z podstawowych zadań Zakładu Żywienia Roślin i Nawożenia IUNG-PIB jest doskonalenie podstaw i zastosowań praktycznych doradztwa nawozowego. Zagadnienie to stanowiło przedmiot kilku opracowań syntetycznych, których tytuły warto tutaj przypomnieć:

1. System nawożenia gruntów ornych w Polsce, Puławy 1986, S(45): 1-106;
2. Nawozy – Gleba – Roślina, Puławy 1992, S(75): 1-119;
3. Podstawy zrównoważonego nawożenia. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2000, 4(5): 1-231;
4. Przyrodnicze i środowiskowe skutki nawożenia. Nawozy i Nawożenia – Fertilizers and Fertilization, 2006, 1(26): 1-199;
5. Zarządzanie składnikami mineralnymi w rolnictwie. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2010, 41: 1-226.

Obecne opracowanie zostało przygotowane w ramach zadania 3.1 programu wieloletniego IUNG-PIB w jego kolejnej edycji obejmującej lata 2011–2015. W przeciągu ostatnich 30 lat nastąpił znaczny postęp w zakresie doradztwa nawozowego, ale głównie dotyczyło to jego formy, a nie teoretycznych podstaw. Początkowo wyłącznie forma tabelaryczna doradztwa ulegała kilkukrotnym modyfikacjom; wprowadzano coraz doskonalsze systemy doradztwa elektronicznego. Obecnie dostępne są równoległe systemy doradztwa elektronicznego Naw-Sald (IUNG-PIB 2009) oraz doradztwa tabelarycznego pt. Zalecenia nawozowe dla roślin uprawy polowej i trwałych użytków zielonych (IUNG-PIB 2010). Obydwa systemy są ze sobą kompatybilne. Teoretyczne podstawy doradztwa nawozowego nie uległy większym zmianom. Wykorzystywane są nadal testy glebowe, zapożyczone z testów niemieckich jeszcze w okresie powojennym, które uległy niewielkim tylko modyfikacjom w zakresie ich kalibracji. Nadal głównym celem doradztwa jest maksymalizacja plonów roślin, natomiast w zbyt małym stopniu uwzględnia się środowiskowe skutki nawożenia. W obecnym opracowaniu położono nacisk na nowe, niekiedy jeszcze teoretyczne, rozwiązania w zakresie podstaw nawożenia. Dotyczy to zarówno innej metody testowania żyzności gleb oraz jej kalibracji, jak i podstaw tak zwanego nawożenia precyzyjnego wraz z oceną jego skutków środowiskowych. Obok testów glebowych zwrócono uwagę na możliwość uściślenia dawek nawozów na podstawie testów roślinnych. Synteza o charakterze monografii obejmuje cztery referaty ściśle powiązane tematycznie.

W pierwszym z nich skoncentrowano się na zagadnieniu glebowych testów żyzności gleby. Przypomniano teoretyczne podstawy wyboru i kalibracji klasycznych testów glebowych ze szczególnym zwróceniem uwagi na testy stosowane w krajach europejskich, w tym w Polsce. Znaczna część referatu poświęcona jest nowemu, uniwersalnemu testowi glebowemu Mehlich 3, który w najbliższych latach zostanie wprowadzony w naszym kraju, zastępując kilka testów dotychczas stosowanych. Omówiono zalety testu Mehlich 3 zarówno w części służącej doradztwu nawozowemu, jak i ułatwieniu procedur laboratoryjnych. Przedstawiono również wyniki wstępnych badań nad kalibracją tego testu i zaproponowano pierwsze, nie do końca sprawdzone liczby graniczne

dla makroelementów. Wspomniano o pracach nad zastosowaniem zupełnie nowej metody kalibracji testów glebowych poprzez adaptacje metody DRIS, stosowanej obecnie w analizie roślinnej.

Drugi referat obejmuje podstawy teoretyczne i przegląd metod stosowanych w określaniu potrzeb pokarmowych roślin (testy roślinne). Dokonano podziału tych testów na destrukcyjne (bezpośrednie) wymagające pobierania próbek roślin i dalszej ich analizy laboratoryjnej oraz niedestrukcyjne (pośrednie) wykorzystujące korelacje pomiędzy analizą światła pochłanianego oraz odbitego od roślin i zawartością w nich składników mineralnych, przede wszystkim azotu. Zagadnienie testów pośrednich dotyczących analiz stanu całego łąnu roślin poruszono również w następnym referacie.

Referat trzeci dotyczy pośrednich metod analizy stanu żyzności gleby w ujęciu ciągłym, a nie jak dotychczas punktowym. Omówiono podstawy teoretyczne metody pomiaru przewodności elektrycznej gleby oraz jej właściwości spektralnych, wraz z przedstawieniem najnowszych rozwiązań aparatury do pomiarów w polu. W referacie, wykorzystując badania własne, dokonano porównania klasycznych (punktowych) i nowych (ciągłych) metod oceny stanu żyzności gleby w obrębie dużych pól produkcyjnych. Przedstawiono mapy podstawowych właściwości chemicznych gleby pola doświadczalnego w ZD Baborówko wykonane metodami interpolacji (krigingu) danych punktowych i map wykonanych metodą ciągłą z zastosowaniem spektrofotometru polowego. Na zakończenie tego referatu przedstawiono ocenę stanu łąnu roślin (pszenica ozima) z zastosowaniem spektrometru zamontowanego na ciągniku i porównano uzyskaną mapę stanu zieloności roślin z uprzednio omówionymi mapami żyzności gleby. Nowe metody ciągłego pomiaru właściwości chemicznych gleby i stanu odżywienia roślin dostarczają danych koniecznych do planowania precyzyjnego nawożenia.

Czwarty referat, mniej związany z głównym tematem monografii, poświęcony jest metodzie wyznaczania rejonów narażonych na zanieczyszczenie wód przez fosforany. W referacie dokonano przeglądu piśmiennictwa dotyczącego tzw. indeksu fosforowego gleby. Przy sporządzaniu takiego indeksu dla całych pól lub większych obszarów uwzględnia się zarówno czynnik źródła (zawartość fosforu w glebie i bilans fosforu), jak i czynnik transportu (przemieszczanie fosforanów w kierunku pionowym i poziomym). Referat stanowi cenne wprowadzenie do systemu wyznaczenia w naszym kraju stref narażonych na zanieczyszczenie wód fosforanami, przez analogię do stref wrażliwych na zanieczyszczenie azotanami. System taki wydaje się niezbędny wobec ciągle aktualnych zagrożeń ekologicznych.

Kierownik zadania 3.1

dr Kazimierz Kęsik

**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

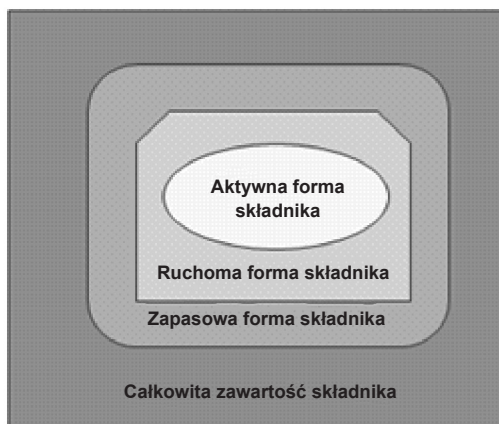
Testy glebowe stanowią podstawę apriorycznego, to znaczy obejmującego okres przed siewem lub sadzeniem roślin, doradztwa nawozowego. W grupie testów glebowych wiodącą pozycję zajmują testy chemiczne polegające na ekstrakcji i oznaczaniu zawartości tak zwanych przyswajalnych form składników mineralnych (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. Pomiedzy 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

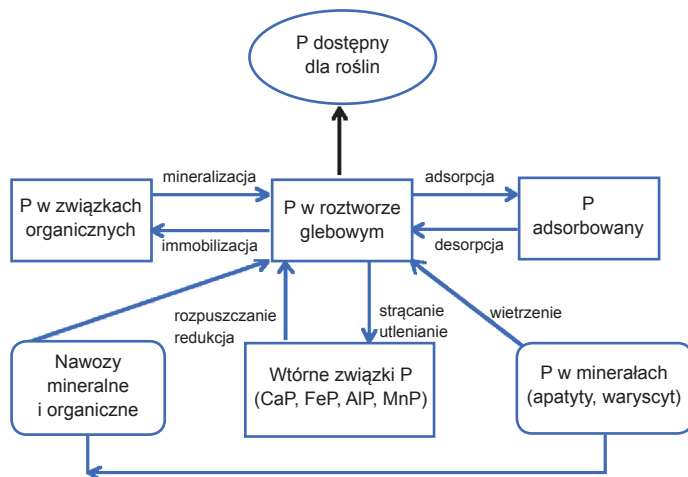
Odczyn gleby, w dużym uproszczeniu jest miarą równowagi pomiędzy jonami „kwaśnymi” i „zasadowymi”. Do jonów kwaśnych należą kation wodoru H^+ i kation glinu Al^{3+} , natomiast jony zasadowe to aniony OH^- i HCO_3^- . Kationy występują w stanie wolnym w roztworze glebowym i w stanie związanym (adsorbowanym)

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 35–5300 $\text{mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$ z medianą ok. 800 $\text{mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$. W warstwie 0–30 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).



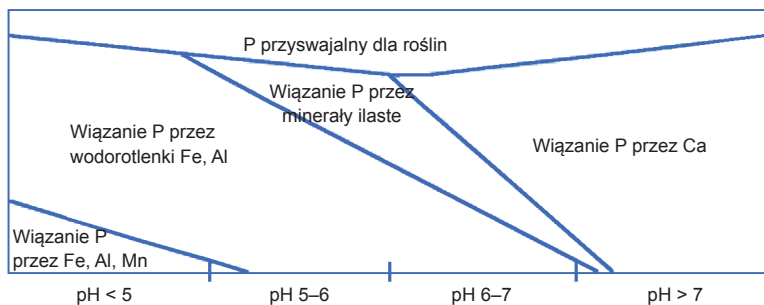
Rys. 2. Formy i obieg fosforu w agrosystemach

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.



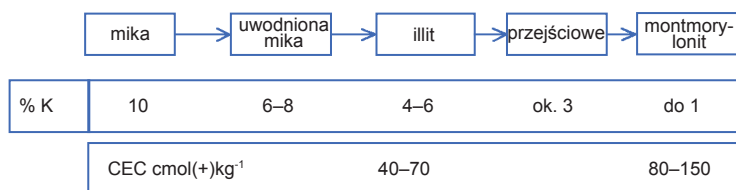
Rys. 3. Przyswajalność fosforu zależnie od pH gleby

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

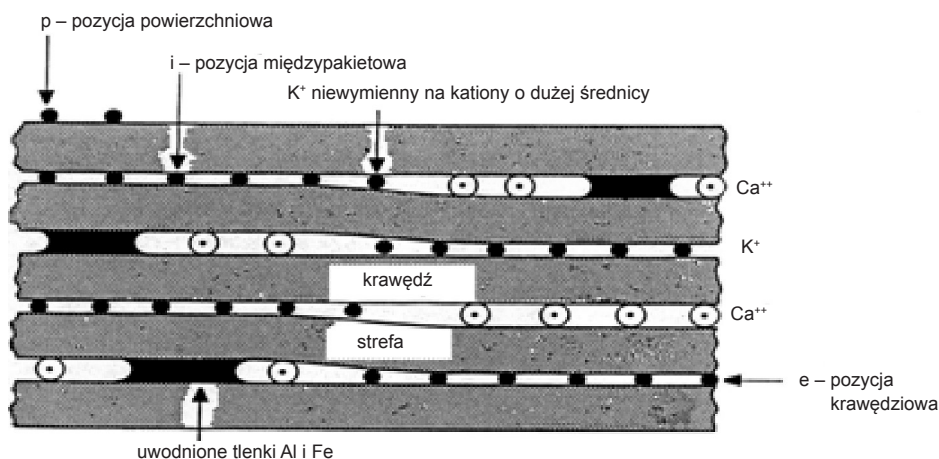
strukturalna i jonowa. Potas strukturalny jako bezwodny kation K^+ o średnicy 0,266 nm tworzy wiązania koordynacyjne z jonami krzemu i glinu w siatkach pierwotnych minerałów glinokrzemianowych. Należy tu przede wszystkim wymienić minerały typu skaleni, jak ortoklaz – $KAlSi_3O_8$ i mikroklin – $KAlSi_2O_6$ 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(+)·kg⁻¹ w porównaniu z ok. 10 cmol(+)·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^+ ·dm⁻³ to znaczy do 40 mg K^+ ·dm⁻³. W warstwie gleby o miąższości 30 cm, optymalnie uwilgotnionej, zawartość potasu w roztworze glebowym wynosi 5–25 kg K·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).



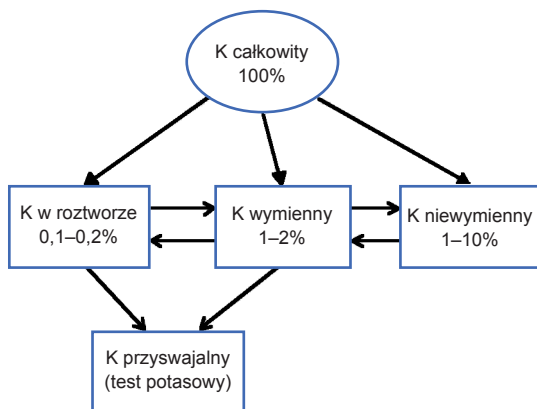
Rys. 5. Pozycje zajmowane przez jony potasu w jednostce strukturalnej uwodnionego illitu

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 Gapona K_G . Wyższa wartość tego współczynnika świadczy o większej sile wiązania jonu potasowego. Wartości współczynników Gapona 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 $\text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$, 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 taniość 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 odnoszona 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:

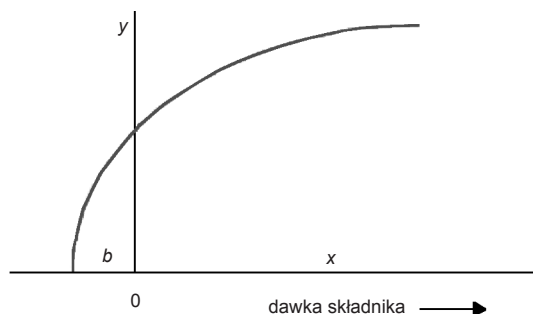
y – plon uzyskany na dawce x składnika,

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. Przetrwały 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”.

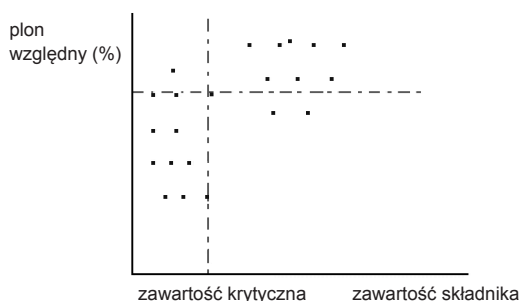
Kalibracja testu

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 określanых 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 wyznaczania 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 zwyczaje 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. Dzieliąc 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

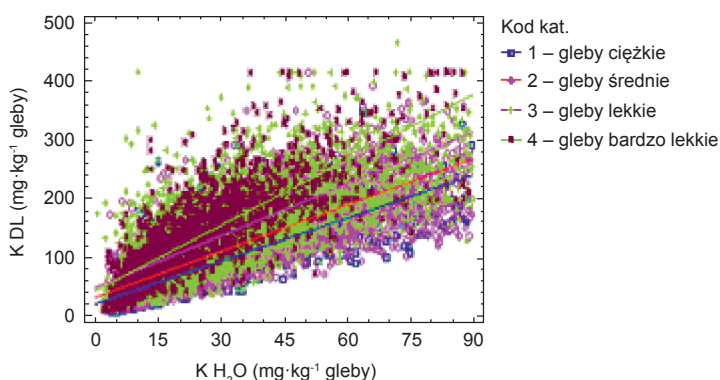
cd. tab. 10

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 pentyłe 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 pentyłe i w obrębie każdego pentyłu 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 przedział 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 kwartyle. 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 Mehlich. 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 Mehlich 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 Mehlich 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 Mehlich 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 równolegle 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 ornych. 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 ornych

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 ornych; 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).

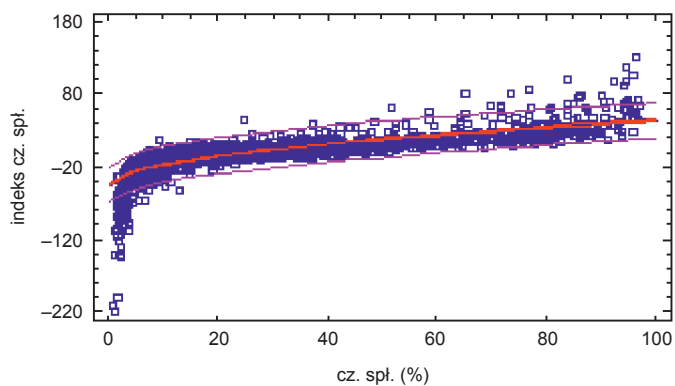
Tabela 21

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

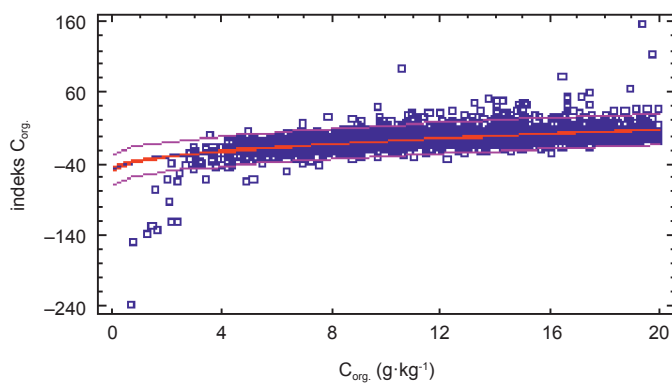
Źródło: opracowanie własne, M. Fotyma

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.



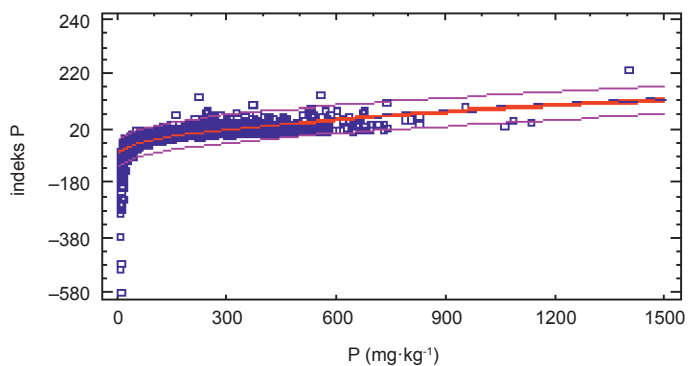
Rys. 10. Zależność pomiędzy zawartością cząstek spławianych w glebie i indeksem DRIS dla tego parametru

Źródło: opracowanie własne, M. Fotyma



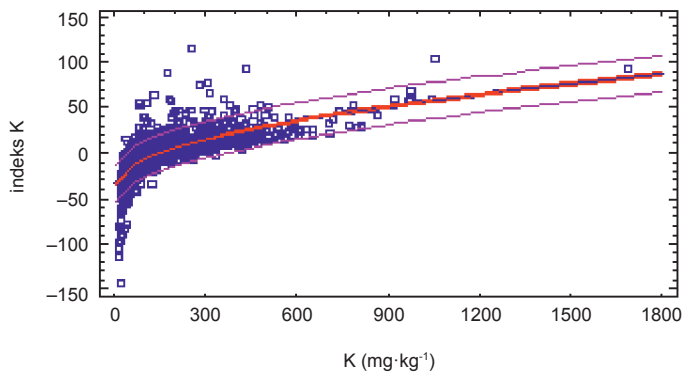
Rys. 11. Zależność pomiędzy zawartością węgla organicznego w glebie i indeksem DRIS dla tego parametru

Źródło: opracowanie własne, M. Fotyma



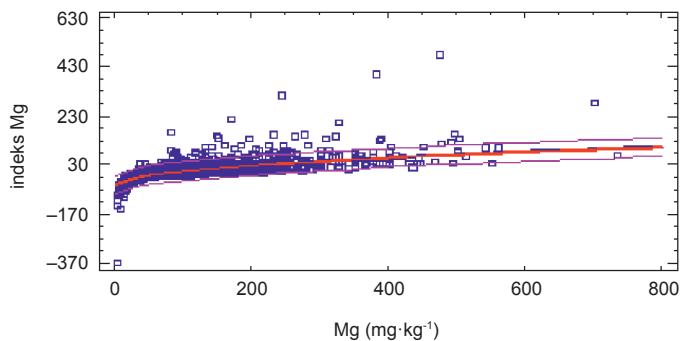
Rys. 12. Zależność pomiędzy zawartością fosforu przyswajalnego w glebie i indeksem DRIS dla tego parametru

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.

Materiał 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 popelnienia 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 mikroskładników

Metoda analizy	Pierwiastek						
	P*	K*	Mg	Zn	Cu	Mn	Fe
Standardowa	88,0	60,0	28,2	73,2	15,0	609	7600
Mehlich	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 makroskładników w glebie oraz odczynu gleby pH, zawartości węgla organicznego i udziału frakcji spalwialnych zamieszczono w tabelach 23 i 34.

Tabela 23

Parametry statystyczne dla przekształconych zawartości makroelementów (n = 4686)

Statystyki	Oznaczenia metodą standardową			Oznaczenia metodą Mehlich		
	P_2O_5 ($mg \cdot 100 mg^{-1}$ gleby)	K_2O ($mg \cdot 100 mg^{-1}$ gleby)	Mg ($mg \cdot 100 mg^{-1}$ gleby)	P ($mg \cdot 100 mg^{-1}$ gleby)	K ($mg \cdot 100 mg^{-1}$ gleby)	Mg ($mg \cdot 100 mg^{-1}$ 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 spalwialnych oraz zawartości węgla organicznego w glebie

Parametry statystyczne	Odczyn gleby (pH)	Udział części spalwialnych (%)	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 spalwialnych (%)	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:

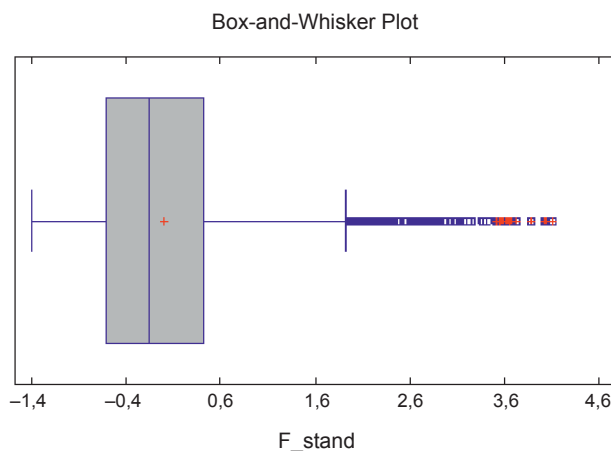
$$F_{st} = 0,528 \text{ pH} + 0,002 \text{ fr} < 0,02 + 0,069 \text{ C}_{org.} + 0,044 \text{ P}_2\text{O}_5 + 0,059 \text{ K}_2\text{O} + 0,055 \text{ Mg} - 5,423.$$

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 spalwialnych 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 Mehlich’a od strony teoretycznej (możliwość oznaczenia tej samej formy wszystkich składników w jednym wyciągu) i od strony laboratoryjnej (prostota i taniość postępowań) zostały pokrótce omówione w poprzednich częściach artykułu.

Kalibracja testu Mehlich’a 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 Mehlich’a 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 obydwoima 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. Dosyć 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 wariancje 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. Beaupils 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.: Przystawalność 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., Ehlerdt 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., Piśkuła D., Tujaka A., Podleśna A., Ochala 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. Ochala 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. Soon 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 Żywienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. (81) 886 34 21
e-mail: fot@iung.pulawy.pl

Damian Wach

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

METODY OCENY STANU ODŻYWIENIA ROŚLIN*

Słowa kluczowe: stan odżywienia roślin, metody wizualne, polowe metody instrumentalne, metody chemicznej analizy roślin

Wstęp

W zrównoważonej gospodarce rolnej jednym z ważniejszych elementów jest racjonalne gospodarowanie nawozami. Odpowiednie zaopatrzenie roślin w makro- i mikroelementy jest nieodzowne do osiągnięcia dobrego plonu o wysokiej jakości. Należy jednak pamiętać, że zarówno dla roślin, jak i środowiska nadmiar wprowadzonych składników pokarmowych jest szkodliwy, a nawet toksyczny. W myśl zrównoważonej produkcji, roślinom należy dostarczyć taką ilość składników odżywczych, aby mogły w pełni się rozwinąć i wydać potencjalnie możliwy do osiągnięcia plon części użytkowych, a jednocześnie zminimalizować straty związane z rozpraszaniem składników pokarmowych do otoczenia.

W ciągu okresu wegetacyjnego zawartość substancji organicznych oraz skład mineralny roślin ulega ciągłym zmianom. Są one rezultatem wpływu czynników związanych z samymi roślinami, tj. gatunkiem, odmianą, fazą rozwojową i czynników zewnętrznych, tj. warunki klimatyczne i glebowe czy nawożenie. Optymalne zaopatrzenie roślin w niezbędne składniki pokarmowe jest szczególnie ważne w tzw. „fazach krytycznych” wzrostu i rozwoju. Niedobory pierwiastków w tych okresach wpływają znacząco na obniżenie wysokości i jakości plonu. Z diagnostycznego punktu widzenia istotne jest, aby w tych okresach określić aktualny stan odżywienia roślin niezbędnymi składnikami mineralnymi, a w przypadku stwierdzonych niedoborów wprowadzić korektę nawożenia. W tym celu opracowano szereg metod, w których poprzez obserwacje, użycie odpowiedniej aparatury czy analizy chemicz-

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

ne określa się aktualny stan odżywienia roślin. Metody te można podzielić na trzy grupy: metody wizualne, polowe metody instrumentalne oraz metody analizy chemicznej.

Metody wizualne

Metody wizualne są najstarszą metodą oceny niedoborów składników pokarmowych, niekiedy również ich nadmiaru. Ocena wizualna jest metodą jakościową i subiektywną, w dużym stopniu uzależnioną od obserwatora. Znajduje zastosowanie głównie przy ocenie ostrych niedoborów, ponieważ mniejsze nie powodują zmian w wyglądzie roślin i ładu. Diagnostyka wizualna jest dość trudna, a objawy często nie są jednoznaczne dla niedoboru konkretnego składnika. Zdarza się, że niedoborowi jednego pierwiastka towarzyszy niedobór innego. Podobne efekty w zmianie wyglądu roślin mogą dawać też porażenia przez patogeny. Ułatwieniem w tego typu ocenie mogą być wzorce lub atlasy z uwidocznionymi symptomami niedoboru czy nadmiaru danego pierwiastka. Objawy różnią się między gatunkami i odmianami roślin, uwidaczniają się w różnym stopniu w zależności od ostrości niedoboru konkretnego składnika, jak również mogą zależeć od uwarunkowań środowiskowych.

Istotną rolę w gospodarce mineralnej roślin odgrywają interakcje poszczególnych składników. Występowanie w nadmiarze któregoś z pierwiastków może hamować pobieranie innych. Dobrym przykładem jest konkurencja jonów dwuwartościowych – magnezu i wapnia. Magnez, którego duże nagromadzenie w podłożu zwiększa jego akumulację w roślinie, powoduje jednocześnie ograniczenie pobierania przez rośliny wapnia, co w konsekwencji prowadzi do jego niedoboru. Innym przykładem jest ograniczone pobieranie jonów fosforowych w warunkach nadmiaru jonów azotanowych szczególnie w warunkach wysokiego pH gleby, tj. powyżej 7. Należy o tym pamiętać w trakcie oceny objawów niedoborów składników (6, 12).

Zawartości poszczególnych składników mineralnych w roślinach mogą wahać się w różnych przedziałach, zależą one od warunków środowiskowych, nawożenia, gatunku i odmiany, wieku oraz części rośliny. Przy ustalaniu stanu odżywienia składnikami pokarmowymi metodą wizualną, dobrze jest posiadać dodatkowe informacje o warunkach glebowych, pogodowych czy stosunkach wodno-powietrznych gleby i pH gleby. Niskie temperatury czy susza mogą powodować gorsze pobieranie potasu lub fosforu. Mikroelementy takie jak: żelazo, mangan, miedź, cynk, bor czy kobalt są dobrze pobierane przy kwaśnym lub lekko kwaśnym odczynie gleby, wzrost pH powyżej 6 powoduje ograniczenie pobierania tych składników, nawet przy dostatecznej ich zawartości w glebie. Molibden natomiast zachowuje się odwrotnie – lepiej jest pobierany przy pH powyżej 7 (6, 12). W takich przypadkach zalecane jest uzupełnienie brakujących roślinom składników w formie nawożenia dolistnego.

W tabeli 1 i 2 podano przeciętne zawartości pierwiastków w roślinach oraz objawy ich niedoboru.

Tabela 1

Przeciętne zawartości makroelementów w roślinach oraz objawy ich niedoboru

Pierwiastek	Zawartość (% s.m.)	Objawy niedoboru
Azot (N)	0,1–6,0	hamowanie wzrostu, szczególnie liści, małe krzewienie, chloroza liści starszych, łatwa reutilizacja
Potas (K)	0,5–10,0	plamy chlorotyczne i nekrotyczne (od wierzchołka i brzegów blaszki) na liściach starszych (dolnych), wiotka łodyga, zahamowany wzrost, szczególnie organów spichrzowych i reprodukcyjnych, łatwa reutilizacja
Fosfor (P)	0,04–1,0	zahamowanie wzrostu, szczególnie pędu, w początkowych etapach stymulacja wzrostu korzeni; liście ciemnozielone, często od dolnej strony fioletowopurpurowe, łatwa reutilizacja
Wapń (Ca)	0,2–5,0	drastyczne zahamowanie wzrostu, zamieranie wierzchołków pędów, śluzowacenie pędów, nietypowe chlorozy; deformacja liści, zasychanie wierzchołków liści, szczególnie kapustnych; sucha zgnilizna owoców: pomidora i papryki, gorzka plamistość jabłek; słaba reutilizacja międzyorganowa
Magnez (Mg)	0,5–0,8	chlorozy przechodzące w nekrozy (na liściach dolnych piętrowe plamy między żyłkami), w skrajnych przypadkach nekroza brzegów liści; hamowanie wzrostu szczególnie korzeni, łatwa reutilizacja
Siarka (S)	0,05–0,8	chloroza całych liści, żyłki czerwone, czasem brak turgoru liści, słaba reutilizacja

Źródło: Starck, 2007 (12)

Tabela 2

Przeciętne zawartości mikroelementów w roślinach oraz objawy ich niedoboru

Pierwiastek	Zawartość (mg·kg ⁻¹)	Objawy niedoboru
Żelazo (Fe)	50–1000	chloroza całych liści młodych, bardzo mała reutilizacja
Miedź (Cu)	1–30	nekrotyczne plamy, niebieskozielona barwa liści, czasem brak turgoru; zaburzenia w formowaniu organów generatywnych, zahamowanie wypełniania ziarniaków zbóż („choroba nowin”) na glebach świeżo wziętych pod uprawę i torfowych
Bor (B)	1–115	nekroza wierzchołka pędu i korzeni; liście kruche, zamieranie kwiatów, brak zawiązywania owoców, owoce niewyrośnięte, skorkowaciałe, spękane; nekrozy floemu; wyjątkowo mało ruchliwy
Cynk (Zn)	20–1500	zahamowanie wydłużania międzywęźli (u drzew), redukcja powierzchni blaszek liściowych; jasnozielone przebarwienia liści starszych
Mangan (Mn)	20–500	mozaikowa chloroza, nekroza międzyżyłkowa, niekiedy smugowate plamy (u zbóż); zahamowanie wzrostu, opadanie liści; mała reutilizacja

Pierwiastek	Zawartość (mg·kg ⁻¹)	Objawy niedoboru
Molibden (Mo)	0,1–2	redukcja rozwoju blaszki liściowej, chloroza młodych liści; zahamowanie brodawkowania i rozwoju roślin motylkowatych, deformacja pędu
Nikiel (Ni)	0,1–1	nekroza wierzchołków liści
Chlor (Cl)	10–5500	chloroza i nekroza liści, redukcja wzrostu liści, nie występuje w warunkach naturalnych; łatwa reutilizacja

Źródło: Starck, 2007 (12)

Polowe metody instrumentalne

Opisane powyżej metody wizualne są metodami subiektywnymi, a przez to nieściślymi. W praktyce dąży się do obiektywizacji i uniezależnienia wyników pomiarów od obserwatora. Dzięki postępowi technicznemu do oceny zawartości składników mineralnych (głównie azotu) w roślinach można zastosować aparaturę wykorzystującą zjawiska związane z charakterystyką światła (pochłanianie, odbicie). Naukowe podstawy tych metod opierają się o właściwości chlorofilu związane z jego zdolnością do pochłaniania światła tylko o określonych długościach fali i wykorzystywania w procesie fotosyntezy. W trakcie wieloletnich Wood i in. (14) wykazali, że zawartość azotu (jednego z głównych czynników plonotwórczych) jest ściśle powiązana z zawartością chlorofilu w liściach roślin. Do metod wykorzystujących tę zależność należą testy SPAD i NDVI.

Z praktycznego punktu widzenia istotną zaletą pomiarów SPAD i NDVI jest łatwość ich wykonania oraz brak konieczności pobierania prób roślinnych i przeprowadzania analiz chemicznych. Pomiary te są wykonywane bezpośrednio w polu. Jedynym utrudnieniem jest konieczność nabycia aparatów pomiarowych, co generuje pewne koszty. Przyrządy te są jednak obecnie dość łatwo dostępne na rynku.

Test SPAD

Test SPAD (Soil Plant Analysis Development), tzw. indeks zieloności liści albo zawartości chlorofilu, służy do oceny stanu odżywienia roślin azotem. W metodzie tej pomiaru dokonuje się bezpośrednio w polu na liściach roślin bez potrzeby ich zrywania, przy użyciu instrumentu SPAD-502 nazywanego też chlorofilometrem lub N-testerem (rys. 1).

Test SPAD polega na pomiarze różnic pomiędzy ilością światła absorbowanego (o długości fali 650 nm) i przepuszczanego (o długości fali 940 nm) przez tkanę



Rys. 1. N-tester SPAD 502
(fot. D. Wach)

liścia. Iloraz tych różnic, zgodnie z poniższym wzorem, jest indeksem SPAD:

$$\text{SPAD} = (940 \text{ nm} - 650 \text{ nm}) / (650 \text{ nm} - 940 \text{ nm})$$

Wynik ten, obliczany przez wbudowany mikroprocesor na podstawie 30 prawidłowo wykonanych pomiarów, określa średnią zawartość chlorofilu i jest wyświetlany na ekranie aparatu w formie tzw. jednostek SPAD, w skali 0–800. Przy takim samym stanie odżywienia roślin azotem odczyty SPAD są jednak zróżnicowane pomiędzy gatunkami i odmianami roślin uprawnych. Różnice te są uwarunkowane genetycznie. Dlatego też test ten został skalibrowany w Zakładzie Żywienia Roślin i Nawożenia IUNG-PIB w Puławach. W tabeli 3 przedstawiono przykładowe zróżnicowanie zawartości chlorofilu w liściach odmian pszenicy (wartości SPAD), które podzielono na trzy grupy.

Tabela 3

Charakterystyka niektórych odmian pszenicy ozimej pod względem zawartości chlorofilu

Zawartość chlorofilu					
mała		średnia		duża	
odmiana	SPAD	odmiana	SPAD	odmiana	SPAD
Maltanka	540	Begra	580	Juma	625
Kamila	550	Elena	580	Mewa	628
Gama	557	Emika	595	Kobra	635
Almari	560	Mikon	595	Jawa	640
Liryka	570	Jubilatka	600	Tercja	645
		Rysa	613	Zorza	647
		Korweta	615	Zyta	710
		Mikulka	615		

Źródło: Fotyma, 2002 (4)

Test, aby mógł być wykorzystany do oceny stanu odżywienia roślin azotem, wymaga wyznaczenia krytycznych wartości indeksu odpowiadających optymalnemu stanowi odżywienia tym składnikiem. Jeżeli zmierzone wartości SPAD są niższe od krytycznych, wskazane jest nawożenie uzupełniające. Test SPAD znalazł szczególne zastosowanie w korekcie nawożenia pogłównego roślin uprawnych azotem, szczególnie w fazie strzelania w źdźbło zbóż (BBCH 30-31) (tab. 4).

Tabela 4

Wartości odczytów SPAD dla zbóż w zależności od dawek azotu

Dawka N (kg·ha ⁻¹)	Pszenica ozima		Pszenżyto		Żyto		Pszenica jara	
	SPAD	odch. st.	SPAD	odch. st.	SPAD	odch. st.	SPAD	odch. st.
strzelanie w źdźbło (BBCH 30-31)								
0	369	40	473	98	462	15	364	10
25	443	25	480	70	474	28	405	39
50	486	16	500	70	500	21	450	26
75	532	14	555	49	521	18	474	37
100	545	14	585	42	529	21	500	24
125	560	14	600	42	560	16	510	29
kłoszenie (BBCH 50-51)								
0	335	48	443	80	451	23	417	16
25	392	39	472	82	454	30	478	16
50	445	35	515	54	498	16	520	14
75	495	32	558	49	520	17	555	13
100	540	31	590	60	538	19	565	16
125	570	33	620	46	550	20	598	12

Źródło: Fotyma i Bezdusznik, 2000 (5)

Test NDVI

Test NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) jest podstawowym indeksem roślinnym stosowanym w teledetekcji. U podstaw funkcjonowania wskaźników wegetacji leżą właściwości występujących w każdej roślinie barwników asymilacyjnych oraz ich zdolności do absorpcji i odbicia promieniowania elektromagnetycznego. Rośliny mają zdolność do pochłaniania promieniowania w zakresie długości fali 400–700 nm, czyli w zakresie światła widzialnego. Maksimum absorpcji dla chlorofilu przypada w obrębie światła czerwonego (650–720), tzn. w obszarze aktywnym fotosyntetycznie. Wartość odbicia tego promieniowania przez rośliny dobrze zaopatrzone w substancje odżywcze wynosi tylko kilka procent. Każdy stres powodujący zmniejszenie zawartości chlorofilu w roślinie powoduje redukcję absorpcji światła, przy jednoczesnym zwiększeniu odbicia promieniowania czerwonego.

Znormalizowany Wskaźnik Wegetacji (NDVI) wyrażany jest wzorem:

$$NDVI = (NIR - R)/(NIR + R)$$

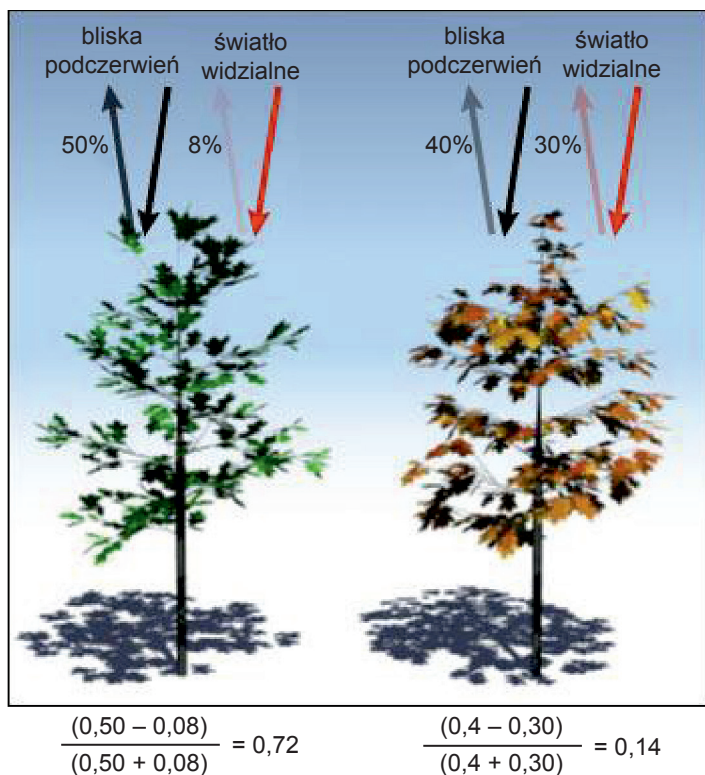
gdzie:

R – wartość odbicia promieniowania w paśmie czerwonym,

NIR – wartość odbicia promieniowania w bliskiej podczerwieni.

Wskaźnik NDVI przyjmuje wartości od –1 do 1. Typowy przedział wskaźnika dla roślin waha się od 0,4 do 0,9. Rysunek 2 przedstawia zasadę tworzenia wskaź-

nika NDVI. Rośliny w dobrej kondycji (odżywione, bez działających na nie stresów) pochłaniają ponad 92% światła widzialnego, a odbijają 50% promieniowania podczerwonego – $NDVI = 0,72$ (wg rys. 2). Gdy stan równowagi w roślinie zostaje zachwiany lub jest pod działaniem niekorzystnych czynników, relacje te zmieniają się. Fotosyntetycznie pochłonięte (promieniowanie widzialne) zostaje już tylko 70% i jednocześnie zmniejsza się do 40% ($NDVI = 0,14$) ilość światła odbitego w zakresie bliskiej podczerwieni.



Rys. 2. Zasada tworzenia wskaźnika zieleni NDVI

Źródło: Mikołowicz, 2008 (9)

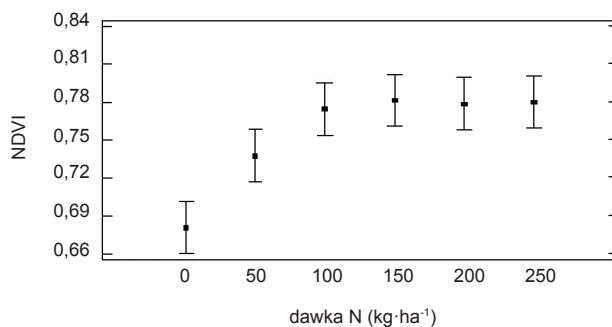
Przykładem urządzenia wykorzystywanego do pomiaru wskaźników wegetacji jest GreenSeeker produkowany przez firmę NTech (rys. 3). Przyrząd emituje promieniowanie o długości fali 600 nm (czerwień) oraz 770 nm (bliska podczerwień). Detektor rejestruje promieniowanie odbite od roślin. Wartości te przeliczane są na wskaźniki zieleni i zapisywane w pamięci wewnętrznego komputera.



Rys. 3. Urządzenie do pomiaru wskaźników wegetacji (GreenSeeker, NTech Instruments Inc.)

Źródło: Mikołowicz, 2008 (9)

Test NDVI służy głównie do oceny stanu i kondycji łanu roślin, ale może być również używany do określenia stanu odżywienia azotem. Wyniki wielu badań mających na celu określenie relacji pomiędzy zawartością azotu w roślinach, zawartością chlorofilu a charakterystyką promieniowania odbitego od roślin wykazały zależności pomiędzy nawożeniem azotem a charakterystyką spektralną roślin zbożowych (13, 15). Stwierdzono również istotny wpływ dawki N na zawartość chlorofilu w roślinach (14) oraz istotną zależność pomiędzy zawartością chlorofilu w roślinach a ich wskaźnikami wegetacji (11, 15) (rys. 4).



Rys. 4. Wpływ dawki N na wskaźnik NDVI mierzony instrumentem GreenSeeker

Źródło: Mikołowicz, 2008 (9)

Wskaźnik NDVI znalazł szczególne zastosowanie w rolnictwie precyzyjnym. Urządzenia mierzące ten wskaźnik są montowane na ciągnikach i połączone z komputerem sterującym rozsiewaczem bądź opryskiwaczem. Pozwala to korygować dawkę nawozu lub środka ochrony roślin w trakcie zabiegu agrotechnicznego.

Metody chemicznej analizy roślin

Trzecią grupą metod oceny stanu odżywienia roślin są metody bezpośrednie, oparte na analizach chemicznych. Określają one dokładne zawartości poszczególnych składników pokarmowych w roślinach i pozwalają na wykrycie nawet nieznacznych niedoborów, których nie można zaobserwować za pomocą metod wizualnych.

Jak wspomniano wcześniej, zawartości poszczególnych pierwiastków w trakcie wzrostu i rozwoju roślin ulegają ciągłym zmianom. Wraz z wiekiem rośliny udział trzech głównych makroskładników: azotu, fosforu i potasu maleje, a zawartość makroskładników drugoplanowych, tj. wapnia, magnezu i siarki oraz mikroskładników – na ogół wzrasta. Również poszczególne części i organy roślin wykazują zróżnicowanie zawartości składników mineralnych. Dlatego należy pamiętać, że w metodach bezpośrednich istotnymi elementami w trakcie interpretacji wyników analiz są: wiek (faza rozwojowa) rośliny, część (organ), a nawet sposób pobrania prób roślinnych.

Analizy chemiczne na zawartość składników pokarmowych pozwalają określić całkowitą zawartość badanego składnika lub też jego formę w wybranych częściach wskaźnikowych roślin, np. w liściach czy korzeniach oraz w całych częściach nadziemnych roślin. Uzyskane wyniki podaje się w procentach zawartości (dla makroelementów) lub w $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (dla mikroelementów), najczęściej w odniesieniu do suchej masy. Analizy chemiczne zawartości pierwiastków wykonuje się w masie roślin oraz niekiedy w soku komórkowym.

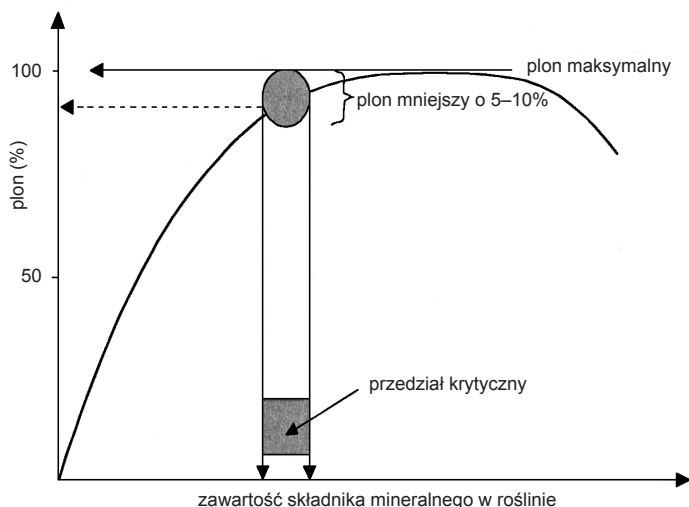
Pomiary w masie roślin

Metody te są najdokładniejszymi z omówionych metod, niestety posiadają kilka niedogodności. W celu poprawnego określenia zawartości składników pokarmowych i właściwej interpretacji wyników analiz należy zachować określone procedury pobierania (określona faza i część wskaźnikowa rośliny) i suszenia prób, gdyż w badaniach polowych trudne jest określanie zawartości pierwiastków w świeżej masie. Wśród tych metod można wymienić kilka najczęściej stosowanych w praktyce, tj.: metoda przedziałów krytycznych, test NNI, metoda DRIS.

Metoda przedziałów krytycznych

Przedział krytyczny określa w roślinie poziom zawartości składnika pokarmowego, który zapewnia uzyskanie plonu, lub szybkości wzrostu rośliny na poziomie 95–100% wartości maksymalnych. Koncepcja przedziału krytycznego zakłada istot-

ny wpływ fazy rozwojowej rośliny i określonego jej stanu odżywienia na realizację 95–100% plonu maksymalnego uprawianej odmiany, zgodnie ze schematem na rysunku 5.



Rys. 5. Graficzna ilustracja przedziału krytycznego składnika mineralnego w roślinie

Źródło: Grzebisz, 2008 (7)

Przedział krytyczny (przedział zawartości optymalnych) dla gatunku wyznaczany jest za pomocą dwóch parametrów oceny szybkości wzrostu rośliny: względnej szybkości wzrostu (RGR – relative growth rate) i absolutnej szybkości wzrostu łanu (ACGR – absolute crop growth rate). Wskaźniki te służą do wyznaczania dwóch faz krytycznych tej samej rośliny. Dla zbóż RGR osiąga największe wartości w końcu fazy krzewienia (BBCH 28-29), a ACGR w fazie od początku ukazywania się języczka liścia flagowego (BBCH 37) do końca kłoszenia (BBCH 59). W obu tych fazach krytycznych azot pełni określone funkcje plonotwórcze. W pierwszej – koniec fazy krzewienia – azot buduje potencjał plonowania (wpływa na wzrost liczby źdźbeł na jednej roślinie i liczby kłosek w kłosie), w drugiej, tj. od końca fazy strzelania w źdźbło do początku kłoszenia, kiedy ustala się rzeczywista struktura plonu ziarna, azot kontroluje tempo redukcji liczby kłosek w kłosie oraz płodnych kwiatków w kłosie. Z praktycznego punktu widzenia, o ile podanie azotu w pierwszym terminie (gdy wynik analizy chemicznej jest poniżej przedziału krytycznego) istotnie wpłynie na tworzenie elementów struktury plonu, o tyle w drugim, już tylko skoryguje wcześniej ustalony poziom plonowania (7).

W tabeli 5 przedstawiono przedziały krytyczne zawartości różnych pierwiastków dla wybranych roślin uprawnych.

Tabela 5

Przedziały krytyczne zawartości składników pokarmowych w suchej masie dla niektórych roślin uprawnych

Faza rozwojowa, Termin	Makroelementy (% s.m.)					Mikroelementy (mg·kg ⁻¹)			
	N	P	K	Ca	Mg	B	Mo	Cu	Mn
pszenica ozima, wszystkie nadziemne części roślin powyżej 5–8 cm wysokości									
Strzelanie w źdźbło, liść flagowy (35-37 BBCH)	2,3–3,8	0,25–0,5	3,3–4,5	0,35–1,0	0,1–0,23	5–10	0,1–0,3	5–10	30–100
kukurydza, wszystkie liście w pełni rozwinięte									
Rośliny o wysokości 40–60 cm	3,5–5,0	0,35–0,6	3,0–4,5	0,3–1,0	0,25–0,5	7–15	0,2–0,5	7–15	40–100
ziemniak, wszystkie liście w pełni rozwinięte									
Początek kwitnienia	5,0–6,5	0,4–0,6	5,0–6,6	0,6–2,0	0,25–2,8	25–70	0,2–0,5	7–15	40–300

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Bergman, 1992 (1) oraz Reuter i Robinson, 1997 (10)

Test NNI

Test NNI – indeks odżywienia azotem (Nitrogen Nutrition Index), służy do oceny stanu odżywienia roślin azotem i stanowi uściślenie metody przedziałów krytycznych. Zgodnie z teoretyczną podstawą tego testu, według Lemaira (8) przyjmuje się, że w rozwoju ontogenetycznym roślin istnieje ścisła zależność pomiędzy zawartością azotu i nagromadzoną suchą masą.

Test NNI wyrażany jest jako iloraz aktualnej i krytycznej zawartości azotu w roślinach, przy określonym plonie ich suchej masy według następującego wzoru:

$$NNI = N_{akt}/N_{kryt}$$

gdzie:

N_{akt} – aktualna zawartość N w roślinie,

N_{kryt} – krytyczna zawartość N w roślinie,

Krytyczną zawartość azotu oblicza się ze wzoru:

$$N_{kryt} = a(SM)^b$$

gdzie:

N_{kryt} – zawartość azotu ogólnego w suchej masie roślin optymalnie odżywionych azotem,

SM – plon suchej masy (t·ha⁻¹),

a i b – współczynniki równania.

Wartość ilorazu pomiędzy zawartością aktualną i krytyczną azotu bliska jedności świadczy o optymalnym odżywieniu roślin tym pierwiastkiem. Jeżeli zawartość azotu w pobranej próbce jest mniejsza od krytycznej (wartość NNI < 1), świadczy to o niedostatecznym stanie odżywienia roślin tym składnikiem. Trzeba wówczas zastosować uzupełniającą dawkę azotu.

Interpretacja testu NNI nie jest związana z fazą rozwojową zbóż, ale próbka roślinna musi być pobrana w sposób ilościowy, ponieważ konieczne jest oznaczenie aktualnego plonu suchej masy. W celu oceny stanu odżywienia roślin azotem należy również oznaczyć aktualną zawartość azotu ogólnego, a także dysponować odpowiednią krzywą krytyczną (tab. 6).

Tabela 6

Wartości wskaźników NNI dla zbóż w zależności od dawek azotu

Dawka N (kg·ha ⁻¹)	Pszenica ozima		Pszenżyto ozime		Żyto		Pszenica jara	
	średnia	odch. st.	średnia	odch. st.	średnia	odch. st.	średnia	odch. st.
0	0,58	0,09	0,51	0,12	0,52	0,13	0,58	0,13
25	0,65	0,10	0,64	0,15	0,65	0,19	0,64	0,19
50	0,78	0,10	0,68	0,15	0,73	0,10	0,79	0,19
75	0,87	0,14	0,79	0,14	0,81	0,21	0,92	0,21
100	0,96	0,16	0,84	0,14	0,89	0,20	1,00	0,20
125	1,01	0,14	0,90	0,14	0,98	0,20	1,11	0,20

Źródło: Fotyma i Bezdusznik, 2000 (5)

Metoda DRIS

Istotą metody DRIS (Diagnosis and Recommendation Integrated System), określanej inaczej jako Zintegrowany System Diagnozy i Zaleceń, są relacje pomiędzy zawartościami poszczególnych pierwiastków występujących w roślinie. Procedura diagnostyczna składa się z dwóch etapów: obliczania indeksów oraz interpretacji uzyskanych norm DRIS. Indeksy DRIS są względną miarą niedoboru lub nadmiaru składników pokarmowych w badanej roślinie w stosunku do przyjętej normy. Normy DRIS są to stosunki składników pokarmowych dla populacji o wysokich plonach, uwzględniające gatunek i fazę rozwojową rośliny. Podaje się je w formie dwóch liczb: średniej arytmetycznej i współczynnika zmienności lub wariancji (tab. 7).

Podstawowym założeniem metody DRIS jest odniesienie uzyskanych wyników, przedstawiających rzeczywiste relacje zachodzące między pierwiastkami, do ściśle zdefiniowanych stosunków w grupie wysokich plonów. Prowadzona ocena sprowadza się do poszukiwania pierwiastka lub pierwiastków, które z powodu niedoboru lub nadmiaru zakłócają stan równowagi żywieniowej rośliny.

Metoda DRIS opiera się na założeniu, że suma indeksów z uwzględnieniem znaków zawsze równa się zero. Duża (powyżej 15) wartość bezwzględna sumy indek-

sów świadczy o niezrównoważonym stanie odżywienia rośliny. Metoda ta pozwala również uszeregować indeksy od najmniejszych (ujemnych) do największych (dodatnich), co odpowiada uszeregowaniu pierwiastków od największego niedoboru do największego nadmiaru.

Tabela 7

Normy DRIS dla pszenicy i żyta w warunkach Polski

Parametry analizy roślin	Normy DRIS w fazie strzelania w źdźbło			
	pszenica ozima		żyto	
	średnia	wariancja	średnia	wariancja
n/p*	7,72	2,455	6,90	1,221
n/k	0,89	0,032	0,98	0,038
n/ca	7,73	2,966	8,23	2,744
n/mg	28,12	72,440	27,87	32,692
p/k	0,12	0,000	0,14	0,000
p/ca	1,06	0,145	1,23	0,120
p/mg	3,82	2,264	4,08	6,655
k/ca	9,09	8,035	8,80	8,971
k/mg	31,76	45,825	29,08	46,76
ca/mg	3,68	0,687	3,48	0,682

* jest to stosunek procentowy zawartości N w s.m. do procentowej zawartości P w s.m.

Źródło: Faber i in., 1988 (3)

Pomiary w soku komórkowym roślin

Pomiary w soku komórkowym, w przeciwieństwie do pomiarów w masie rośliny, posiadają tę zaletę, że nie muszą być przeprowadzane w warunkach laboratoryjnych (pomimo istnienia metod analitycznych do tego typu analiz). Jest to możliwe dzięki rozwojowi techniki i dostępności na rynku przenośnych aparatów do pomiaru zawartości pierwiastków w soku komórkowym roślin.

Przykładem takiego urządzenia jest aparat Cardy K+ meter firmy Spectrum Technologies (rys. 6). Jest to przenośny aparat służący do pomiaru zawartości potasu w tkankach roślinnych, glebie, owocach (dostępne są również wersje do pomiaru jonów azotanowych, sodowych i wapniowych). Zaopatrzony jest on w wysoce selektywną płaską jonoelektrodę przepuszczalną tylko dla jonów potasowych. Pomiar przy użyciu tego aparatu jest prosty, szybki i dokładny; wymaga tylko niewielkiej ilości, tj. dwie, trzy krople badanej substancji w postaci płynnej. W celu wykonania poprawnego pomiaru należy przeprowadzić dwupunktową kalibrację aparatu przy użyciu roztworów standardowych (załączanych do urządzenia), zakropić badany roztwór, np. wyciśnięty sok z łodygi rośliny i odczytać wynik pomiaru na wyświetlaczu. Przykładowe zawartości potasu w soku komórkowym uzyskane przy użyciu aparatu Cardy K+ meter u wybranych roślin uprawnych przedstawia tabela 8.



Rys. 6. Cardy K+ meter, Spectrum Technologies
(fot. D. Wach)

Tabela 8

Zawartości K w soku komórkowym pobranym z ogonków liściowych wybranych roślin uprawnych

Uprawa	Faza rozwojowa	Zawartość K (ppm)
Papryka	pierwsze pąki kwiatowe	3200–3500
	pierwsze otwarte kwiaty	3000–3200
	połowa dojrzałości	3000–3200
	pierwszy zbiór	2400–3000
	drugi zbiór	2000–2400
Ziemniak	pęd o długości 20 cm	4500–5000
	pierwsze otwarte kwiaty	4500–5000
	50% otwartych kwiatów	4000–4500
	100% otwartych kwiatów	3500–4000
	opadanie łodyg	2500–3000
Arbuz	pęd o długości 15 cm	4000–5000
	owoc o długości 5cm	4000–5000
	połowa dojrzałości	3500–4000
	pierwszy zbiór	3000–3500

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z Cardy Potassium K+ meter Manual (2)

Podsumowanie

Ocena stanu odżywienia roślin składnikami mineralnymi w trakcie ich wegetacji ma na celu wykrywać nieprawidłowości w żywieniu uprawianych roślin. Dzięki dostępności różnych metod oceny, a zwłaszcza metod polowych, można szybko ocenić stan odżywienia roślin, ułatwiając rolnikowi podjęcie decyzji o zastosowaniu dawki korygującej nawożenie w celu uzyskania zadowalającego plonu części użytkowych. Niestety ze względu na naturę fosforu i potasu możliwości interwencyjne korekcji odżywienia tymi składnikami są znacznie mniejsze niż azotem i niektórymi mikroelementami (B, Cu, Mn, Zn). Nawożenie interwencyjne w trakcie wegetacji podaje się najczęściej dolistnie w formie płynnej. Zastosowanie mocznika i mikroelementów zwłaszcza w formie schelatowanej, w postaci dolistnego dokarmiania roślin, pozwala tym składnikom pokarmowym szybko wnikać do wnętrza rośliny i wykazać działanie nawozowe.

Literatura

1. Bergman W.: Nutritional disorders of plants: development, visual and analytical diagnosis. Gustav Fisher Verlag Jena, Stuttgart, New York, 1992, ss. 741.
2. Cardy Potassium K+ meter Manual, Spectrum Technologies, Inc., ss. 9.
3. Faber A., Filipiak K., Kryszkowska T.: Zalecenia Nawozowe. cz. III Kontrola stanu odżywienia roślin metodą DRIS. IUNG, Puławy 1988, **P(37)**: 1-35.
4. Fotyma E.: Zróżnicowanie odmianowe zawartości chlorofilu w liściach zbóż ozimych. Pam. Puł., 2002, **130**: 171-178.
5. Fotyma E., Bezdużniak D.: Wykorzystanie testu NNI i testu SPAD do oceny stanu odżywienia zbóż azotem. Nawozy i Nawożenie, 2000, **4(5)**: 78-90.
6. Fotyma M., Mercik S.: Chemia rolna. Wyd PWN. Warszawa 1995, ss. 355.
7. Grzebisz W.: Nawożenie roślin uprawnych. Cz. 2. PWRiL Poznań, 2008, ss. 131-141.
8. Lemaire G., Cruz P., Gosse G., Chartier M.: Study on the relationship between the nitrogen uptake dynamics and dry matter dynamics of alfalfa (*Medicago sativa* L.). Agronomy (In French), 1985, **5**: 685-692.
9. Mikołowicz P.: Porównanie trzech metod oznaczania indeksu NDVI w łanie roślin. Fragm. Agron., 2008, **98**: 3-107.
10. Reuter D.J., Robinson J.B.: Plant analysis an interpretation manual. CSIRO Australia, 1997, ss. 572.
11. Sims D.A., Gamon J.A.: Relationship between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. Remote Sensing of Environment, 2002, **81**: 337-354.
12. Starek Z.: Rola składników mineralnych w roślinie. W: Fizjologia roślin, J. Kopcewicz i S. Lewak (red.), 2007, ss. 228-245.
13. Walburg G., Bauer M.E., Daughtry C.S.T., Housley T.L.: Effect of nitrogen nutrition on the growth, yield and reflectance characteristic of corn canopies. Agron. J., 1982, **74**: 667-683.

14. Wood C.W., Reervers D.W., Himelrick D.G.: Relationship between chlorophyll meter readings and leaf chlorophyll concentration, N status and crop yield: a review. *Proc. Agron. Soc New Zeland*, 1993, **23**: 1-9.
 15. Yoder B.J., Pettigrew-Crosby R.E.: Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400–2500 nm) at leaf and canopy scales. *Remot. Sens. Environ.*, 1995, **53**: 199-211.
-

Adres do korespondencji:

mgr Damian Wach
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. (81) 886 34 21 w. 223
e-mail: dwach@iung.pulawy.pl

Jacek Niedźwiecki, Guillaume Debaene, Alicja Pecio

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

KLASYCZNE I ZAAWANSOWANE METODY BADANIA
PRZESTRZENNEGO ZRÓŻNICOWANIA ŻYZNOŚCI GLEB I ŁANU ROŚLIN*

Słowa kluczowe: rolnictwo precyzyjne, przestrzenna zmienność gleb, pomiary punktowe, pomiary ciągłe, czujniki glebowe i roślinne

Wstęp

W klasycznych badaniach chemicznorolniczych żywność gleby w obrębie pola określa się na podstawie jednej próby zbiorczej, w której dokonuje się wyceny zasobności w podstawowe makroelementy oraz średniej wartości odczynu. Wciąż obowiązującym w Polsce standardem jest powierzchnia 4 ha. Na podstawie analizy próbki zbiorczej udziela się porad nawozowych, tzn. wyznacza się średnią dawkę nawozów dla całego pola. Uzyskane wyniki nie informują jednak o zmienności przestrzennej analizowanych właściwości na badanym polu. Metoda próby zbiorczej jest zatem wystarczająca dla małych gospodarstw, których pola zwykle nie przekraczają standardowej powierzchni lub są mniejsze. W okresie, kiedy liczba dużych pól, tzn. przekraczających powierzchnię 4 ha, zaczęła szybko zwiększać się, metoda próby zbiorczej przestała wystarczać ze względu na zmienność glebową. W związku z tym zaistniała konieczność bardziej precyzyjnego określania żywności gleby w obrębie pola. Pojawiła się również koncepcja różnicowania dawki nawozów zależnie od miejscowo zróżnicowanej żywności. Koncepcja ta od początku przyjęła nazwę „precyzyjnego nawożenia”. W systemie tym liczne średnie próbki gleb (do kilkuset) pobiera się do analiz najczęściej w wierzchołkach sieci kwadratów. Od 1994 r. w ten sposób pobierane są próbki na polu doświadczalnym Stacji Doświadczalnej IUNG-PIB w Baborówku o pow. 52,5 ha.

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.2 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

Stacja ta została powołana w 1993 r. z zadaniem badania przestrzennego zróżnicowania żyzności gleby i w perspektywie udzielania dokładnych porad nawozowych. Od początku została wyposażona w precyzyjny kombajn zbożowy Massey Ferguson MF 32, który umożliwiał określanie i gromadzenie informacji o przestrzennej zmienności plonów uprawianych roślin. Kombajn posiadał miernik izotopowy określający masę przepływającego ziarna z częstotliwością co 1,2 sekundy. Na kombajnie umieszczony był odbiornik GPS, który umożliwiał monitorowanie pozycji kombajnu w przestrzeni. Większą dokładność pozycjonowania kombajnu w SD Baborówko uzyskiwano dzięki stacji referencyjnej, czyli dodatkowemu odbiornikowi GPS umiejscowionemu w punkcie o znanych współrzędnych geograficznych, który komunikował się z odbiornikiem kombajnu za pomocą sygnału radiowego (metoda DGPS). Stację referencyjną umieszczono na obrzeżu pola doświadczalnego. Kombajn wyposażony był również w komputer pokładowy, który integrował i zapamiętywał dane napływające z miernika plonu oraz odbiornika GPS. W efekcie powstawał zbiór danych, który zawierał: czas pomiaru, długość i szerokość geograficzną punktu, w którym w danym czasie znajdował się kombajn oraz plon ziarna wyrażony w $t \cdot ha^{-1}$. Zbiór taki, przekształcony do formatu tekstowego, mógł być następnie importowany i analizowany za pomocą dowolnych programów komputerowych. Dzięki temu w systemie GIS zgromadzona została informacja o plonach wszystkich roślin uprawianych w Stacji od roku 1994 (9). Początkowo pole doświadczalne obejmowało 8 pól płodozmiennych. Od roku 2000 wprowadzono uproszczone zmianowanie: rzepak ozimy – pszenica ozima – jęczmień jary i dokonano nowego podziału całej powierzchni pola doświadczalnego na 3 pola płodozienne.

Żyzność gleby oraz różnego rodzaju pomiary i obserwacje, przy braku innych możliwości, wciąż wykonywano metodą pobierania próbek w stałych punktach pomiarowych. Punkty te umiejscowiono w wierzchołkach regularnej siatki kwadratów pokrywającej pole doświadczalne oraz wyznaczono ich współrzędne, początkowo kartograficzne w odniesieniu do reperów znajdujących się na obrzeżu pola, a potem geograficzne, za pomocą GPS. Dzięki temu każdy wykonany pomiar czy obserwacja zawsze były zorientowane przestrzennie. Rodzaj obserwacji i pomiarów wykonywanych w siatce zależał od potrzeb realizowanych aktualnie tematów i projektów badawczych. Najbogatsze zbiory danych zgromadzono od roku 1996 dla pszenicy ozimej (3, 4, 5, 11, 12) oraz dla jęczmienia jarego w latach 1998–2003 (28, 29). Obejmują one: pomiary dynamiki LAI (indeksu powierzchni liściowej), SPAD (wskaźnika „zieloności liści”), plonu suchej masy roślin, zawartości azotu w nadziemnej masie roślin, obserwacje faz fenologicznych, plony ziarna i słomy z „metrówek” oraz zawartości makroskładników w plonie. Oprócz obserwacji łanu prowadzono także pomiary zawartości wody w profilu glebowym za pomocą sondy neutronowej (15) oraz pomiary zawartości azotu mineralnego w glebie (27).

Zgromadzone dane glebowe obejmują charakterystykę gleboznawczą pola oraz właściwości chemiczne gleb. Aktualnie wykorzystywana informacja jest dostępna

w formie numerycznej, która powstała w wyniku digitalizacji analogowej mapy glebo-wo-rolniczej wykonanej w skali 1:1000 klasyczną metodą kartograficzną, z ręcznym wyznaczeniem obszarów o podobnym składzie granulometrycznym i zaszeregowaniem do poszczególnych kompleksów przydatności rolniczej. Proces tworzenia tej mapy opierał się na szczegółowym rozpoznaniu pola w latach 1993–1995. W pierwszej kolejności na podstawie analizy ukształtowania terenu i zmienności gleb dokonano wstępnych wydzielení przestrzennych, w których zlokalizowano odkrywki zasadnicze (łącznie 23 odkrywki). Na podstawie morfologii i składu granulometrycznego oznaczonego metodą palcową określono typy, gatunki i kompleksy przydatności rolniczej gleb. Jednocześnie z poszczególnych warstw profili pobierano próbki do analiz laboratoryjnych celem uściślenia wyników badań terenowych. Dla wyznaczenia zasięgów poszczególnych jednostek glebowych wykonano 968 odkrywek pomocniczych do głębokości 50–60 cm, pogłębianych świdrem do 150 cm. Odkrywki pomocnicze zlokalizowano w oczkach siatki kwadratów o boku 25 m, pokrywającej całe pole doświadczalne. W próbkach pobranych z poziomu próchnicznego gleby określono jej żyzność na podstawie oznaczeń metodami klasycznymi: pH w KCl, zawartość przyswajalnego fosforu i potasu metodą Egnera-Riehma, zawartość magnezu metodą Schachtschabela oraz próchnicy metodą Tiurina.

Zebrana pierwotnie informacja o stanie pola jest systematycznie uzupełniana o nowe wyniki analiz i pomiarów. W miarę pojawiania się, na pole wprowadzane są również coraz to nowe rozwiązania techniczne. W latach 1996–1999 badania wykonywano corocznie w polu płodozmiennym pszenicy ozimej. Obecnie badania gleby prowadzone są w cyklach 3-letnich (lata: 1999, 2002, 2005, 2008, 2011, 2014) w oczkach siatki kwadratowej o boku 36 m pokrywającej cały obszar pola doświadczalnego. Są to łącznie 403 punkty pomiarowe o ustalonych współrzędnych geograficznych. Współrzędne takie umożliwiają tworzenie map plonów uprawianych roślin, zasobności gleby i jej właściwości fizykochemicznych (13). W 2008 r. w pobranych próbkach glebowych po raz pierwszy wykonano pełne oznaczenia składu granulometrycznego gleby nową w Polsce metodą laserową wprowadzoną w latach 2005/2006 przez okręgowe stacje chemiczno-rolnicze. Analizy gleb wykonała dla tego pola OSChR w Lublinie. W oroku 2014 analiza zasobności gleb w P, K i Mg została wykonana w GLACH IUNG-PIB z zastosowaniem uniwersalnej ekstrakcji nową metodą Mehlich 3 (14), którą planuje się wprowadzić do szerokiej praktyki badań agrochemicznych w Polsce.

Ze względu na to, że stosowane dotychczas klasyczne metody pobierania próbek glebowych oraz precyzyjnego określania stanu odżywienia roślin metodą punktowego pobierania i analizy próbek są niesłychanie pracochłonne i kosztowne, wciąż poszukuje się metod pomiarów ciągłych. Notowany w ostatnich latach postęp techniczny w aparaturze pomiarowej umożliwia coraz częstsze wykorzystywanie technik pośredniej oceny właściwości gleby i stanu roślin. Służą do tego różnego rodzaju mobilne czujniki (on-the-go) rejestrujące z dużą rozdzielczością właściwości gleby i roślin

w czasie rzeczywistym, bezpośrednio na polu. Wyniki analiz metodami klasycznymi wykorzystuje się do kalibracji pomiarów ciągłych.

Konstrukcja tych czujników oparta jest na metodach elektromagnetycznych i spektrometrycznych. Do najczęściej stosowanych czujników elektromagnetycznych należy konduktometr przewodności elektrycznej EM 38MK2 Geonics Ltd (Canada). Zmierzona wartość przewodności elektrycznej gleby koreluje z podstawowymi jej cechami, jak: skład granulometryczny, zasolenie, zawartość wody i zawartość substancji organicznej. Jest ona zatem z dużym powodzeniem wykorzystywana do charakteryzowania przestrzennej zmienności wymienionych cech gleby (23, 24, 31). Podstawy teoretyczne do wykorzystania tej metody w celu oceny właściwości gleb zostały stworzone przez Rhoedsa i in. (31). Wielu badaczy, posługując się metodą elektrometryczną, wykazało jej przydatność do określania w skali pola zawartości wody (20, 32), zawartości ilu (35), a także pojemności sorpcyjnej i zawartości wymiennych form Ca i Mg (22). Metoda znalazła również szerokie zastosowanie przy wyznaczaniu stref o zróżnicowanym składzie granulometrycznym (10, 21, 30) oraz typów gleb (2, 17). Johnson i in. (18) dokonali oceny metody przewodności elektrycznej do wyznaczenia wielu fizycznych, chemicznych i biologicznych właściwości, które wpływały na plonowanie roślin i potencjał ekologiczny obszarów rolniczych.

Coraz częściej stosowanymi urządzeniami do określania zmienności glebowej na potrzeby tworzenia map zasobności są mobilne spektrofotometry pracujące w zakresie światła widzialnego i bliskiej podczerwieni (VIS/NIR). Za pomocą spektrofotometru VIS/NIR można określić zawartość azotu, potasu, fosforu, magnezu, wapnia, próchnicy, skład granulometryczny, pH i wiele innych cech gleby (1, 6, 8, 33). Metody „on-the-go” stosowane są obecnie szeroko w rolnictwie precyzyjnym wielu krajów, m.in. USA, Australii i Europy Zachodniej. Są również coraz częściej stosowane w Polsce zarówno w badaniach, jak i praktyce rolniczej (6, 26, 30).

Celem badań własnych było porównanie metod klasycznych i metod „on-the-go” do określania przestrzennej zmienności właściwości fizykochemicznych gleb oraz łanu roślin i plonu w skali ustalonego pola doświadczalnego.

Metodyka badań

Badania prowadzono na terenie specjalistycznej Stacji Doświadczalnej IUNG-PIB w Baborówku koło Poznania (16°38'50 E, 52°34'50 N) w latach 2009–2012. Ukształtowanie terenu stacji doświadczalnej charakteryzuje się płaską powierzchnią, na której lokalne deniwelacje nie przekraczają 2–3 metrów w skali pola. Pole podzielono na 3 pola płodozmienne z przeznaczeniem pod uprawę rzepaku ozimego, pszenicy ozimej

i jęczmienia jarego. Powierzchnia całego pola wynosiła ok. 52 ha. Wszystkie zabiegi agrotechniczne, łącznie z nawożeniem, stosowane były jednolicie na powierzchni całego pola. Bliższą charakterystykę pola przedstawiono we wcześniejszych publikacjach (9, 13, 16).

Wyniki badań

Ocena przestrzennej zmienności właściwości gleby metodami klasycznymi

Na pierwszym etapie badań dokonano przestrzennej analizy właściwości fizykochemicznych gleby pola doświadczalnego na podstawie analiz laboratoryjnych 399 próbek glebowych pobranych w wierzchołkach regularnej siatki kwadratów o boku 36 m (fot. 1). Próbki gleby pobrano z warstwy ornej 0–30 cm. Wszystkie analizy wykonano w Głównym Laboratorium Analiz Chemicznych IUNG-PIB w Puławach klasycznymi metodami przyjętymi w Polsce. Wyniki analiz przedstawiono w tabeli 1.



Fot. 1. Punkty poboru próbek glebowych do analiz fizykochemicznych (n = 399)

Źródło: opracowanie własne

Tabela 1

Podstawowe statystyki właściwości fizykochemicznych gleb (n = 399)

Podstawowe statystyki	pH	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	SOC	Piasek 2–0,05mm	Pył 0,05–0,002mm	Il <0,002mm
		mg 100 g ⁻¹ gleby			%	%		
Średnia	6,2	16,0	13,9	7,3	1,19	78	20	2
Mediana	6,3	14,3	13,2	7,2	1,15	77	20	2
Odch. st.	0,48	8,0	4,56	2,26	0,24	5,6	4,9	0,6
Minimum	4,62	4,4	5,10	2,60	0,68	64	6	0
Maximum	7,65	58,	44,50	15,90	2,68	94	32	4

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie uzyskanych wyników sporządzono cyfrowe mapy badanych właściwości fizykochemicznych gleb (rys. 6–12). Obszar objęty analizami posłużył na późniejszych etapach badań do oceny możliwości wykorzystania czujników glebowych w analizie przestrzennej właściwości fizykochemicznych gleb.

Ocena przestrzennej zmienności glebowej metodami „on-the-go”

Do oceny przestrzennej zmienności gleb w obrębie pola produkcyjnego wykorzystano dwa urządzenia: konduktometr EM 38MK2 oraz mobilny spektrofotometr VIS-NIR (Veris Technologies, USA). Urządzenia te posłużyły podczas realizacji badań przede wszystkim do rozpoznania zasięgów zróżnicowanych konturów glebowych oraz szacowania niektórych właściwości fizykochemicznych gleb.

Konduktometr elektromagnetyczny EM 38MK2 (Geonics Ltd. Canada)

Konduktometr elektromagnetyczny (fot. 2 i 3) umożliwia pomiar elektromagnetycznych właściwości gleby w dwóch orientacjach: poziomej EC_H (pomiar do głębokości 75 cm) i pionowej EC_V (pomiar do głębokości 150 cm). Zasada jego działania polega na indukcji pola magnetycznego w profilu glebowym. Konduktometr składa się z dwóch cewek: nadawczej i odbiorczej. W cewce nadawczej jest wytwarzany prąd o niskiej częstotliwości, który generuje zmienne pole magnetyczne. Tak wytworzone pierwotne pole magnetyczne wnika do ośrodka glebowego, powodując w nim wtórną indukcję magnetyczną wytworzoną przez prądy wirowe. Wtórne pole magnetyczne wygenerowane w ośrodku zostaje zmierzone w cewce odbiorczej również na zasadzie indukcji magnetycznej, powodując przepływ prądu. Sygnał przesyłany z miernika informuje komputer zbierający dane o ustawieniu cewek (pionowe bądź poziome). Siła wytwarzanego wtórnego pola magnetycznego jest proporcjonalna do przewodności elektrycznej gleb.

Konduktometr elektromagnetyczny EM 38 podczas pomiaru nie wymaga bezpośredniego kontaktu z badanym ośrodkiem, dzięki czemu nie dochodzi do zmian w strukturze badanej gleby.



Fot. 2. Konduktometr EM 38 MK2 Geonics Ltd. (Canada)
(fot. J. Niedźwiecki)



Fot. 3. Pomiar przewodności elektrycznej konduktometrem EM 38 MK2
(fot. J. Niedźwiecki)

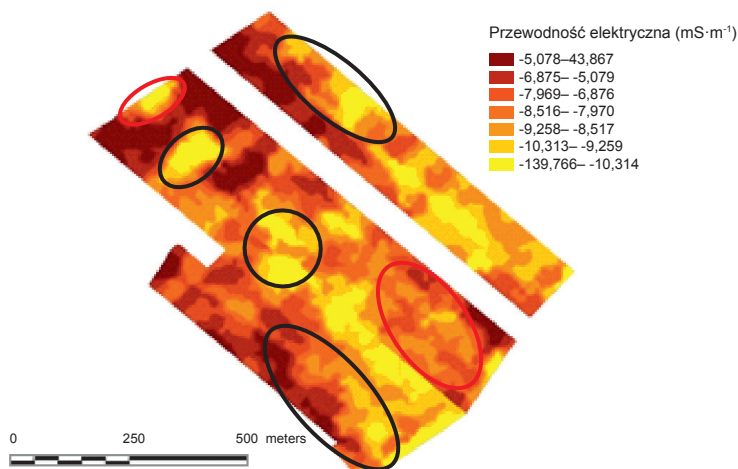
O dużej rozdzielczości pomiaru zmienności przestrzennej decyduje interwał pomiaru.

W pomiarach zastosowano metodę z interwałem 1 Hz, co pozwoliło na uzyskanie około 200 punktów na ha. Taki duży zestaw danych jest wystarczający do odwzorowania rzeczywistej zmienności właściwości gleb.

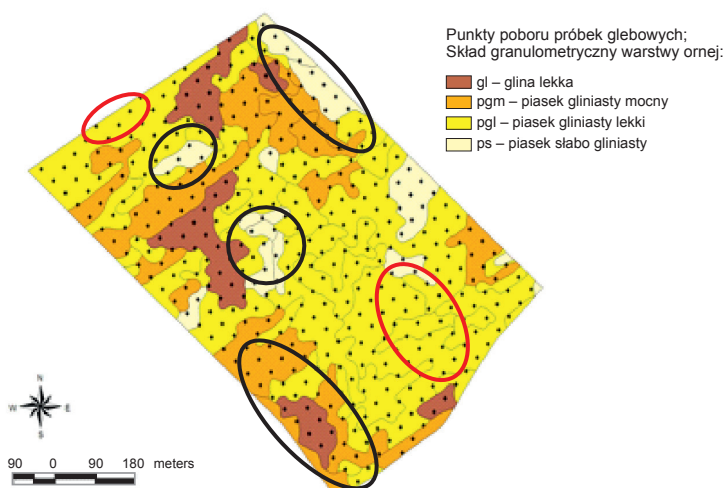
Wyniki badań przewodności elektrycznej EC gleby

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że zróżnicowanie przestrzenne przewodności elektrycznej gleby, mierzone czujnikiem EM 38, dobrze odwzorowuje przestrzenną zmienność jej uziarnienia (rys. 1). Poligony charakteryzujące się wyższymi wartościami EC odpowiadają cięższym utworom glebowym, natomiast niższe wartości EC notowano na obszarach występowania gleb lekkich i bardzo lekkich z większą rozdzielczością niż mapa glebowa wykonana metodą tradycyjną (rys. 2). Wartość przewodności elektrycznej nie określa bezpośrednio zasobności gleby w dany składnik, a jedynie wskazuje na anomalie związane ze zmianą uziarnienia, a więc cechy skorelowanej ze składem granulometrycznym. Z tego względu mapy

EC mogą być pomocne przy wyborze miejsc do poboru próbek glebowych przy podejmowaniu decyzji związanych z agrotechniką i wyznaczaniu stref dla precyzyjnego dawkowania nawozów.



Rys. 1. Mapa zmienności EC: kontury pokrywające się z mapą glebową (zaznaczone na czarno) i poligony, których nie uwzględnia mapa glebową (zaznaczone na czerwono)
Źródło: opracowanie własne



Rys. 2. Mapa zmienności składu granulometrycznego gleb; poligony jak na rys. 1.
Źródło: opracowanie własne

Wyniki badań cech spektralnych gleby

System pomiarowy Veris składa się ze spektrofotometru oraz platformy jezdnej mocowanej do ciągnika (fot. 4). Spektrofotometr VIS-NIR może być w zależności od potrzeb montowany na platformie, bądź po zdemontowaniu wykorzystywany jako urządzenie laboratoryjne. Głównym elementem umożliwiającym pomiary spektralne jest specjalnie skonstruowany lemiesz, w którym znajduje się lampa halogenowa jako źródło światła (fot. 5). Podczas jazdy lemiesz zagłębia się na gł. ok. 5–7 cm. Dzięki temu pomiar wykonywany jest w warstwie powierzchniowej gleby. Lampa oświetla powierzchnię gleby, a światło, które odbija się od gleby poprzez przewody światłowodowe pada na detektory umieszczone w spektrofotometrze. Spektrofotometr mierzy ilość światła odbitego oraz absorbowanego przez glebę. Zakres pomiarowy spektrofotometru Veris wynosi od 350 do 2200 nm. W każdej sekundzie system Veris rejestruje 20 widm glebowych (rys. 3).

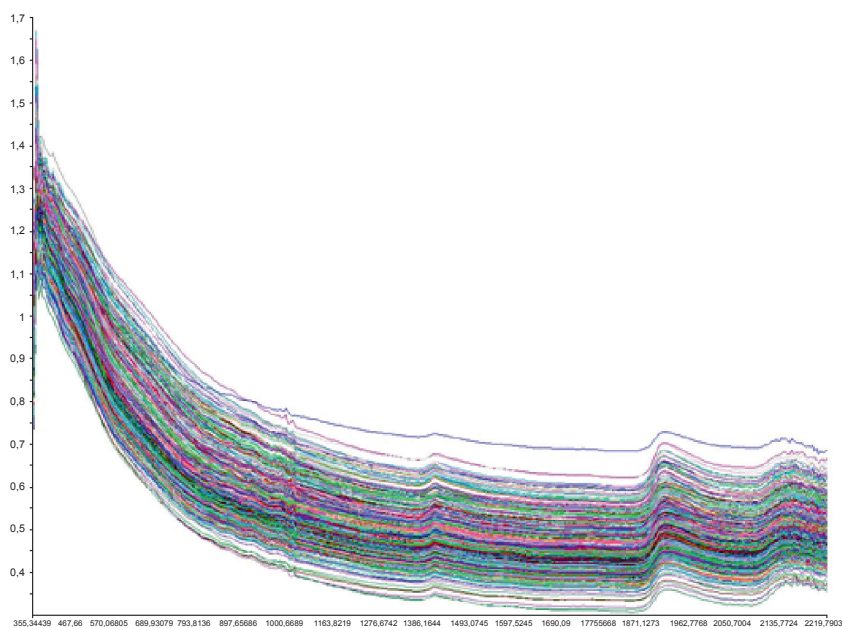
Zastosowanie w badaniach spektrofotometru bliskiej podczerwieni NIR oraz światła widzialnego VIS umożliwiło pomiary spektralne gleb w celu określenia m.in. zawartości węgla organicznego, odczynu gleb oraz zawartości niektórych makroelementów (7). Urządzenie współpracuje z GPS, co umożliwia sporządzanie cyfrowych map badanych właściwości gleby (rys. 6–12). Zaletą systemu Veris jest możliwość określenia wielu parametrów glebowych podczas jednego przejazdu.



Fot. 4. Pomiar właściwości spektralnych gleb systemem Veris
(fot. J. Niedźwiecki)



Fot. 5. Lemiesz z umieszczoną wewnątrz lampą halogenową podczas pomiarów spektralnych
(fot. J. Niedźwiecki)



Rys. 3. Widma spektralne badanych gleb (R – światło odbite)

Źródło: Niedźwiecki i Debaene, 2013 (25)

Chemometryczną analizę danych spektralnych oraz kalibrację i walidację opracowanych modeli predykcyjnych wykonano za pomocą oprogramowania Unscrambler X[®] version 10.1 (Camo AS, Oslo, Norway). Do określenia najlepszych związków pomiędzy fizykochemicznymi właściwościami i danymi spektralnymi zastosowano modele cząstkowe najmniejszych kwadratów (PLS) (partial least squares regression). Dokładność kalibracji oceniono na podstawie współczynników determinacji R^2 , ilości zmiennych ukrytych, RMSEP błędów predykcji i RPD (ratio of performance deviation) obliczonych na podstawie zależności między zmierzonymi i przewidywanymi właściwościami walidowanych właściwości. Błędy predykcji oceniano na podstawie kroswalidacji.

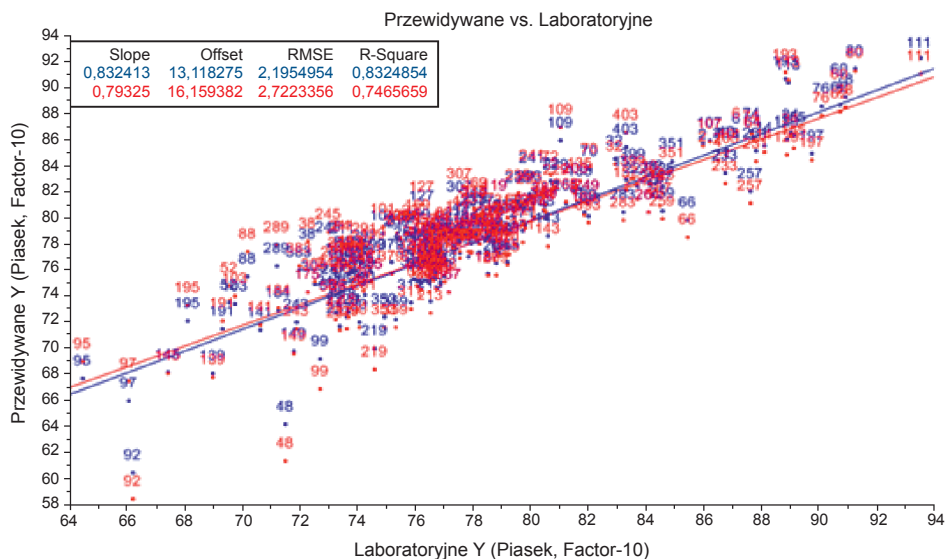
Wyniki analizy PLS wykazały, że najlepsze modele predykcyjne otrzymano dla frakcji piasku ($R^2 = 0,78$; RMSEP = 2,64; RPD = 2,1), pyłu ($R^2 = 0,78$; RMSEP = 2,35; RPD = 2,09), nieco słabsze dla węgla organicznego ($R^2 = 0,73$; RMSEP = 0,11; RPD = 2,1) i frakcji iłu ($R^2 = 0,75$; RMSEP = 0,32; RPD = 1,97). Dla pozostałych właściwości gleby uzyskano nieco mniejsze wartości predykcyjne modeli (tab. 2). Otrzymane modele posłużyły na późniejszym etapie badań do sporządzenia cyfrowych map oszacowanych właściwości fizykochemicznych gleb. Na podstawie przeprowadzonych analiz sporządzono wykresy kalibracyjne i walidacyjne oraz modele predykcyjne badanych właściwości gleby. Przykładowe wykresy przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Na podstawie modeli predykcyjnych oszacowano badane właściwości i sporządzono ich cyfrowe mapy.

Tabela 2

Wyniki analiz modeli cząstkowych najmniejszych kwadratów (PLS) badanych właściwości gleb

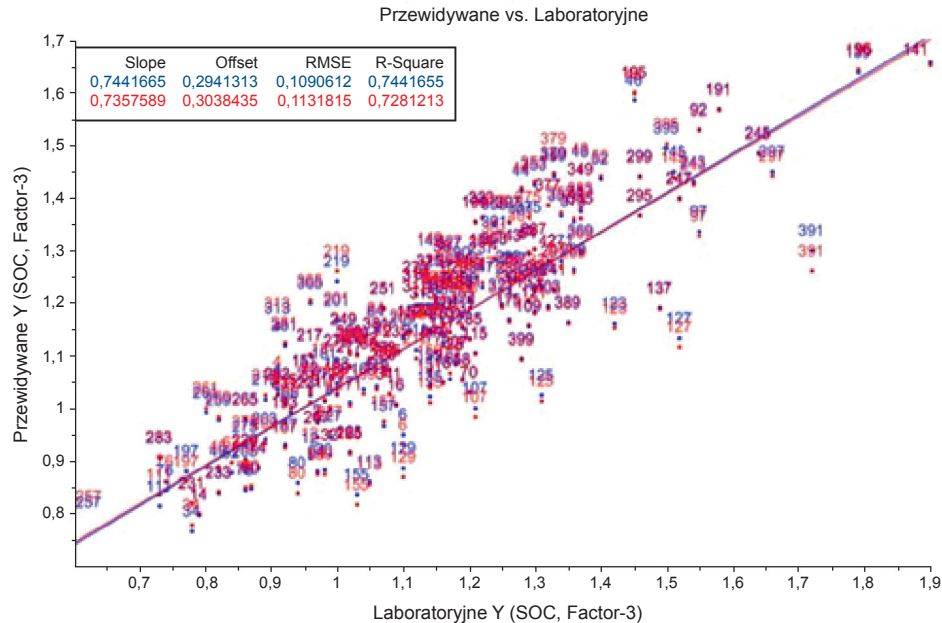
Właściwość gleby	Kalibracja		Kroswalidacja		Walidacja		
	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSEP	RPD
SOC (%)	0,73	0,11	0,66	0,13	0,73	0,11	2,10
Piasek (%)	0,84	2,19	0,75	2,72	0,78	2,64	2,10
Pył (%)	0,83	1,95	0,74	2,44	0,78	2,35	2,09
Il (%)	0,78	0,28	0,68	0,34	0,75	0,32	1,97
pH	0,57	0,32	0,48	0,36	0,52	0,34	1,28
Mg (mg·100 g ⁻¹)	0,56	1,48	0,51	1,55	0,50	1,62	1,24
P ₂ O ₅ (mg·100 g ⁻¹)	0,53	5,56	0,36	6,46	0,43	6,07	1,11
K ₂ O (mg·100 g ⁻¹)	0,55	2,90	0,44	3,27	0,51	3,50	1,31

Źródło: Debaene i in., 2014 (6), zmodyfikowane



Rys. 4. Przykładowe wykresy – kalibracyjny (niebieski) i walidacyjny (czerwony), dla frakcji piasku (%)

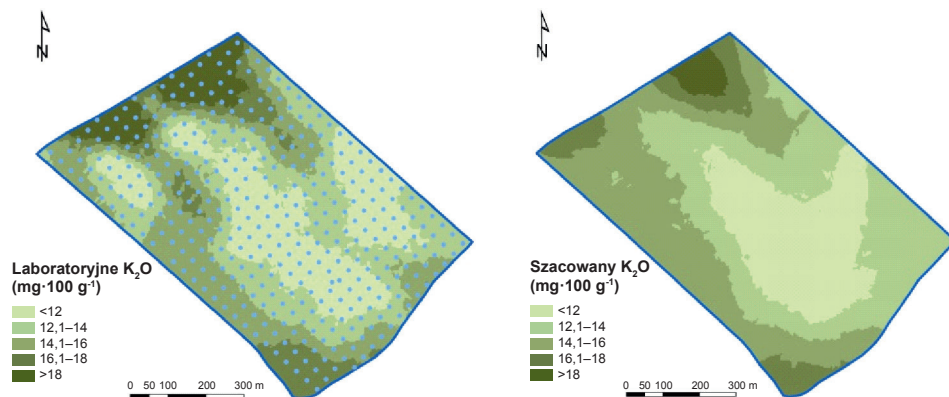
Źródło: Debaene i in., 2014 (6), zmodyfikowane



Rys. 5. Przykładowe wykresy – kalibracyjny (niebieski) i walidacyjny (czerwony), dla węgla organicznego SOC (%)

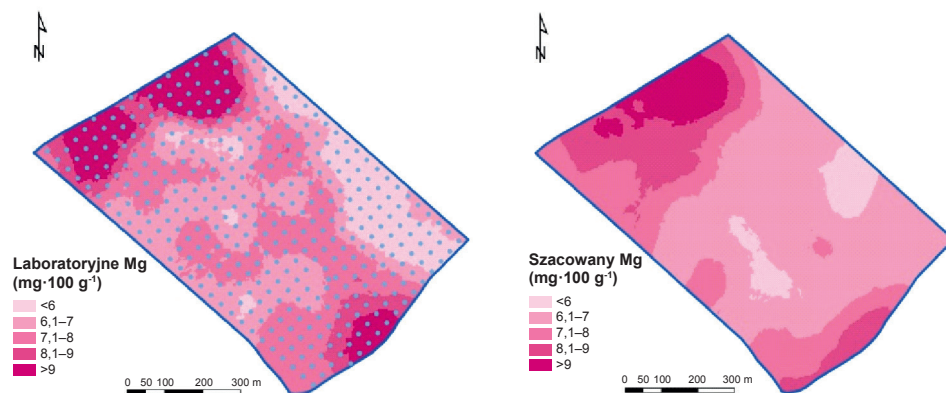
Źródło: Debaene i in., 2014 (6), zmodyfikowane

W kolejnym etapie badań porównano mapy właściwości fizykochemicznych określonych na podstawie wyników uzyskanych metodami klasycznymi ze stałych punktów siatki (po lewej) z wynikami oszacowanymi na podstawie opracowanych modeli predykcyjnych z pomiarów spektralnych gleby (po prawej). Do interpolacji map zastosowano metodę krigingu zwyczajnego (rys. 6–12).



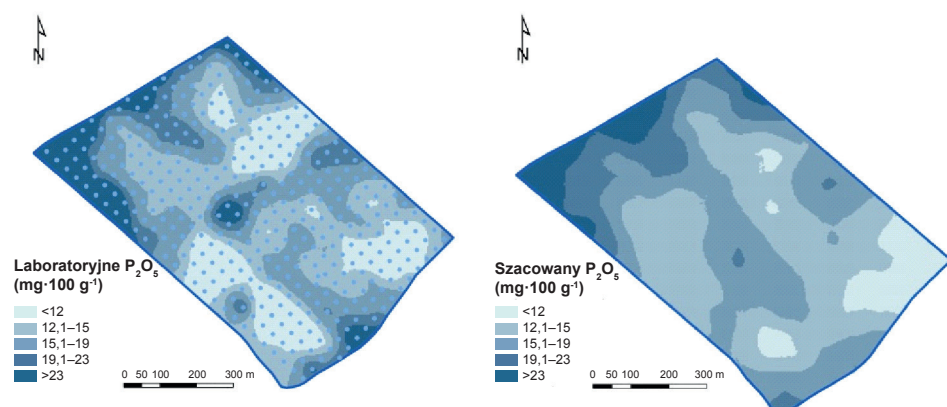
Rys. 6. Zawartość potasu przyswajalnego K_2O

Źródło: opracowanie własne

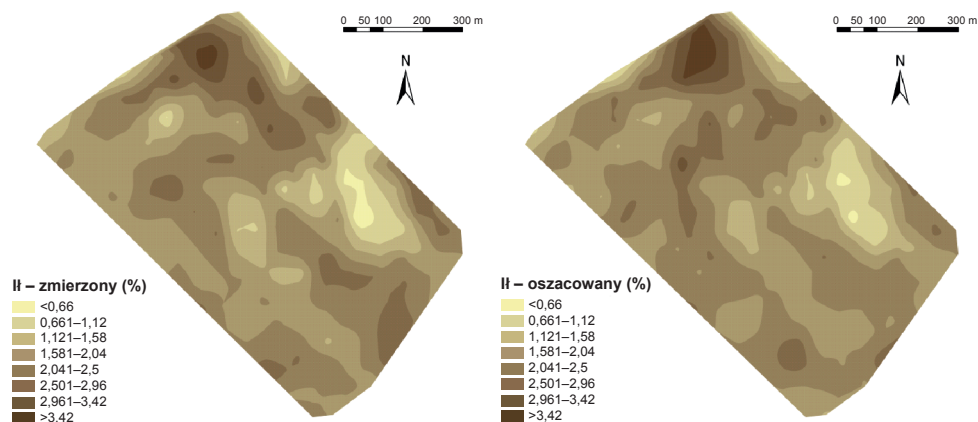


Rys. 7. Zawartość magnezu przyswajalnego Mg

Źródło: opracowanie własne

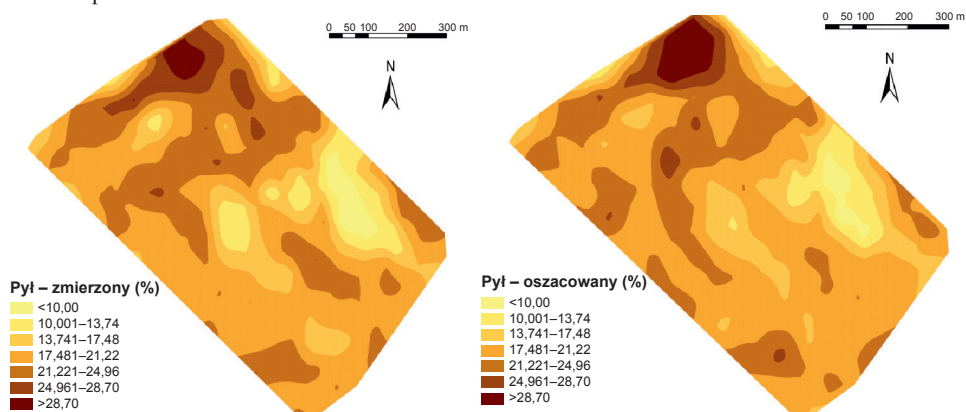
Rys. 8. Zawartość fosforu przyswajalnego P_2O_5

Źródło: opracowanie własne



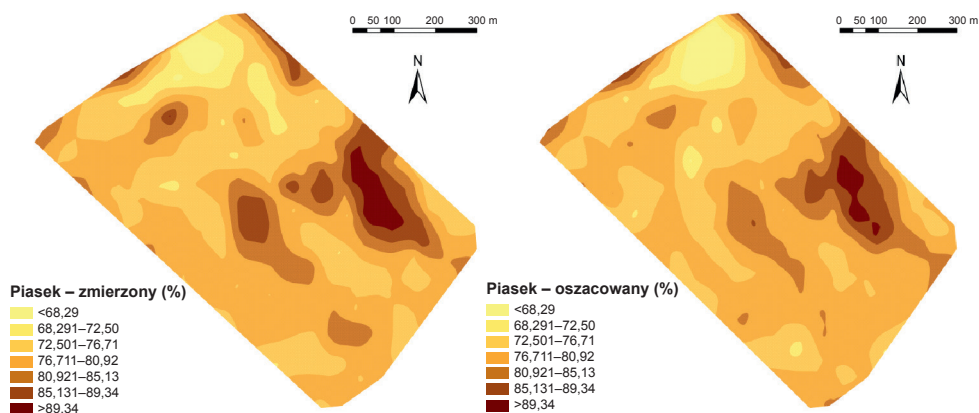
Rys. 9. Zawartość frakcji ilu

Źródło: opracowanie własne



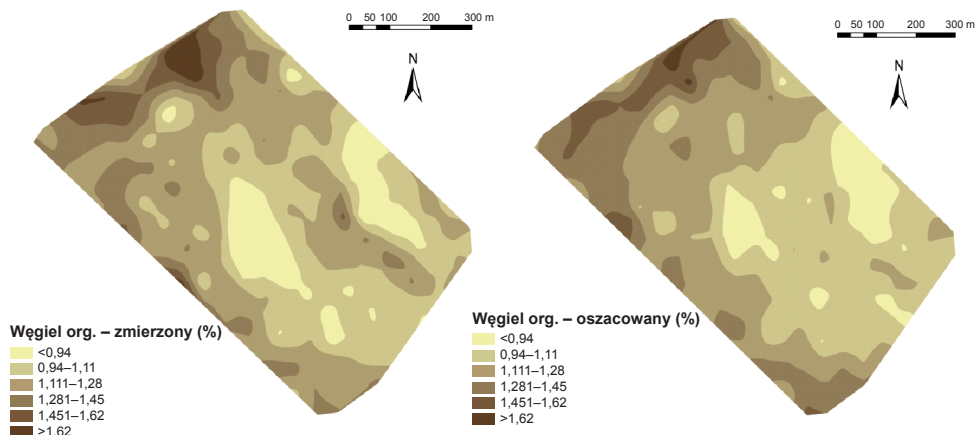
Rys. 10. Zawartość frakcji pyłu

Źródło: opracowanie własne



Rys. 11. Zawartość frakcji piasku

Źródło: opracowanie własne



Rys. 12. Zawartość węgla organicznego

Źródło: opracowanie własne

Metodyka oceny przestrzennej zmienności ładu roślin uprawnych oraz plonu

Znormalizowany wskaźnik zieleni (Indeks NDVI)

W rolnictwie precyzyjnym do charakteryzowania właściwości ładu roślin wykorzystuje się zależności między ilością światła pochłanianego przez rośliny przy różnych długościach fal. Uzyskany wynik wyrażany jest za pomocą wskaźników roślinnych. Jednym z najczęściej używanych jest znormalizowany wskaźnik wegetacji NDVI (Normalized Difference Vegetation Index):

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

gdzie:

NIR – ilość światła odbitego w zakresie bliskiej podczerwieni;

RED – ilość światła odbitego w zakresie światła czerwonego.

Wskaźnik NDVI ma pośredni związek z właściwościami gleby, ponieważ stan łanu roślin jest odzwierciedlaniem stanu jakości gleb. W celu skorelowania stanu wegetacji roślin z przestrzenną zmiennością glebową wykonano pomiary indeksu NDVI. Indeks NDVI został określony za pomocą mobilnego sensora optycznego GreenSeeker RT 200 (NTech, USA) zainstalowanego na ciągniku rolniczym (fot. 6). Wskaźnik NDVI jest dobrym parametrem opisującym stan roślinności (34), skorelowanym z jej biomasa (19). Przyjmuje się, że łan roślin jest w dobrej kondycji i nie podlega stresom, jeżeli wskaźnik NDVI wynosi ponad 0,6. Średnio wartości NDVI dla roślinności wahają się od 0,4 do 0,8.



Fot. 6. Czujnik optyczny GreenSeeker RT 200 (NTech, USA) podczas pomiarów
(fot. J. Niedźwiecki)

Pomiary indeksu NDVI wykonano w 4 fazach fenologicznych pszenicy ozimej:

- 1) widoczne pierwsze kolanko (F 31);
- 2) widoczne trzecie kolanko (F 33);
- 3) koniec kłoszenia – kłosy całkowicie widoczne (F 58-59);
- 4) pełnia kwitnienia (F 64-65).

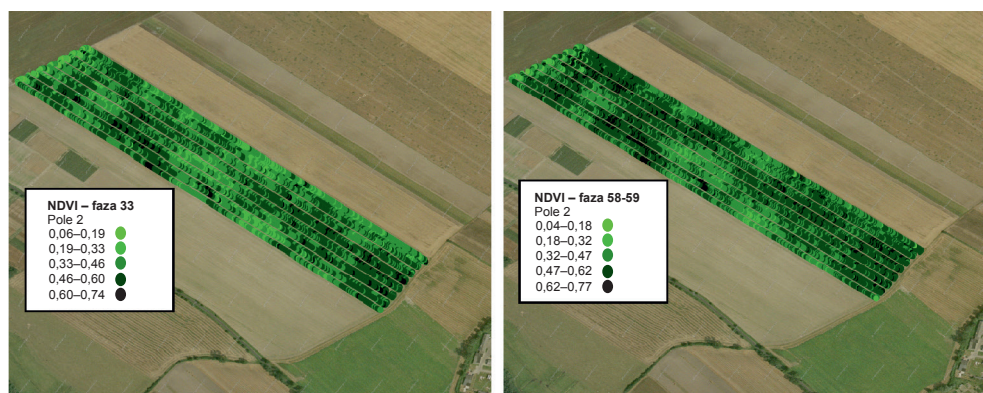
Uzyskane wyniki pomiarów NDVI posłużyły do wygenerowania map przestrzennej zmienności tego wskaźnika dla pól produkcyjnych SD Baborówko w kluczowych dla rozwoju pszenicy fazach fenologicznych (rys. 13–16).



Rys. 13. Mapy indeksu NDVI dla pól produkcyjnych w fazie 31 (po lewej) i 58-59 (po prawej)
Źródło: opracowanie własne



Rys. 14. Mapa Indeksu NDVI dla pola produkcyjnego w fazie 64-65
Źródło: opracowanie własne



Rys. 15. Mapy indeksu NDVI dla pól produkcyjnych w fazie 33 (po lewej) i 58-59 (po prawej)
Źródło: opracowanie własne

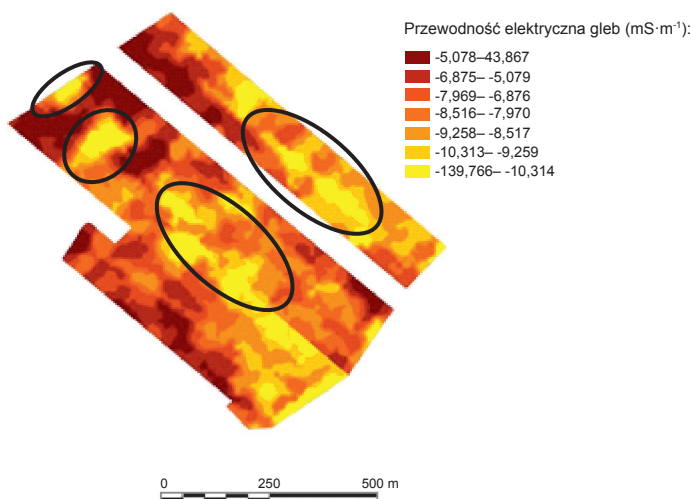


Rys. 16. Mapa Indeksu NDVI dla pola produkcyjnego w fazie 64-65

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie uzyskanych map indeksu NDVI stwierdzono, że niższe wartości indeksu pokrywały się z obszarami występowania gleb najlżejszych, najmniej zasobnych w składniki pokarmowe dostępne dla roślin. Największe przestrzenne zróżnicowanie NDVI stwierdzono podczas fazy 64-65 (pełnia kwitnienia) pszenicy.

Poniżej przedstawiono porównanie map przestrzennej zmienności glebowej określonej za pomocą konduktometru EM 38 (rys. 17) na tle przestrzennego zróżnicowania indeksu NDVI (rys. 18) i produktywności pola produkcyjnego (rys. 19). Obramowaniem zaznaczono obszary charakteryzujące się najniższymi wartościami EC, NDVI i produktywności pola.



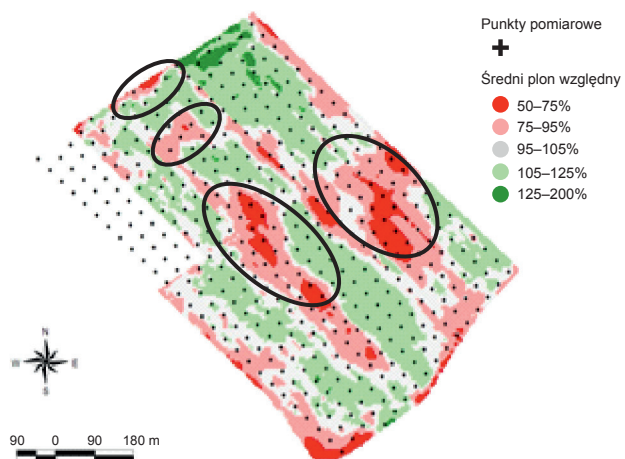
Rys 17. Mapa przestrzennej zmienności EC

Źródło: opracowanie własne



Rys. 18. Mapa przestrzennego zróżnicowania indeksu NDVI

Źródło: opracowanie własne



Rys. 19. Mapa produktywności pola

Źródło: Fotyma i Pecio, 2010 (13)

Podsumowanie

1. Przeprowadzone badania wykazały przydatność czujników „on-the-go” do określania przestrzennej zmienności różnych właściwości glebowych w skali pola.
2. Zarówno czujniki elektromagnetyczne, jak i optyczne dobrze odwzorowują rzeczywistą zmienność cech glebowych na polu produkcyjnym.
3. Pomiary spektralne gleby w zakresie bliskiej podczerwieni w połączeniu analizami chemometrycznymi dają bardzo duże możliwości szacowania wielu istotnych z punktu widzenia agrotechniki cech glebowych.
4. Porównanie różnych rodzajów danych przestrzennych może być pomocne w opracowaniu map potencjału plonotwórczego pola oraz wyznaczaniu stref technologicznych dla zmiennego dawkowania nawozów mineralnych.

Literatura

1. Adamchuk V.I., Hummel J.W., Morgan M.T., Upadhyaya S.K.: On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2004, **44**: 71-91.
2. Anderson-Cook C.M., Alley M.M., Roygard J. K.F., Khosla R., Noble R.B., Doolittle J.A.: Differentiating soil types using electromagnetic conductivity and crop yield maps. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2002, **66**: 1562-1570.
3. Błaszczuk L.: Geostatystyczna analiza zmienności przestrzennej plonu ziarna pszenicy ozimej w warunkach pola produkcyjnego. *Fragm. Agron.*, 2001, **2**: 28-36.
4. Błaszczuk L.: Wykorzystanie wskaźnika LAI w interpolacji plonu ziarna pszenicy ozimej metodą co-krigingu. *Fragm. Agron.*, 2002, **3**: 4-12.
5. Błaszczuk L., Fotyma M.: Zastosowanie metody obserwacji naukowych do badania przyczyn zmienności plonów pszenicy w obrębie pola płodozmiennego. *Fragm. Agron.*, 2005, **1**: 678-688.
6. Debaene G., Niedźwiecki J., Pecio A., Żurek A.: Effect of the number of calibration samples on the prediction of several soil properties at the farm-scale. *Geoderma*, 2014, **2014-2015**: 114-125.
7. Debaene G., Niedźwiecki J., Pecio A.: On-the-go mapping of soil organic carbon content in Western Poland. *Proceedings of the 3rd Global Workshop on Proximal Soil Sensing*, 26-29 May 2013, Potsdam, Germany, 2013, pp. 248-251.
8. Debaene G., Niedźwiecki J., Pecio A.: Visible and near-infrared spectrophotometer for soil analysis: preliminary results. *Pol. J. Agr.*, 2010, **3**: 3-9.
9. Dobers E.S., Pecio A., Kubsik K., Naglik E., Fotyma M.: Baborówko Research Station. Farm records for the period 1992-2009. IUNG, Puławy 2011, pp. 137.
10. Doolittle J.A., Indorante S.J., Potter D.K., Hefner S.G., McCauley W.M.: Comparing three geophysical tools for locating sand blows in alluvial soils of southeast Missouri. *J. Soil Water Conserv.*, 2002, **57**: 175-182.
11. Faber A.: Zastosowanie sieci neuronowej i wskaźników stanu wegetacji w analizach produktywności łąnów pszenicy ozimej. *Fragm. Agron.*, 2000, **2**: 7-19.
12. Faber A., Jadczyński T.: Ocena zmienności przestrzennej plonów pszenicy ozimej w zależności od sposobu zbioru. *Fragm. Agron.*, 2001, **1**: 21-30.

13. Fotyma M., Pecio A.: Przestrzenna zmienność żyzności i produktywności gleby w obrębie pola produkcyjnego. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2010, **41**: 26-42.
14. Fotyma M., Kęsik K., Lipiński W., Filipiak K., Purchała L.: Testy glebowe jako podstawa doradztwa nawozowego. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2015, **42(16)**: 9-52.
15. Igras J., Kubsik K.: Dynamika zapasów wody w glebach różnych kompleksów w zależności od indeksu powierzchni liści i akumulacji suchej masy pszenicy ozimej. *Fragm. Agron.*, 1999, **1**: 39-48.
16. Jadczyzyn T.: Ustalanie dawek nawozów P, K, Mg w rolnictwie precyzyjnym. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2010, **41**: 43-50.
17. Jaynes D.B., Colvin T.S., Ambuel J.: Soil type and crop yield determinations from ground conductivity surveys. ASAE Paper 933552, 1993, ASAE, St. Joseph, MI.
18. Johnson C.K., Doran J.W., Duke H.R., Weinhold B.J., Eskridge K.M., Shanahan J.F.: Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2001, **65**: 1829-1837.
19. Justice C.O., Hiernaux P.H.Y.: Monitoring the grasslands of the Sahel using NOAA AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.*, 1986, **7**: 1475-1498.
20. Kachanoski R.G., Gregorich E.G., Van Wessenbeek I.J.: Estimating spatial variations of soil water content using noncontacting electromagnetic inductive methods. *Can. J. Soil Sci.*, 1983, **68**: 715-722.
21. Kitchen N.R., Sudduth K.A., Drummond S.T.: Mapping of sand deposition from 1993 midwest floods with electromagnetic induction measurements. *J. Soil Water Conserv.*, 1996, **51**: 336-340.
22. McBride R.A., Gordon A.M., Shrive S.C.: Estimating forest soil quality from terrain measurements of apparent electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, **54**: 290-293.
23. McNeill J.D.: Rapid, accurate mapping of soil salinity by electromagnetic ground conductivity meters. In: *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory Into Practice*, G.C. Topp, W.D. Reynolds and R.E. Green (eds.). Spec. Publ., 1992, **5**: 30. SSSA, Madison, WI, ss. 209-229.
24. Mueller T.G., Hartsock N.J., Stombaugh T.S., Shearer S.A., Cornelius P.L., Barnhisel R.I.: Soil electrical conductivity map variability in limestone soils overlain by loess. *Agron. J.*, 2003, **96**: 496-507.
25. Niedźwiecki J., Debaene G.: Nowoczesne metody chemometryczne oznaczania substancji organicznej w glebach. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2013, **35(9)**: 199-212.
26. Niedźwiecki J., Debaene G., Pudełko R.: Electrical conductivity analysis of field of highly variable soils. *Proceedings of the 3rd Global workshop on proximal soil sensing (International Union of Soil Sciences)*, 26–29 May 2013, Potsdam, Germany. R. Gebbers, E. Lück and J. Rühlmann (eds). Publisher: Leibniz- Institute for agricultural engineering. ISSN 0947-7314, pp. 288-292.
27. Pecio A., Błaszczuk L.: Geostatystyczna analiza przestrzennej zmienności azotu mineralnego w glebie w warunkach pola produkcyjnego. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2002, **1**: 66-75.
28. Pecio A., Kubsik K., Bichoński A.: Analiza przestrzennej zmienności plonu i zawartości białka w ziarnie jęczmienia jarego w obrębie pola produkcyjnego. *Biul. IHAR*, 2005a, **236**: 147-155.
29. Pecio A., Kubsik K., Bichoński A.: Przyczyny zmienności plonu i jakości ziarna jęczmienia jarego w obrębie pola produkcyjnego. *Biul. IHAR*, 2005b, **236**: 157-166.
30. Pudełko R., Niedźwiecki J., Debaene G., Igras J., Kubsik K.: The remote sensing assessment of potential productivity of a field with soil spatial variability. *J. Food Agric. Environ.*, 2012, **10(2)**: 790-793

31. R h o a d e s J.D., C o r w i n D.L., L e s c h S.M.: Geospatial measurements of soil electrical conductivity to assess soil salinity and diffuse salt loading from irrigation. In: Assessment of non-point source pollution in the vadose zone, D.L. Corwin, K. Loague and T.R. Ellsworth (eds). Geophysical Monograph 108 American Geophysical Union, Washington, DC, 1999, pp. 197-215.
 32. S h e e t s K.R., H e n d r i c k x J.M.H.: Noninvasive soil water content measurement using electromagnetic induction. Water Resour. Res., 1995, **31**: 2401-2409.
 33. S t a f f o r d J.V.: Implementing precision agriculture in the 21st century. J. Agr. Eng. Res., 2000, **76(3)**: 267-275.
 34. T u c k e r C.J.: Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sens. Environ., 1979, **8**: 127-150.
 35. W i l l i a m s B.G., H o e y D.: The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability of the salt and clay contents of soils. Aust. J. Soil Res., 1987, **25**: 21-27.
-

Adres do korespondencji:

dr inż. Jacek Niedźwiecki
Zakład Gleboznawstwa i Ochrony Gruntów
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. (81) 886 34 21 w. 396
e-mail: jacekn@iung.pulawy.pl

Beata Jurga

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

INDEKS FOSFOROWY JAKO NARZĘDZIE DO SZACOWANIA RYZYKA STRAT FOSFORU DO WÓD¹

Słowa kluczowe: fosfor w glebie, nawozy fosforowe, indeks fosforowy

Wstęp

Właściwe zarządzanie składnikami mineralnymi jest kwestią kluczową dla opłacalności produkcji rolniczej i dla zrównoważonego wykorzystania i gospodarowania zasobami środowiska. Azot (N) i fosfor (P) są tymi składnikami nawozowymi, którym poświęca się najwięcej uwagi zarówno wśród badaczy, jak i praktyków, dlatego że to one stanowią podstawę opłacalnej produkcji rolnej, jak również w największym stopniu oddziałują na ekosystemy. Dyrektywa azotanowa² uchwalona na początku lat 90., jest wyrazem dążeń społeczeństw europejskich do ochrony zbiorników wodnych przed zanieczyszczeniami wód związkami azotu poprzez stosowanie najlepszych praktyk rolniczych. Jednym z działań podjętych na skutek przyjętej dyrektywy było wyznaczenie Obszarów Szczególnie Narażonych na odpływ azotu ze zlewni rolniczych (OSN-ów). Obszary takie wyznaczono na podstawie stopnia zanieczyszczenia wód oraz zakresu wpływu działalności rolniczej i analizy warunków środowiskowych zlewni. W 2012 r., po podsumowaniu wcześniej przyjętych rozwiązań oraz ocenie ich efektywności, liczba OSN-ów została poddana weryfikacji. W jej wyniku w Polsce ustanowiono 48 OSN-ów o łącznym obszarze 13935,06 km², co stanowi 4,46% powierzchni i odpowiada 7,36% użytków rolnych kraju.

Właściwemu zarządzaniu fosforem jak dotąd nie poświęcano tyle uwagi, jednakże wyczerpujące się i ograniczone zasoby tego składnika zmuszają do kompleksowego rozpoznania mechanizmów pobierania P przez rośliny, jego przemian w glebie i co

¹ Opracowanie wykonano w ramach zadania 3.1 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

² Dyrektywa Rady 91/676/EWG z dnia 12 grudnia 1991 r. dotycząca ochrony wód przed zanieczyszczeniem powodowanym przez azotany pochodzące ze źródeł rolniczych.

równie ważne – procesów determinujących straty P z produkcji rolniczej. Zidentyfikowaniu obszarów szczególnie narażonych na straty fosforu służy narzędzie, jakim jest indeks fosforowy (P-Indeks). Bazuje on na koncepcji źródła i dróg transportu fosforu. Pod pojęciem „źródło” należy rozumieć wszelkie czynniki wpływające na ilość P, która może być wyemitowana do wód, a więc: zawartość różnych form P w glebie oraz ilość P wniesionego na pole z nawozami naturalnymi i mineralnymi. Wobec powszechnej wiedzy o wpływie stosowanej techniki i terminu aplikacji na ilość rozproszonego P, czynniki te również uznaje się za parametry źródła. Pod pojęciem „transportu fosforu” kryją się czynniki, które w sposób bezpośredni i pośredni oddziałują na wielkość i sposób rozpraszania P z rolnictwa. Zaliczymy do nich m.in.: rodzaj i uziarnienie gleby, spadek terenu, ale również rodzaj upraw czy wielkość opadu. Celem pracy jest przedstawienie rozwiązań stosowanych w różnych krajach do oceny strat fosforu do wód z wykorzystaniem indeksu fosforowego.

Przemiany fosforu i drogi strat

Fosfor jako pierwiastek biogeny jest niezbędny do prawidłowego wzrostu i plonowania roślin. Funkcje fizjologiczne fosforu są dobrze rozpoznane i dokładnie opisane w literaturze. Pierwiastek ten nie tylko buduje nić DNA i stanowi niezbędny składnik szeregu związków organicznych i wielu enzymów, ale za pośrednictwem wysokoenergetycznych związków fosforanowych typu ADP lub ATP staje się głównym przenośnikiem i akumulatorem energii w procesach biochemicznych. Jako czynnik warunkujący wielkość i jakość plonów stanowi obok azotu główny składnik wnoszony do gleby z nawozami mineralnymi i naturalnymi. W Polsce ok. 41% gleb charakteryzuje się wysoką i bardzo wysoką zawartością fosforu, a 33% gleb zawartością niską i bardzo niską (18). Według danych GUS w sezonie rolniczym 2011/2012 zużyto łącznie 371 tys. ton nawozów fosforowych w przeliczeniu na czysty składnik, co odpowiada 24,6 kg P·ha⁻¹ użytków rolnych (9).

W glebach istnieje duże zróżnicowanie form fosforu. Do najczęściej występujących w roztworze glebowym należą mineralne i organiczne związki P, trudno rozpuszczalne związki z żelazem, glinem czy wapniem, słabo związane z fazą stałą gleby, związane przez minerały ilaste i związki próchnicze oraz nierozpuszczalne związki organiczne, jak próchnica glebowa czy biomasa glebowa (23, 30). W związku z dużym zróżnicowaniem występujących form P istnieje również szereg wskaźników opisujących zawartość fosforu w glebie. Do najczęściej wykorzystywanych należy ocena zawartości przyswajalnych form P według Eigera i Riehma bądź Mehlicha-3, czy ocena stopnia wysycenia gleby fosforem DPS (degree of P saturation).

Igras i Fotyma (15) wskazali trzy główne drogi strat P z gleb do wód w warunkach Polski. Są to: spływ powierzchniowy, pobranie przez rośliny i wymywanie z gleb. Jak wynika z badań w lizymetrach, straty fosforu na drodze wymywania są w warunkach Polski mało istotne (22, 33). Niektóre badania modelowe sugerują

jednak, że pionowy ruch związków fosforu i przedostawanie się ich w głąb profilu glebowego (w wyniku spływu kapilarnego i makroporami – ang. preferential flow) do wód podziemnych może być odpowiedzialne za 6–11% całkowitych strat fosforu w dorzeczu odpowiednio Wisły i Odry (15). Zlewnia Odry charakteryzuje się większym stopniem intensyfikacji rolnictwa w porównaniu ze zlewnią Wisły, co sugeruje, że wieloletnie stosowanie dużych dawek nawozów fosforowych może powodować przekroczenie pojemności buforowej gleby względem P i straty składnika również na drodze wymywania.

Powszechnie wykorzystywanym narzędziem do zarządzania fosforem w rolnictwie jest bilansowanie tego składnika w skali pola lub gospodarstwa. Niewątpliwą zaletą takiego podejścia jest możliwość zoptymalizowania dawek nawozów fosforowych i dostosowania ich do potrzeb konkretnej uprawy. Nie daje ono jednak odpowiedzi na pytanie o istnieniu sprzyjających warunków do transportu P rozpuszczonego lub osadzonego na cząstkach gleby do wód. Wykorzystywane w praktyce testy glebowe (np. Egnera-Riehma czy Mehlich-3) informują o zawartości dostępnego dla roślin P w glebie, natomiast nie informują o ilości P, którą gleba może przyjąć bez obawy o zwiększenie wymywania.

Saldo fosforu liczone dla terytorium Polski według schematu „u wrót gospodarstwa” (20) za okres 2004–2006 wykazało straty fosforu z rolnictwa łącznie w ilości 92 tys. ton (15). Nadmiar ten można podzielić na ilość rozproszonego P do środowiska oraz ilość P akumulującego się w glebie. Z tego szacuje się, że ok. 5,5 tys. ton P to straty w wyniku wymywania z gleby, 18 tys. ton to straty na skutek spływów powierzchniowych (czyli straty bezpośrednie do wód to sumarycznie 23,5 tys. ton P!), zaś pozostałe 68,8 tys. ton to ilość fosforu rocznie gromadzona w glebie (25). Dane o ilości rozproszonego P z rolnictwa przedstawione przez Igrasa i Fotymę (15) są porównywalne z danymi Sapka (25), według którego nadmiar fosforu w Polskim rolnictwie łącznie wynosi 106 tys. ton. Szacuje się, że ok. 38 tys. ton, tj. ok. 55% zakumulowanej puli fosforu w glebie występuje w formie łatwo przyswajalnej przez rośliny, zaś pozostała część, po przekroczeniu pojemności buforowej gleby, również w pewnych warunkach może zostać rozproszona do wód. Za wiarygodnością przedstawionych wartości przemawia fakt, że niemal identyczne wyniki strat fosforu uzyskano metodą bilansu „u wrót gospodarstwa” (15).

Większość głównych upraw pobiera azot (N) i fosfor w stosunku ok. $N:P = 8$ (6). Tymczasem w naturalnych nawozach ten stosunek jest znacznie węższy i wynosi średnio $N:P = 4$ (28), ale dla pomiotu kurzego stosunek ten wynosi już tylko $N:P = 2,5$. Dawki nawozów naturalnych są z reguły dostosowane do potrzeb pokarmowych roślin względem azotu. Pojawia się wówczas problem, dotyczący zwłaszcza terenów o skoncentrowanej produkcji zwierzęcej, nagromadzania w glebie nadmiaru P, co stwarza ryzyko emisji tego pierwiastka do wód glebowych. Stosowanie zaś nawozów mineralnych jest ograniczone poniesionymi nakładami materialnymi, stąd

częściej rolnicy usiłują dostosować ilość zastosowanych nawozów do rzeczywistych potrzeb roślin i ryzyko przedawkowania P ze źródeł mineralnych jest mniejsze (28).

Emisja fosforu do wód stanowi poważne zagrożenie środowiskowe w postaci eutrofizacji wód. Fosfor w wodach stymuluje wzrost alg i sinic do krytycznego punktu, kiedy z powodu braku tlenu następuje rozkład ich biomasy. Podczas rozkładu ma miejsce dalsze zużycie tlenu, co powoduje redukcję bioróżnorodności, degradację ekosystemów i szkody dla gospodarki rybackiej. Dodatkowo, podczas rozkładu materii organicznej powstają odory zmniejszające także wartość estetyczną, rekreacyjną i ekonomiczną środowiska wodnego. Niektóre szczepy sinic wydzielają szkodliwe toksyny mogące wyeliminować wykorzystywanie zbiornika do celów rekreacyjnych i zaopatrzenia w wodę pitną (30).

Pomimo tego, że zgodnie z wynikami Państwowego Systemu Monitoringu za lata 1992–2010 ilość fosforu odprowadzanego wodami do Bałtyku systematycznie się zmniejsza, to jednak wciąż straty z terytorium Polski są znaczące. W 2007 r. odpływ fosforu ze zlewni Polski do Bałtyku (pomniejszony o procesy retencji, samooczyszczania się rzek) wyniósł 9,7 tys. ton, z czego szacowany udział rolnictwa to 5,4 tys. ton (15), zaś w roku 2008 odprowadzono z terytorium Polski 8,1 tys. ton P, co stanowiło 28% całkowitej emisji fosforu dostarczonej do Bałtyku (12).

Istnieje w związku z tym potrzeba opracowania narzędzi umożliwiających zidentyfikowanie obszarów wrażliwych na straty fosforu i pozwalających zarządzać rozpoznanymi stratami. Dotychczas w Polsce do oceny ryzyka zanieczyszczenia wód wykorzystywano głównie wskaźniki agrochemiczne. Klasyfikacja zasobności gleby w ten pierwiastek jest jednak ukierunkowana na oczekiwaną reakcję plonową roślin i nie informuje o wielkości ryzyka strat P z gleby i stopniu zanieczyszczenia środowiska wodnego (29). Wiele wyników badań pokazuje, że ilość fosforu oznaczonego w próbie glebowej nie jest wiarygodną informacją o ryzyku zanieczyszczenia wód. Dotychczasowe podejście bazujące na testach glebowych nie odzwierciedla bowiem ryzyka spływu powierzchniowego do rzek, trudniej daje się też przełożyć na mierniki ilościowe. Badania prowadzone pod auspicjami National Phosphorus Research Project (USA) pokazują, że ilość P w odpływających wodach jest skorelowana z wynikiem testów glebowych Mehlich 3 ($R^2 = 0,86$) wyłącznie na polach, które w ciągu ostatnich 6 miesięcy nie otrzymywały żadnego nawożenia (26). Jeżeli natomiast nawożenie było stosowane, to niektóre badania wskazują nawet na brak związku między zawartością fosforu w glebie a faktycznym zanieczyszczeniem środowiska wodnego (26).

Koncepcja indeksu fosforowego

Indeks fosforowy został opracowany w USA jako narzędzie dla rolników, doradców rolnych oraz specjalistów zarządzających wodami. Indeks został wdrożony w 47 stanach USA i jest w powszechnym użyciu w wersjach dostosowanych do warunków klimatyczno-glebowych danego stanu. Jest on wykorzystywany do wyznaczania

obszarów szczególnie narażonych na straty fosforu oraz do zidentyfikowania praktyk sprzyjających takim stratom (29). Ocena szczegółowa obszaru pod kątem strat fosforu bazuje na wiedzy na temat przemian fosforu w glebie, mechanizmów jego przemieszczania w środowisku w określonych warunkach klimatycznych i przyrodniczo-topograficznych. W związku z tym, że ocenie podlegają obszary w zlewniach rolniczych, parametrami, które musiały znaleźć się w opracowaniu są też czynniki związane z rolnictwem, takie jak: ilość i rodzaj zastosowanych nawozów, sposób i czas ich aplikacji czy rodzaj upraw.

P-Indeks to stosunkowo proste narzędzie stworzone w latach 90. (19) do wyznaczania podatności na rozpraszanie P do wód. Bazuje on na rozpoznaniu punktów krytycznych, to znaczy obszarów o wysokiej zawartości P w glebie lub na których stosowane są duże dawki P w nawozach przy jednoczesnym występowaniu warunków sprzyjających przemieszczaniu się fosforu do wód. Indeks w pierwotnej formie zawierał 9 parametrów charakteryzujących warunki strat P. Są to: zawartość P w wierzchniej warstwie gleby, dawki stosowanych nawozów naturalnych i mineralnych, sposoby aplikacji nawozów naturalnych i mineralnych, wielkość erozji glebowej, wielkość erozji wodnej i spływu powierzchniowego oraz dystans do najbliższego zbiornika wodnego lub cieku (19). Każdy parametr mógł przyjmować wartość od 0 do 8, a następnie był korygowany o współczynniki wagowe. Stosowano tu jeden z trzech możliwych schematów: addytywny, multiplikatywny i mieszany. W schemacie addytywnym czynniki źródła i transportu (skorygowane o współczynniki wagowe) są sumowane, dając wartość finalną Indeksu P (wciąż używane w wielu stanach USA) (29). W schemacie multiplikatywnym czynniki źródła mnożone się przez wartości czynników transportu i w ten sposób otrzymuje się wartość Indeksu P (Pensylwania Indeks). Trzecim stosowanym rozwiązaniem jest podejście łączone. Schemat addytywny powoduje, że obszary z małą zawartością P w glebie, ale wyjątkowo korzystnymi warunkami transportu mogą mieć wysoką wartość indeksu P. Takie podejście jest odejściem od koncepcji krytycznych obszarów ryzyka (6). Na przestrzeni lat oryginalny sposób wyznaczania P-Indeksu był wielokrotnie zmieniany i modyfikowany zarówno w USA, jak i w krajach europejskich (tab. 1).

Tabela 1

Zestawienie stosowanych w Europie narzędzi do szacowania strat fosforu opartych na indeksie fosforowym

Kraj	Uwagi	Źródło
Dania	modyfikacja Pensylwania P-Indeks	Andersen i Kronvang, 2006 (1)
Finlandia	narzędzie oryginalne	Tuhkanen i in., 2001 (24)
Norwegia	modyfikacja Pensylwania P-Indeks	Bechmann i in., 2005a (3)
Szwecja	warunkowy P-Indeks	Djordjic i Bergström, 2005 (7)
Wielka Brytania	narzędzie wskaźników fosforu PIT (od: Phosphorus Indicators Tool)	Heathwaite i in., 2003 (10)
Irlandia		Hughes i in., 2003 (14)

Źródło: Buczko i Kuchenbuch, 2007 (6), zmodyfikowane

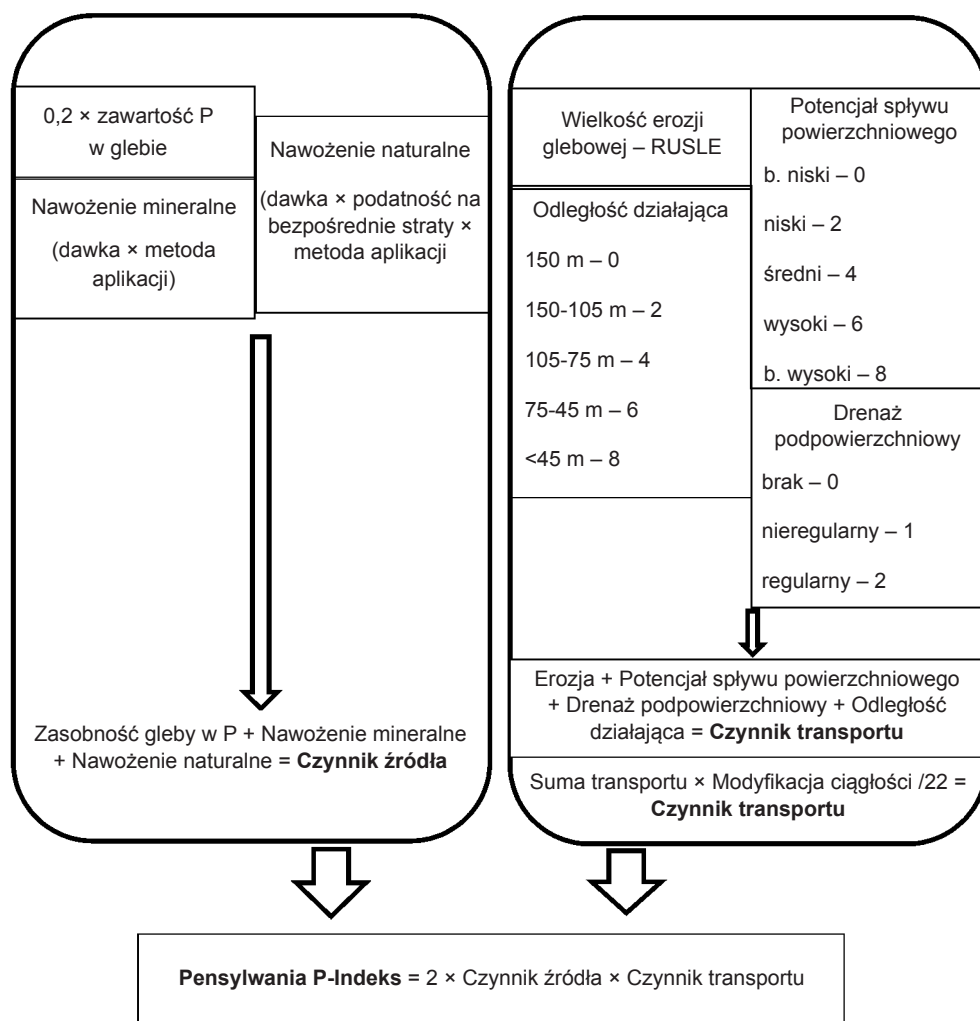
Nadal jedną z najpopularniejszych modyfikacji indeksu fosforowego jest jego wersja dla stanu Pensylwania w USA (Penn. P-Index).

Pensylwania P-Index

Podstawową zmianą dokonaną przez twórców tej wersji jest sposób uzyskiwania finalnej wartości indeksu: wielkość parametrów czynnika źródła jest mnożona przez wielkość parametrów transportu (5), zgodnie z poniższym równaniem:

$$\text{Pensylwania P-ndeks} = 2 \times \text{Czynnik źródła} \times \text{Czynnik transportu}$$

W tej wersji P-Indeksu istnieją dwa etapy oceny: wstępna i szczegółowa. Wstępna ocena obszaru pod kątem ryzyka strat fosforu ma za zadanie zidentyfikowanie terenów szczególnie narażonych na straty fosforu (wyznaczenie obszarów ryzyka) i wskazanie obszarów, gdzie odpowiednio podjęte działania zaradcze będą najbardziej efektywne w redukcji strat fosforu. Wstępna ocena umożliwia również ograniczenie kosztów dalszych analiz. W części wstępnej ocenia się, czy zawartość P w glebie (wg metody Mehlich 3) jest większa niż 200 mg P·kg⁻¹ gleby oraz czy odległość od krawędzi pola do najbliższego cieku wodnego bądź jeziora pozostaje w granicach 150 stóp (ok. 46 m). Jeśli obszar spełnia choć jeden z warunków, wówczas wykonywana jest ocena szczegółowa (Schemat 1), a obszar uznaje się za podatny na straty fosforu. Analiza zawartości P w glebie w Pensylwania P-Indeks jest wykonywana metodą Mehlich-3 (M3). Jest to metoda opracowana w Północnej Karolinie do rutynowych oznaczeń P, K, Ca, Mg, Na i mikroskładników. Niewątpliwą zaletą tej metody jest to, że daje ona możliwość jednoczesnych oznaczeń P i innych składników w glebach kwaśnych, obojętnych i zasadowych. Wyniki analiz glebowych w Pensylwania P-Indeks mają wagę 0,20. Wartość ta została zaproponowana przez autorów (29) jako współczynnik służący do konwersji wyników badań gleby do wartości, która bezpośrednio odnosi się do dawki P w nawozach naturalnych i mineralnych. Parametr ten wyznaczono na podstawie wyników badań polowych. W badaniach porównawczych uzyskano 5-krotnie większy wzrost stężenia fosforu w odpływie powierzchniowym w wyniku zastosowania określonej dawki P w nawozach w porównaniu z jego wzrostem pod wpływem zwiększenia o tę samą wartość testu glebowego Mehlich-3 (27).



Schemat 1. Struktura i komponenty indeksu fosforowego w modyfikacji Stanu Pensylwania USA
 Źródło: Buczko i Kochenbuch, 2007 (6)

W celu obliczenia czynnika źródła w Pensylwania P-Indeks należy zsumować zawartość P w glebie z ilością P wniesionego na pole z nawozami mineralnymi i naturalnymi. Ilość P wniesionego z nawozami jest korygowana współczynnikami aplikacji nawozów, które odzwierciedlają fakt, iż przy jednakowych dawkach i uwarunkowaniach topograficznych więcej P jest tracone przy stosowaniu powierzchniowym

niż doglebowym. Ponadto, im wcześniej nawóz zostanie wymieszany z glebą, tym straty są mniejsze (4). Dawka fosforu w nawozach naturalnych jest także korygowana współczynnikiem podatności na bezpośrednie straty P. W tabeli 2 przedstawiono współczynniki aplikacji nawozów wykorzystywane do wyznaczenia czynnika źródła w Pensylwania P-Indeks. Pensylwania P-Indeks nie uwzględnia strat P na drodze pobierania przez rośliny.

Tabela 2

Współczynniki aplikacji nawozów wg Pensylwania P-Indeks

Metoda aplikacji	Umieszczone lub wstrzyknięte 5 cm lub głębiej, np. nawóz startowy	Wymieszane z glebą w przeciągu 1 tygodnia	Wymieszane z glebą później niż w przeciągu 1 tygodnia od aplikacji lub niewymieszane, zastosowane w okresie od kwietnia do października	Wymieszane z glebą później niż w przeciągu 1 tygodnia od aplikacji lub niewymieszane, zastosowane w okresie od listopada do marca	Powierzchniowa aplikacja na zamrażnięte lub pokryte śniegiem gleby
Współczynnik aplikacji	0,2	0,4	0,6	0,8	1

Źródło: Beele i in., 2006 (5)

Na czynnik transportu składa się jego suma oraz parametr modyfikacji ciągłości, zgodnie z równaniem:

$$\text{transport} = \text{modyfikacja ciągłości} \times (\text{suma transportu} \div 22)$$

gdzie:

suma transportu = erozja + potencjał spływu powierzchniowego + drenaż podpowierzchniowy + odległość działająca

W celu oszacowania strat gleby i fosforu w wyniku erozji wykorzystywane jest empiryczne równanie Universal Soil Loss Equation USLE (36). Równanie USLE zostało wyznaczone na podstawie badań przeprowadzonych w warunkach naturalnych, a także z zastosowaniem symulatorów deszczu na poletkach wzorcowych. Poletka były wytyczone na stoku o długości 22,1 m i szerokości 1,87 m, spadek wynosił 9%. Na poletkach stosowano zabiegi agrotechniczne prowadzone wzdłuż spadku, co naj-

mniej dwa lata bez roślinności przed pomiarem. Straty w wyniku erozji wyznaczano ze wzoru:

$$E = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

gdzie:

E – roczna masa gleby wyerodowanej z jednostki powierzchni zlewni [$t/(ha \cdot rok^{-1})$];

R – średnia roczna erozyjność opadów deszczu i spływów ($Je \cdot rok^{-1}$);

K – podatność gleb na erozję (w funkcji: % frakcji, % subst. organicz., struktura, przepuszczalność) ($t \cdot ha^{-1} \cdot Je^{-1}$);

L – współczynnik długości zbocza;

S – współczynnik spadku zbocza;

C – współczynnik rodzaju upraw i sposobu użytkowania;

P – współczynnik zabiegów przeciwdziałających erozji.

Parametr R i częściowo C są parametrami regionalnymi, zależnymi od występowania deszczów wywołujących erozję.

Długotrwałe stosowanie nawozów fosforowych w ilości przewyższającej potrzeby pokarmowe roślin skutkuje przekroczeniem połowej pojemności gleby względem tego pierwiastka i wymywaniem do wód rozpuszczalnych związków fosforu i fosforu zawieszonego (15). Jeśli dany obszar charakteryzuje się dodatkowo dużą intensywnością opadów, wówczas głównym źródłem strat fosforu są powierzchniowe spływy z gleby. Potencjał spływu powierzchniowego jest uzależniony m.in. od typu gleby (przewodności hydraulicznej), spadku i stopnia zdrenowania terenu (teren zdrenowany sprawniej odprowadzają wodę, a przez to cechują się mniejszymi stratami P na drodze spływu powierzchniowego). Pensylwania P-Indeks obliczany jest na podstawie tablic dostępnych online na stronach stanowej agencji ds. środowiska. Spływ (drenaż) podpowierzchniowy, tj. straty na drodze przenikania P w głąb profilu glebowego oraz sączkami drenarskimi bezpośrednio do zbiorników wodnych mogą znacząco zwiększać ilość P dostającą się do wód gruntowych i powierzchniowych. Parametr ten jest uzależniony od stopnia zdrenowania terenu i może być korygowany przez stopień przepuszczalności gleby (5), a wyrażany jest przez jedną z trzech wartości: brak, nieregularny (losowy), regularny. Odległość działająca to odległość od krawędzi pola do najbliższego zbiornika wody powierzchniowej. Parametr ten wyraża ryzyko przedostania się transportowanego P do wód, lub analogicznie, możliwość sorpcji (biologicznej, chemicznej, fizycznej) przez środowisko, w którym jest transportowany. Modyfikacje ciągłości to parametr ujmujący w Pensylwania P-Indeks możliwość redukcji odpływającego P przez roślinność porastającą strefy buforowe.

Zgodnie z algorytmem zaprezentowanym w Schemacie 1 wyliczana jest finalna wartość indeksu dla pola lub jednorodnej jednostki pól. Wielkość Pensylwania P-Indeks przyjmuje wartości od 0 do 100 i w zależności od uzyskanej wartości obszar jest klasyfikowany pod względem ryzyka strat P zgodnie z tabelą 3. W zależności od

uzyskanej oceny stosuje się rekomendacje dla ograniczania ryzyka strat P i np. jeśli na analizowanym obszarze stwierdzono bardzo duże ryzyko strat P (wartości indeksu >100), nie zaleca się stosowania żadnych nawozów zawierających P.

Tabela 3

Interpretacja Penn. P-Indeks

Wartość indeksu fosforu	Ocena
0	brak ryzyka strat fosforu
0–60	niskie ryzyko strat fosforu
60–80	średnie ryzyko strat fosforu
80–100	duże ryzyko strat fosforu
>100	bardzo duże ryzyko strat fosforu

Źródło: Sharpley i in., 2003 (29)

Indeks fosforu w wybranych krajach europejskich

Dania

Duński Indeks fosforowy (Dania P-Indeks) został opracowany przez Andersena i Kronvanga w 2006 r. (1) jako narzędzie do zarządzania wodami po wdrożeniu unijnej Ramowej Dyrektywy Wodnej. Stanowi on modyfikację Penn. P-Indeksu (29) i o ile nie zaznaczono inaczej, komponenty i czynniki indeksu oblicza się tak jak opisano powyżej. Warto odnotowania jest to, że w badaniach służących opracowaniu Dania P-Indeksu posługiwano się w mniejszym stopniu rzeczywistymi wynikami analiz glebowych, zaś w większym – przybliżonymi wartościami oszacowanymi na podstawie danych statystycznych.

Już wstępna ocena Dania P-Indeksu zawiera istotną modyfikację, którą jest włączenie czynnika zdrenowania terenu zlokalizowanego również w odległości większej niż 45 m do najbliższego cieku wodnego czy jeziora. W oryginalnej wersji Indeksu Pensylwanii (Penn. P-Indeks) zdrenowanie terenu nie było parametrem w ocenie wstępnej. Jest to modyfikacja wynikająca z faktu, że znaczna część obszarów rolniczych występująca w Danii ma płaską rzeźbę i jest zdrenowana, a woda ze strefy korzeniowej (z potencjalnie dużą zawartością fosforu) dostająca się do sączków drenarskich jest bezpośrednio transportowana do wód z pominięciem naturalnych procesów filtracji i wychwytywania fosforu. Uwzględniając ten fakt, "komponent drenarski", jako istotna i powszechna w Danii modyfikacja naturalnych procesów przemian P w glebie, został przez twórców Dania P-Indeksu włączony do analizy wstępnej. Czynniki źródła są wyznaczane według algorytmu zaprezentowanego w Penn. P-Indeks (tab. 4).

Tabela 4

Komponenty składowe i przypisane im wagi używane do wyznaczania czynników źródła w Dania P-Indeks

Test glebowy	Zawartość fosforanów w glebie oznaczona metodą Mehlich 3 (mg P·kg ⁻¹)				
Parametr zawartosci fosforu w glebie = zawartość fosforanów w glebie × 0,2					
Poziom nawożenia mineralnego	dawki nawożenia P (kg·ha ⁻¹)				
Poziom nawożenia naturalnego	dawki nawożenia P (kg·ha ⁻¹)				
Sposób aplikacji nawozów	0,2 zaaplikowane na głębokość 5 cm lub głębiej	0,4 wymieszane z glebą do 7 dni	0,6 wymieszane z glebą po upływie 7 dni lub niewymieszane; aplikacja w okresie od kwietnia do października	0,8 wymieszane z glebą po upływie 7 dni lub niewymieszane; aplikacja w okresie od listopada do marca	1,0 powierzchniowa aplikacja na glebę zamrożoną lub pokrytą śniegiem
Parametr nawożenia mineralnego = dawki nawożenia (kg·ha ⁻¹) × wsp. metody aplikacji nawozów					
Dostępność P z nawozów naturalnych	0,5 przekompostowany obornik/nawozy naturalne i osady ściekowe			0,8 bydłęcy obornik	1,0 kurzy i świński obornik
Parametr nawożenia naturalnego = dawki nawożenia (kg·ha ⁻¹) × wsp. metody aplikacji nawozów × dostępność fosforu z nawozów naturalnych					
Komponent źródła = zawartość fosforanów w glebie + parametr nawożenia mineralnego + parametr nawożenia naturalnego					

Źródło: Andersen i Krovnang, 2006 (1)

Nowym parametrem w Dania P-Indeks charakteryzującym transport P jest potencjał wymywania (tab. 5). Wyraża on ryzyko dostania się P ze strefy korzeniowej do drenów lub do płytko położonego zwierciadła wody gruntowej. Gleby gliniaste mają przypisaną w Dania P-Indeks większą wagę niż gleby piaszczyste, z powodu ryzyka przepływu wód makroporami w gliniastej, strukturalnej glebie. Pomimo tego, że podpowierzchniowa warstwa gleb gliniastych może mieć dużą niewykorzystaną pojemność sorpcyjną, to jednak przez istniejące makropory (również wolne przestrzenie powstałe dzięki dżdżownicom, puste przestrzenie po korzeniach itp.) fosfor, rozpuszczony i zawieszony, z wierzchnich warstw gleby może być transportowany bezpośrednio do drenów lub zwierciadła wód (przepływ uprzywilejowany). Gleby organiczne mają w Dania P-Indeks przypisaną największą wagę. Autorzy uzasadnili swój wybór tym, że pojemność sorpcyjna gleb jest w większości związana z frakcją

mineralną i w związku z tym gleby organiczne cechują się niską pojemnością sorpcyjną (32). Dodatkowo, inne duńskie badania pokazały, że straty P ze zdrenowanych organicznych gleb były znaczące (24).

Tabela 5

Komponent transportu wg Dania P-Indeks

Erozja	Strata gleby (t·ha ⁻¹) wg równania USLE (Wischmeyer i Schmidt 1978) (33)				
Potencjał spływu powierzchniowego	0 bardzo niski	2 niski	4 średni	6 wysoki	8 b. wysoki
Potencjał wymywania (wypłukiwania)	2 gleby piaszczyste		4 gleby gliniaste		6 gleby organiczne
Drenaż podpowierzchniowy	0 brak		1 kilka rowów/kanałów w szerokiej rozstawie		2 regularna sieć drenarska
Odległość działająca	0 >45 m			8 <45 m	
Modyfikacja ciągłości	0,03 nadbrzeżny bufor o szer. 2 m; znikoma erozja		0,24 nadbrzeżny bufor o szer. 2 m; erozja średnia		0,65 nadbrzeżny bufor o szer. 2 m; erozja wysoka
	0,02 nadbrzeżny bufor o szer. > 2 m; znikoma erozja		0,20 nadbrzeżny bufor o szer. > 2 m; erozja średnia		0,59 nadbrzeżny bufor o szer. > 2 m; erozja wysoka
Suma transportu = erozja + potencjał spływu + drenaż podpowierzchniowy + odległość działająca					
Komponent transportu = [(erozja + potencjał spływu + odległość działająca) × modyfikacja ciągłości + (drenaż podpowierzchniowy + potencjał wymywania)]/22					

Źródło: Andersen i Kronvang, 2006 (1)

Odmienny od zaprezentowanego w Penn. P-Indeks jest też sposób wyznaczania modyfikacji ciągłości, definiowanej jako prawdopodobieństwo przejścia wyerodowanej materii przez strefę buforową. Połowe badania prowadzone w duńskich warunkach przez Andersena i in. (2) pokazały, że ryzyko przenikania osadów przez pasy buforowe jest funkcją szerokości strefy buforowej i natężenia erozji zboczowej. W proces wyznaczania indeksu włączono więc podział natężenia erozji na 3 klasy: znikomą ($<0,084 t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$), średnią ($0,084-1,008 t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$) i wysoką ($>1,008 t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$) i w oparciu o ten podział oraz szerokość pasa buforowego wyznaczana jest modyfikacja ciągłości. W wersji duńskiej komponent transportu wyznaczany jest w nieco odmienny sposób (tab. 5). Wartość finalną Dania P-Indeksu oblicza się tak jak w oryginalnej wersji Penn. P-Indeksu, tj.

$$\text{Dania P-Indeks} = 2 \times \text{Czynnik źródła} \times \text{Czynnik transportu}$$

Norwegia

Norweska wersja indeksu fosforowego (NO P-Indeks) również bazuje na Penn. P-Indeks, a dzięki modyfikacjom uwzględnia szereg lokalnych warunków klimatycznych typowych dla tego kraju (4). Podstawowe zmiany wprowadzone do NO P-Indeksu to m.in. uwzględnienie wpływu ujemnych temperatur oraz procesów zamarzania i odmarzania na uwalnianie P z pozostawionych resztek roślinnych, a także włączenie do modelu parametru normalizującego zróżnicowanie opadów w kraju. Czynniki źródła i transportu są mnożone (podejście multiplikatywne), by lepiej odzwierciedlić zachodzące interakcje. Finalna wartość NO P-Indeksu jest obliczana zgodnie z poniższymi równaniami:

Czynnik źródła = $(0,3 \times \text{zawartość P w glebie} + \text{dawka P w nawozach mineralnych} + \text{dawka P w nawozach organicznych} + \text{P w resztkach roślinnych}) \times \text{saldo bilansu P}$

Czynnik transportu = $(4 \times \text{erozja} + \text{spływ powierzchniowy} + \text{częstotliwość zalewania}) \times \text{odległość działająca} \times \text{modyfikacja ciągłości} \times (\text{parametr profilu glebowego} \times \text{spływ podpowierzchniowy})$

W norweskiej wersji P-Indeksu postanowiono uwzględnić istotny wpływ wielkości opadu na ilość wyerodowanego P. Aby wyrównać blisko 10-krotne różnice w wysokości opadu między różnymi regionami kraju, stworzono czynnik opadu, którym jest iloraz średniej wysokości opadu dla danego regionu i średniej wysokości opadu dla całej Norwegii (700 mm). Ostatecznie norweski indeks fosforowy obliczany jest ze wzoru:

$$\text{NO P-indeks} = \text{Czynnik źródła} \times \text{Czynnik transportu} \times \text{Roczny opad} \div 4$$

Czynniki źródła

Zawartość fosforu w glebie oznacza się metodą Egnera-Riehma i w NO P-Indeks ma ona wagę 0,3. Ten współczynnik przeliczeniowy przyjęli autorzy jako czynnik korygujący zawartości P w glebie uzyskane metodą Egnera-Riehma do wielkości uzyskanych w metodzie Mehlich-3 (4). Poza komponentami zawartymi i wyznaczanymi w identyczny sposób, jak omówiono wcześniej w Penn. P-Indeks (komponent nawożenia naturalnego i nawożenia mineralnego), w NO P-Indeks uwzględniano również wpływ obowiązujących uwarunkowań prawnych oraz wpływ klimatu (niskich temperatur) na pozostawianie na polach do późnej jesieni resztki roślinne.

Następujące po sobie na przestrzeni jednego roku temperatury ujemne i dodatnie powodują zamarzanie i rozmarzanie materii roślinnej, co skutkuje przyspieszonym rozpadem komórek roślinnych i szybszym uwalnianiem z nich P (3). Dla traw jednorocznych zaobserwowano, że następujące po sobie 8 cykli zamarzania i rozmarzania są wystarczające do uwolnienia całkowitej puli P (100%) pozostawionej na zimę z resztkami roślinnymi (3). Wyniki badań na trawach wieloletnich wskazują, że te same

warunki powodują straty ok. 50% P pozostawionego na polu z resztkami roślinnymi (4). Wyniki tych badań ujęto w NO P-Indeks, co pokazuje tabela 6.

Tabela 6

Czynniki źródła w norweskiej modyfikacji indeksu fosforowego

Zawartość P w glebie		$0,30 \times P\text{-AL. (mg} \cdot \text{kg}^{-1})$		
Dawka nawożenia mineralnego		$(\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1})$		
Dawka nawożenia naturalnego		$(\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1})$		
Metoda aplikacji nawozów	0,2 zaaplikowane na głębokość 5 cm lub głębiej	0,4 wymieszane z glebą w przeciągu 18 godz.	0,6 wymieszane z glebą po 18 godz. lub niewymieszane, aplikowane w okresie od kwietnia do sierpnia	0,8 wymieszane z glebą po 18 godz. lub niewymieszane, aplikowane w okresie od września do marca
Nawożenie mineralne = dawka nawożenia mineralnego $\times$ metoda aplikacji				
Dostępność P z nawozów naturalnych	0,5 przekompostowany obornik/nawozy naturalne i osady ściekowe	0,8 bydłocy obornik	1,0 kurzy i świński obornik	
Nawożenie naturalne = dawka nawożenia mineralnego $\times$ metoda aplikacji $\times$ dostępność P z nawozów naturalnych				
Resztki roślinne	resztki pozostawione na polu późną jesienią ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) dla stref H4-H8: 100% dla upraw jednorocznych i 50% dla upraw wieloletnich dla stref H2-H3 – parametru strat z resztek roślinnych nie uwzględnia się			
Saldo bilansu P	0,8 P wyniesiony > P wniesiony	1,0 P wyniesiony = P wniesiony	1,2 P wyniesiony < P wniesiony	

Źródło: Bechmann i in., 2005b (4) zmodyfikowane

Parametr uwzględniający P uwalniany z resztek roślinnych nie jest stosowany dla wszystkich obszarów Norwegii, a tylko na obszarach o zimniejszym klimacie wyznaczanym na podstawie stref mrozoodporności, tj. obszarów wydzielonych geograficznie w oparciu o kryterium średniej rocznej temperatury minimalnej. Autorzy NO P-Indeksu przyjęli, że parametr ten będzie uwzględniany dla upraw znajdujących się w strefach mrozoodporności od H4 do H8 (najzimniejsze).

Zgodnie z obowiązującym prawem norwescy rolnicy są zobligowani do wymieszania z glebą zastosowanych nawozów naturalnych w czasie do 18 godzin. Odstępstwo od dozwolonego w Penn. P-Indeksu okresu 1 tygodnia jest więc podyktowane potrzebą dostosowania NO P-Indeksu do lokalnie stosowanych praktyk i wymogów prawnych. Kolejnym elementem wynikającym z obowiązującego prawa, a znajdującym się w modelu, jest ustalenie granicy 1 września jako daty rozgraniczającej okres, w którym prawdopodobieństwo strat P do wód znacząco się zwiększa. Na podstawie badań (8, 21) ustalono, że straty P po zastosowaniu nawozów jesienią są wyższe od strat w wyniku zastosowania nawozów wiosną, nawet pomimo natychmiastowego ich przyorania. Umownie wyznaczona data 1 września jako początek jesieni obowiązuje w norweskich regulacjach prawnych i została zaimportowana do NO P-Indeksu.

Ilość P narażonego na straty z gleby jest w NO P-Indeks korygowana również przez uwzględnienie salda bilansu P. W Norwegii istnieje obowiązek prawny sporządzania planów nawożenia opartych o testy glebowe uaktualniane co 4–8 lat. Autorzy NO P-Indeksu wykorzystują więc wartość testu glebowego jako parametr opisujący ryzyko strat P z gleb w dłuższej perspektywie czasowej (maksymalnie 8 lat), zaś saldo bilansu sporządzanego corocznie jako informację o ryzyku strat P wynikającą z konkretnych działań (dawka i sposób nawożenia, rodzaj uprawy itp.) w krótszej perspektywie czasowej (4). Jeśli saldo jest dodatnie (zawartość P w glebie jest wyższa niż ilość, którą mogą pobrać rośliny), co zwiększa ryzyko strat, stosowany jest współczynnik 1,2; jeśli zaś ilość P wyniesionego jest większa od ilości P zastosowanego na pole, wówczas stosowany jest współczynnik 0,8. Jeśli pobranie P przez rośliny jest równoważone przez dopływ P, wówczas wielkość czynnika źródła nie ulega zmianom (współczynnik = 1).

Czynnik transportu

Czynnik transportu NO P-Indeksu podobnie jak w innych wersjach P-Indeksu wyznaczany jest na podstawie powszechnie znanych mechanizmów transportu P do wód. Uwzględnia on elementy zawarte w Penn. P-Indeks: ilość wyerodowanej gleby wyznaczonej przy użyciu modelu USLE, potencjał spływu powierzchniowego, informacje o dominującym typie gleby, stopień zdrenowania terenu, odległość do zbiornika wód powierzchniowych czy obecność stref buforowych.

Modyfikacją NO P-Indeksu jest wyraźny podział na powierzchniowe straty P (które uwzględniają ilość wyerodowanej gleby, spływ powierzchniowy oraz występowanie powodzi) oraz straty podpowierzchniowe, tj. straty na drodze przenikania P w głąb profilu glebowego oraz sączkami drenarskimi bezpośrednio do zbiorników wodnych. Powierzchniowe straty P są modyfikowane przez parametry odległości działającej oraz występowanie i rodzaj stref buforowych. Parametr profilu glebowego wyraża ryzyko dostania się P ze strefy korzeniowej do drenów lub do płytko położonego zwierciadła wody gruntowej (odpowiada czynnikowi „potencjał wymywania” w Dania P-Indeksu). Czynniki transportu według NO P-Indeksu przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 7

Czynniki transportu wg norweskiej modyfikacji indeksu fosforowego

Erozja	Strata gleby (USLE) (t·ha ⁻¹)				
Częstotliwość zalewania	0 sporadycznie, nigdy >100 lat		2 rzadko 10–100 lat		4 często <10 lat
Spływ powierzchniowy	0 bardzo niski	2 niski	4 średni	6 wysoki	8 b. wysoki
Odległość działająca	0,2 dla odległości >50 m			1,0 dla odległości <50 m	
Modyfikacja ciągłości	0,7 nadbrzeżny bufor o szer. >5 m;		1,0 pokryta trawą droga wodna		1,1 bezpośrednie połączenie ze zbiornikiem wodnym
Drenaż podpowierzchniowy	0 brak		0,5 pojedyncze rowy i kanały		1 regularna sieć drenarska
Parametr profilu glebowego	2 gleby piaszczyste		4 gleby gliniaste		6 gleby organiczne
Roczny opad	opad/700				

Źródło: Bechmann i in., 2005b (4)

Szwecja

Szwedzki indeks fosforowy (SZ P-Indeks) (7) powstał na bazie amerykańskich wersji indeksu (głównie stworzonych dla stanów Pensylwania i Maryland), jednak szeroko zakrojone zmiany spowodowały, że spośród omawianych indeksów uległ on największej modyfikacji. Główną różnicą jest wyznaczanie ryzyka start fosforu z podziałem na formy fosforu występujące w glebie, które determinują główny mechanizm strat do wód. Wartość finalna indeksu jest sumą ryzyka spowodowanego stratami reaktywnych i niereaktywnych form fosforu. Fosfor reaktywny (RP) jest to pula P, która reaguje z błękitem molibdenowym, występująca głównie w formie fosforanów. Fosfor niereaktywny (UP) wyznaczany jest jako różnica między fosforem całkowitym a reaktywnym (16).

Odmienne warunki klimatyczno-glebowe typowe dla Szwecji, które uwzględniono w SZ P-Indeks to m.in. występowanie pokrywy śniegowej i jej topnienie, zamarzanie i rozmarzanie gleby, względnie niska intensywność opadów przy wysokiej przepuszczalności gleby, nizinna rzeźba terenu oraz znaczny udział w terenach rolniczych obszarów zdrenowanych (44%) (6). Zestawienie czynników uwzględnionych w SZ P-Indeks przedstawiono w tabeli 8.

Tabela 8

Czynniki uwzględnione w szwedzkiej modyfikacji indeksu fosforowego

Czynnik		Uwagi
Czynniki źródła	erozja	wyliczona w oparciu o równanie RUSLE
	PER	określa ilość UP w wyerodowanej glebie, jest funkcją składu granulometrycznego gleby i oznaczonej zawartości P wg metody Egnera-Riehma
	dawka zastosowanego P	oparta o rekomendacje po obliczeniu bilansu P
	czas aplikacji P	miesiąc aplikacji nawozów
	sposób aplikacji	czas, jaki upłynął od wymieszania z glebą
	zaw. P w glebie	oznaczona wg metody Egnera-Riehma w wierzchniej warstwie gleby (dotyczy spływu powierzchniowego i uprzywilejowanego) i w podglebiu (wpływa na przepływ kapilarny)
	sorpcja gleby względem P	jednopunktowy indeks sorpcji fosforu (PSI)
	stopień wysycenia gleby P DPS	$DPS = P - AL/PSI$, obliczane dla wierzchniej warstwy gleby i podglebia
Czynniki transportu	spływ powierzchniowy	funkcja przepuszczalności gleby, nachylenia terenu; dotyczy transportu RP i UP
	przepływ uprzywilejowany	funkcja przewodności hydraulicznej i struktury gleby; dotyczy transportu RP i UP
	przepływ kapilarny	funkcja przewodności hydraulicznej i struktury gleby; dotyczy transportu RP
Formy P	P reaktywny	glebowy P oznaczony jako funkcja DPS zwiększony o P wyznaczony z PSI
	P niereagujący	straty P wyznaczone w oparciu o równanie RUSLE i PER zwiększone o P wyznaczony z PSI
Połączenia	odległość działająca	liczona od krawędzi pola do zbiornika wód powierzchniowych
	sieci drenarskiej	wpływa na przepływ uprzywilejowany oraz na połączenie pola ze zbiornikami wód powierzchniowych
	strefy buforowe	modyfikują straty UP w odpływie powierzchniowym
	występowanie oczek wodnych	zwiększają przepływ uprzywilejowany i straty RP

Źródło: Djodic i Bergström, 2005 (7); Heckrath i in., 2008 (11) zmodyfikowane

Wykorzystywane w wielu wersjach P-Indeksu podejście multiplikatywne sugeruje, że każdy czynnik transportu w równym stopniu wpływa na każdy z czynników źródła (zawartość P w glebie, nawożenie mineralne i nawożenie naturalne). Sposób wyliczania finalnej wartości indeksu stosowany w SZ P-Indeks jest natomiast determinowany przez wpływ hydraulicznych i geomorfologicznych właściwości danego pola na poszczególne formy P (stanowi to poniekąd odpowiednik współczynników wagowych w innych wersjach P-Indeksu). Takie oryginalne podejście, zdaniem autorów SZ P-Indeks, pozwala uwzględniać rzeczywisty wpływ hydraulicznych i morfologicznych właściwości terenu na poszczególne źródła P (7) i stanowi unikalną modyfikację niewystępującą w innych wersjach P-Indeksu. Ponadto, podejście multiplikatywne bazuje na założeniu, że każda z występujących form P w glebie podlega

stratom wskutek różnych mechanizmów (tj. erozji glebowej, spływu powierzchniowego, podpowierzchniowego i innych) w takim samym stopniu (7).

Takie podejście nie opisuje prawidłowo naturalnych procesów strat fosforu, gdyż np. wprowadzenie do systemu strefy buforowej zmniejsza straty UP i ma tylko niewielki wpływ na zmniejszenie strat RP (35), z kolei spływ powierzchniowy przyczynia się głównie do wynoszenia UP. Dlatego też w SZ P-Indeks straty P liczone są oddzielnie dla UP i RP. Warto w tym miejscu nadmienić, że z powodu nizinnej rzeźby terenu, względnie niskiej intensywności opadów przy wysokiej przepuszczalności gleb, w warunkach szwedzkich straty na drodze spływu powierzchniowego stanowią mniej istotne źródło strat P w porównaniu ze stratami podpowierzchniowymi (w przeciwieństwie np. do Polski).

Szwedzką modyfikacją jest również wykorzystywanie przy wyznaczaniu czynników źródła wskaźników niespotykanych w innych skandynawskich modyfikacjach, takich jak pojemność sorpcyjna gleby względem P (wyrażana tu jako jednopunktowy indeks sorpcji fosforu PSI) oraz stopień wysycenia gleby fosforem DPS. Wskaźnik DPS zaproponowano jako wskaźnik ryzyka utraty RP, gdyż często jest on lepiej skorelowany ze stężeniem P w spływie powierzchniowym lub podpowierzchniowym niż wyniki innych testów glebowych (13, 17). DPS jest wyznaczany na podstawie indeksu sorpcji fosforu (PSI) zgodnie z równaniem:

$$\text{DPS} = \text{P} - \text{AL}/\text{PSI}$$

Rzeczywiste dane potrzebne do wyznaczania PSI nie są powszechnie dostępne w Szwecji, więc autorzy SZ P-Indeksu zaproponowali alternatywny sposób jego wyznaczania: w oparciu o pH gleby, zawartość materii organicznej i frakcji gliniastej oraz zawartość P w glebie oznaczoną metodą Egnera-Riehma.

Stopień wysycenia gleby fosforem DPS jest w SZ P-Indeksie wyznaczany zarówno dla wierzchniej warstwy gleby, jak i dla podglebia. Wartość DPS oznaczona w podglebiu służy do wyznaczania ryzyka strat RP na drodze przepływu kapilarnego, zaś wartość DPS wierzchniej warstwy gleby do wyznaczania ryzyka strat P na drodze spływu powierzchniowego i przepływu uprzywilejowanego. Przyjęto założenie, że centra sorpcji fosforu w podglebiu są w przypadku spływu preferencyjnego omijane, toteż stopień wysycenia podglebia w przypadku tego mechanizmu strat nie jest istotny.

Ilość wniesionego P do gleby z nawozami, zgodnie z zaproponowanym schematem, również ulega podziałowi na RP i UP. Podział ten dokonywany jest na podstawie pojemności sorpcyjnej gleby (wyrażonej przez PSI), w oparciu o wyznaczone doświadczalnie równanie przytaczane przez Djodjica i Bergströma (7), zgodnie z którym im wyższa wartość PSI gleby, tym mniejsza ilość P wniesionego z nawozami występuje w formie reaktywnej i tym samym zwiększa się ilość UP (wynik różnicy między ilością P wniesionego na pole a ilością oznaczoną jako RP).

Równanie RUSLE w SZ P-Indeksie służy raczej do wyznaczania ilości straconego UP niż wielkości erozji. Uzyskana na podstawie wielu badań polowych (w zależno-

ści od procentowego udziału frakcji pylistej, piasku, pH oraz zawartości P w glebie oznaczonej metodą Egnera-Riehma) średnia zawartość UP w wyerodowanym materiale przypisana do wielkości od 1 do 16 jest mnożona przez wielkość erozji uzyskanej z równania RUSLE i w ten sposób wyznaczana jest wielkość czynnika źródła UP. Ponadto w celu wyznaczenia całkowitej ilości UP w SZ P-Indeks uwzględnia się również stopień wzbogacenia fosforem wyerodowanego materiału PER, który jest oznaczany zgodnie z poniższym równaniem:

$$\text{PER} = \frac{\text{zawartość P w glebie wyerodowanej}}{\text{zawartość P w glebie macierzystej}}$$

Zastosowanie wskaźnika PER jest zasadne, gdyż w toku wielu badań zaobserwowano (31), że erozja gleby i związków fosforu w niej zawartych zachodzi wybiórczo. Niektóre frakcje są podatniejsze na erozję, co skutkuje większą koncentracją P w materiale wyerodowanym niż w materiale źródłowym. W świetle przytoczonych powyżej wyników badań bardziej zasadne wydaje się więc szacowanie ilości wyniesionego P na podstawie wskaźnika PER, gdyż wykorzystanie do tego celu masy wyerodowanej gleby może, w pewnych warunkach, zaniżać estymowaną ilość utraconego P.

SZ P-Indeks to narzędzie działające pod systemem operacyjnym Windows. Dla użytkowników przygotowano prezentacje wprowadzające moduł obliczeniowy oraz interpretacje wyniku i zalecenia dotyczące pojedynczych analizowanych pól lub obszarów ze wskazaniem możliwych do zastosowania rozwiązań. Plik wynikowy, obok wyliczonej wartości P-Indeksu, zawiera również porównanie stosowanych przez rolnika praktyk z zaleceniami jednostek rządowych wraz z ich teoretycznym uzasadnieniem. Pomimo wielokrotnego sprawdzenia SZ P-Indeksu jego wdrożenie w praktyce jak dotąd okazało się mało skuteczne, a głównymi tego powodami jest brak dostępu do pewnych danych (np. niekompletne mapy glebowe) oraz brak wymiernych korzyści dla rolników wyznaczających P-Indeks dla swojego gospodarstwa. Praktyka wykazała, że indeks jest częściej wykorzystywany przez przedstawicieli różnych szczebli władz niż przez samych rolników.

Podsumowanie

Istnieje powszechna zgoda środowiska naukowego, że do Morza Bałtyckiego trafia ładunek P, który zaburza funkcjonowanie tego ekosystemu. Co najmniej 95% całkowitego ładunku jest transportowane z rzekami, z czego ok 50% pochodzi ze źródeł rozproszonych, głównie z rolnictwa. Niezbędne jest podjęcie działań mających ograniczyć straty P do wód. Zidentyfikowanie obszarów, gdzie ryzyko strat jest największe może w znaczący sposób przyczynić się do redukcji całkowitych strat P, gdyż zastosowane tam środki mitygujące będą miały największą skuteczność. Służy temu narzędzie, jakim jest indeks fosforowy. Aby jednak trafnie identyfikować straty P, niezbędne jest spośród szeregu czynników, które warunkują ich wielkość, włączyć

nie do modelu tych naprawdę istotnych w danych warunkach oraz odpowiednie ich skwantyfikowanie.

W toku badań i licznych opracowań Dania, Szwecja i Norwegia przystosowały powszechnie wykorzystywaną wersję P-Indeksu do unikalnych warunków występujących na terenie każdego z państw. Najbardziej złożona i kompleksowa jest szwedzka modyfikacja, ale wpłynęło to na trudniejszą obsługę modelu, co skutkuje ograniczonym wykorzystaniem w praktyce. Narzędzie z założenia stworzone dla rolników w Szwecji znajduje zastosowanie głównie przez specjalistów zarządzających wodami. Szwedzki model wykorzystuje do wyznaczenia czynnika źródła parametr wysycenia gleby fosforem. Z punktu poprawności szacowania ryzyka strat P z gleb do wód podejście to wydaje się słuszne, jednakże powszechnie dostępnymi wskaźnikami opisującymi stan fosforu w glebie jest zawartość P przyswajalnego oznaczona według metody Mehlich-3 czy Egnera z późniejszymi modyfikacjami.

Konstrukcja indeksu szacującego straty fosforu do wód musi stanowić kompromis między stosunkowo prostą obsługą (co wpłynie dodatnio na łatwość użytkowania) i małą ilością danych wejściowych (powszechnie dostępnych!) a próbą maksymalnie pełnego uchwycenia złożoności procesów strat fosforu do wód. Obecnie w wielu krajach Europy trwają prace nad kalibracją P-Indeksu, tak by uwzględnił lokalne zmienne i by mógł być wykorzystywany w praktyce przez doradców rolnych, rolników i specjalistów zarządzających wodami. Są podejmowane też próby stworzenia indeksu odpowiedniego dla całego obszaru Europy, co jednak nie wydaje się być najlepszym rozwiązaniem, ze względu na zróżnicowanie klimatyczno-przyrodnicze kontynentu. Bardziej zasadne zdają się być próby dostosowywania P-Indeksu w mniejszej skali przestrzennej, do lokalnych warunków w obrębie państwa czy regionu. W Instytucie Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa również podjęto prace w celu stworzenia indeksu przystosowanego do polskich warunków klimatyczno-glebowych.

Literatura

1. Andersen H.E., Kronvang B.: Modifying and evaluating a P index for Denmark. *Water Air Soil Poll.*, 2006, **174**: 341-353.
2. Andersen H.E., Kronvang B., Larsen S.E.: Development, validation and application of Danish empirical phosphorus models. *J. Hydrol.*, 2005, **304**: 355-365.
3. Bechmann M., Kleinman P.J.A., Sharpley A.N., Saporito L.: Effect of freezing and thawing on fate of phosphorus in bare, manured and catch cropped soils. *J. Environ. Qual.*, 2005a, **34**(6): 2301-2309.
4. Bechmann M., Krogstad T., Sharpley A.N.: A phosphorus index for Norway. *Acta Agr. Scand., Section Soil Plant Sci.*, 2005b, **55**(3): 205-213.
5. Beegle D.B., Weld J.L., Gburek W.J., Kleinman P.J.A., Sharpley A.N., Kogelmann C.: The Pennsylvania Phosphorus Index: Version 1. User Documentation Draft, May 2006. Penn State College of Agricultural Sciences, Agricultural Research and Cooperative Extension Publication CAT UC180, University Park, Pennsylvania.

6. Buczek U., Kuchenbuch R.O.: Phosphorus indices as risk-assessment tools in the USA and Europe –a review. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2007, **170**(4): 445-460.
7. Djodjic F., Bergström L.: Conditional phosphorus index as an educational tool for risk assessment and phosphorus management. *Ambio.*, 2005, **34**: 296-300.
8. Eltun R., Fugleberg O., Nordheim O.: The Apelsvoll cropping system experiment VII. Runoff losses of soil particles, phosphorus, potassium, magnesium, calcium and sulphur. *Nor. J. Agr. Sci.*, 1996, **10**: 371-384.
9. Główny Urząd Statystyczny: Mały rocznik statystyczny Polski 2013. Wyd. GUS, Warszawa 2013
10. Heathwaite A.L., Fraser A.I., Johnes P.J., Hutchins M., Lord E., Butterfield D.: The phosphorus indicators tool: A simple model of diffuse P loss from agricultural land to water. *Soil Use Manage.*, 2003, **19**: 1-11.
11. Heckrath G., Bechmann M., Ekholm P., Ulen B., Djodjic F., Andersen H.E.: Review of indexing tools for identifying high risk areas of phosphorus loss in Nordic catchments. *J. Hydrol.*, 2008, **349**: 68-87.
12. HELCOM: Minutes of the fifth meeting of coresets expert workshop for biodiversity indicators (HELCOM Coresets bd), Helsinki, Finland, 27–28 March 2012.
13. Hughes S., Reynolds B., Bell S.A., Gardner C.: Simple phosphorus saturation index to estimate risk of dissolved P in runoff from arable soils. *Soil Use Manage.*, 2000, **16**: 206-210.
14. Hughes K., Magette W., Kurz I.: Calibration of the Magette phosphorus ranking scheme: A risk assessment tool for Ireland. *Diffuse Pollution Conference Proceedings*, 2003, International Water Association, Dublin.
15. Igras J., Fotyła M.: Phosphorus utilization and diffuse losses in agricultural crop production. In: Temporal and spatial differences in emission of nitrogen and phosphorus from Polish territory to the Baltic Sea, J. Igras and M. Pastuszek (eds). Gdynia – IUNG-PIB Puławy, 2012.
16. Igras J., Pastuszek M. (red): Udział polskiego rolnictwa w emisji związków azotu i fosforu do Bałtyku. IUNG-PIB, Puławy 2009, ss. 416.
17. Kleinman P.J.A., Sharpley A.N.: Estimating soil phosphorus sorption saturation from Mehlich-3 data. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 2002, **33**: 1825-1839.
18. Kopieński J., Ochala P., Jadczyński T.: Produkcyjne i środowiskowe aspekty gospodarowania fosforem. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2013, **34**(8): 57-74
19. Lemunyon J., Gilbert R.G.: The concept and need for a phosphorus assessment tool. *J. Prod. Agric.*, 1993, **6**: 483-486.
20. OECD: Environmental indicators for agriculture. Publication service. Vol.4, chapter 3, Paris 2006.
21. Oskarsen H., Haraldsen T.K., Aastveit A.H., Myhr K.: The Kvithamar field lysimeter II. Pipe drainage, surface runoff and nutrient leaching. *Nor. J. Agr. Sci.*, 1998, **10**: 211-228.
22. Pondel H., Ruszkowska M., Sykut S., Terelak H.: Wymywanie składników nawozowych z gleb w świetle badań prowadzonych przez Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa. *Rocz. Gleb.* 1991, t. XLII, **3**(4): 97-106.
23. Potarzycki J.: Fosfor w glebie. *J. Elementol.*, 2003, **8**: 19-32.
24. Rubæk G.H., Kronvang B., Dalgaard T., Hansen J.F.: Vandmiljøplan III. Fosfor i dansk landbrug, omsætning, tab og virkemidler. Danmarks Jordbrugsforskning 2003 (po duńsku).
25. Sapek A.: Emisja gazów cieplarnianych z rolnictwa. Zeszyty edukacyjne, IMUZ, Falenty 1998, **5**: 17-26.
26. Sharpley A.N., McDowell R.W., Weld J.L., Kleinman P.J.A.: Assessing Site Vulnerability to Phosphorus Loss in an Agricultural Watershed. *J. Environ. Qual.*, 2001, **30**(6): 2026-2036.

27. Sharpley A.N., Tunney H.: Phosphorus research strategies to meet agricultural and environmental challenges of the 21st century. *J. Environ. Qual.*, 2000, **29**: 176-181.
 28. Sharpley A.N., Chapra S.C., Wedepohl R., Sims J.T., Daniel T.C., Reddy K.R.: Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options. *J. Environ. Qual.*, 1994, **23**: 437-451.
 29. Sharpley A.N., Weld J.L., Beegle D.B., Kleinman P.J.A., Gburek W.J., Moore Jr.P.A., Mullins G.: Development of phosphorus indices for nutrient management planning strategies in the United States. *J. Soil Water Cons.*, 2003, **58**: 137-152.
 30. Sharpley A.N.: Soil phosphorus dynamics: agronomic and environmental impact. *Ecol. Eng.*, 1995, **5**: 261-279.
 31. Sharpley A.N.: The enrichment of soil phosphorus in runoff sediments. *J. Environ. Qual.*, 1980, **9**: 521-526.
 32. Svendsen L.M., Kronvang B. (eds): Phosphorus in the Nordic countries. In: *Methods, bio-availability, effects and measures*. NORD, 1991, **47**: 201.
 33. Sykut S.: Wymywanie makroelementów z gleb w lizymetrach. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2000, **4(5)**: 18-26.
 34. Tuukkanen H.R., Uusitalo R., Yli-Halla M.J.: Modification of P index for Finland. International Phosphorus Transfer Workshop (IPTW) 2001: Connecting Phosphorus Transfer from Agriculture to Impacts in Surface Waters. 28.08–1.09.2001, Plymouth, Devon, Anglia.
 35. Uusi-Kamppa J., Brakserud B., Jansson H., Syversen N., Uusitalo R.: Buffer zones and constructed wetlands as filters for agricultural phosphorus. *J. Environ. Qual.*, 2000, **29**: 151-158.
 36. Wischmeier W.H., Smith D.D.: Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation. *Planning Agricultural Handbook 537*, USDA, 1978, Washington D.C.
-

Adres do korespondencji.

mgr inż. Beata Jurga
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. (81) 8863432 w. 229
e-mail: bjurga@iung.pulawy.pl

W serii wydawniczej „RAPORTY PIB”, a od 2007 r. „STUDIA I RAPORTY IUNG-PIB” ukazały się następujące pozycje:

1. *Wybrane aspekty agrochemicznych badań gleby*. Puławy, 2006.
2. *Zasady wprowadzania nawozów do obrotu*. Puławy, 2006.
3. *Regionalne zróżnicowanie produkcji rolniczej w Polsce*. Puławy, 2006.
4. *Monitoring skutków środowiskowych planu rozwoju obszarów wiejskich*. Puławy, 2007.
5. *Sprawdzenie przydatności wskaźników do oceny zrównoważonego gospodarowania zasobami środowiska rolniczego w wybranych gospodarstwach, gminach i województwach*. Puławy, 2007.
6. *Możliwości rozwoju rolnictwa ekologicznego w Polsce*. Puławy, 2007.
7. *Współczesne uwarunkowania organizacji produkcji w gospodarstwach rolniczych*. Puławy, 2007.
8. *Efektywne i bezpieczne metody regulacji zachwaszczenia, nawożenia i uprawy roli*. Puławy, 2007.
9. *Wybrane elementy technologii produkcji roślinnej*. Puławy, 2007.
10. *Problem erozji gleb w procesie przemian strukturalnych na obszarach wiejskich*. Puławy, 2008.
11. *Uprawa roślin energetycznych a wykorzystanie rolniczej przestrzeni produkcyjnej w Polsce*. Puławy, 2008.
12. *Wybrane zagadnienia systemów informacji przestrzennej i obszarów problemowych rolnictwa w Polsce*. Puławy, 2008.
13. *Tworzenie postępu biologicznego w hodowli tytoniu i chmielu*. Puławy, 2008.
14. *Kierunki zmian w produkcji roślinnej w Polsce do roku 2020*. Puławy, 2009.
15. *Wybrane elementy regionalnego zróżnicowania rolnictwa w Polsce*. Puławy, 2009.
16. *Systemy wspomagania decyzji w zrównoważonej produkcji roślinnej*. Puławy, 2009.
17. *Stan i kierunki zmian w produkcji rolniczej (wybrane zagadnienia)*. Puławy, 2009.
18. *Produkcyjne i środowiskowe aspekty współczesnych metod nawożenia i regulacji zachwaszczenia*. Puławy, 2009.
19. *Oddziaływanie rolnictwa na środowisko przyrodnicze w warunkach zmian klimatu*. Puławy, 2010.
20. *Ocena zrównoważenia gospodarowania zasobami środowiska rolniczego w wybranych gospodarstwach, gminach, powiatach i województwach*. Puławy, 2010.
21. *Możliwości rozwoju obszarów problemowych rolnictwa (OPR) w świetle PROW 2007–2013*. Puławy, 2010.
22. *Możliwości rozwoju gospodarstw o różnych kierunkach produkcji rolniczej w Polsce*. Puławy, 2010.
23. *Związki fitogeniczne jako naturalna alternatywa antybiotykowych promotorów wzrostu*. Puławy, 2010.
24. *Wybrane aspekty przemian strukturalnych na obszarach wiejskich*. Puławy, 2010.
25. *Stan obecny i perspektywy nawożenia roślin w Polsce w aspekcie regulacji prawnych*. Puławy, 2010.
26. *Stan obecny i perspektywy rozwoju rolnictwa ekologicznego w Polsce*. Puławy, 2010.
- 27(1). *Środowiskowe skutki działalności rolniczej i wdrażania PROW na obszarach problemowych rolnictwa*. Puławy, 2011.

- 28(2).** *Techniki i technologie stosowane w produkcji roślinnej a środowisko przyrodnicze.* Puławy, 2012.
- 29(3).** *Problemy zrównoważonego gospodarowania w produkcji rolniczej.* Puławy, 2012.
- 30(4).** *Doskonalenie integrowanych technologii produkcji zbóż jarych i roślin pastewnych ze szczególnym uwzględnieniem początkowych elementów agrotechniki.* Puławy, 2012.
- 31(5).** *Rola badań naukowych w kształtowaniu postępu w produkcji chmielu i tytoniu.* Puławy, 2012.
- 32(6).** *Wybrane aspekty zrównoważonego rozwoju i specjalizacji gospodarstw rolniczych.* Puławy, 2013
- 33(7).** *Działalność Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa-PIB w Puławach w zakresie wspierania doradztwa i praktyki rolniczej.* Puławy, 2013.
- 34(8).** *Problemy gospodarki nawozowej w Polsce.* Puławy, 2013.
- 35(9).** *Zagrożenia dla prawidłowego funkcjonowania gleb użytkowanych rolniczo – wybrane zagadnienia.* Puławy, 2013.
- 36(10).** *Zmiany w technologiach produkcji roślinnej – oceny i wpływ na środowisko rolnicze.* Puławy, 2014.
- 37(11).** *Dobre praktyki w nawożeniu.* Puławy, 2014.
- 38(12).** *Jakość informacji w systemach wspomagania decyzji.* Puławy, 2014.
- 39(13).** *Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii pochodzenia rolniczego i ich wpływ na środowisko.* Puławy, 2014.
- 40(14).** *Wybrane problemy rolnictwa polskiego z uwzględnieniem stanu jego zrównoważenia.* Puławy, 2014.
- 41(15).** *Technologie produkcji zbóż i roślin pastewnych warunkujące wysoki plon i dobrą jakość.* Puławy, 2014.

WSKAZÓWKI DLA AUTORÓW

W serii wydawniczej „**STUDIA I RAPORTY IUNG-PIB**” publikowane są recenzowane prace z zakresu agronomii oraz ochrony i kształtowania środowiska rolniczego, wykonane w ramach zadań programów wieloletnich pn. „Kształtowanie środowiska rolniczego Polski oraz zrównoważony rozwój produkcji rolniczej” (2005-2010) oraz „Wspieranie działań w zakresie kształtowania środowiska rolniczego i zrównoważonego rozwoju produkcji rolniczej w Polsce” (2011-2015). W zeszytach problemowych o charakterze monografii, wydawanych w ramach tej serii, mogą być zamieszczane również prace autorów spoza IUNG-PIB, które merytorycznie mieszczą się w tematyce zadań programu wieloletniego. **Publikowane są prace problemowe, głównie mające charakter przeglądowy, z podkreśleniem znaczenia omawianych zagadnień dla rolnictwa polskiego.**

Wydruk tekstu do recenzji:

czcionka 12 p., z odstępem 1,5-wierszowym.

Przygotowanie do druku:

- tekst i tabele w programie Word, wersja 6.0 lub wyższa
- czcionka – Times New Roman
- układ pracy: słowa kluczowe, wstęp, wyniki i dyskusja bądź omówienie wyników, podsumowanie lub wnioski, literatura

tekst

- czcionka – 11 p. (spis pozycji literatury – 9 p.)
- wcięcie akapitowe – 0,5 cm

tabele

- podział na wiersze i kolumny (z funkcji tworzenia tabel)
- szerokość dokładnie 13 cm (tabele w pionie) lub 19 cm (tabele w poziomie)
- czcionka 9 p., pojedyncze odstępy międzywierszowe
- pod tabelą przypis ze wskazaniem źródła danych (autorstwa)

rysunki

- czarno-białe
- wykresy w programie Word lub Excel
- wymiar w zakresie 13 cm × 19 cm
- w podpisach czcionka 9 p.
- na płycie lub innym nośniku w oddzielnych plikach
- pod rysunkiem przypis ze wskazaniem źródła danych (autorstwa)

jednostki miary

- system SI
- jednostki zapisywać potęgowo (np. t·ha⁻¹)

literatura

- spis literatury na końcu pracy w układzie alfabetycznym wg nazwisk autorów, w kolejności: nazwisko (pismo rozstrzelone), pierwsza litera imienia, tytuł pracy, miejsce publikacji: tytuł wydawnictwa (wg ogólnie przyjętych skrótów tytułów czasopism), rok, numer (pismo pogrubione), strony,
- cytowanie w tekście – jako numer pozycji ze spisu literatury (w nawiasach okrągłych) lub dodatkowo z nazwiskiem autora (pismo rozstrzelone).

Pracę do recenzji należy złożyć w 1 egzemplarzu. Po recenzji oryginalny egzemplarz recenzowany złożyć/przesłać do Redakcji, a ostateczną wersję pracy, uwzględniającą uwagi recenzenta i redaktora, przesłać e-mailem.

Dane kontaktowe:

mgr Katarzyna Mikulska

Dział Upowszechniania i Wydawnictw IUNG-PIB

ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy

e-mail: kmikulska@iung.pulawy.pl

