

Beata Jurga, Piotr Ochal, Anna Podleśna

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

WYBRANE AGROCHEMICZNE WSKAŹNIKI ŻYZNOŚCI GLEBY WYKORZYSTYWANE W RACJONALNYM NAWOŻENIU*

Słowa kluczowe: graniczne zawartości siarki w glebie, dawki siarki, fosfor, stopień wysycenia fosforem, Syntetyczny Wskaźnik Żyzności Gleb

Wstęp

Na przełomie XX i XXI wieku tendencje rynkowe oraz trendy środowiskowe w rolnictwie spowodowały istotne modyfikacje w podejściu do doradztwa nawozowego w Polsce. Paradygmatem stało się dążenie do rolnictwa zrównoważonego, co wyraża się m.in. stosowaniem nawożenia opartego na bilansie składników pokarmowych, a średnia zawartość składników w glebie została uznana za optymalną ze względów środowiskowych i produkcyjnych (12). To podejście wiąże się też z koniecznością weryfikacji metod dotychczas wykorzystywanych przy oznaczaniu zasobności gleby, jak również z potrzebą włączenia do systemu doradztwa nawozowego nowych wskaźników, zorientowanych nie tylko na wytwarzanie planowanej masy plonu, ale uwzględniających również takie wartości, jak bezpieczeństwo żywności oraz ochronę jakości gleby i wód.

W poniższej pracy zostały omówione wskaźniki dotyczące wybranych pierwiastków nawozowych, których wykorzystanie usprawnia podejmowanie decyzji odnośnie kompleksowego zarządzania składnikami pokarmowymi w produkcji rolniczej.

Fosfor

Według różnych danych, ogólna zawartość fosforu w warstwie ornej gleb uprawnych waha się najczęściej od 0,01 do 0,2% i zależy od rodzaju skały macierzystej,

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.1 pt. „Nawożenie użytków rolnych” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2021 r.

stopnia jej zwietrzenia oraz zawartości materii organicznej. Z tej puli, od 25 do 50% ogólnej zawartości fosforu stanowi fosfor organiczny (39). W związku z tym wiele obszarów wymaga znaczącego nawożenia fosforem po to, by producenci rolni mogli osiągać zadowalające plony. Jednak niewłaściwe stosowanie nawozów mineralnych i naturalnych zawierających fosfor może powodować niekorzystne skutki. Składnik ten rozproszony z rolnictwa przedostaje się głównie do wód powierzchniowych, a w dalszej kolejności do Bałtyku, powodując pogorszenie stanu wód morskich. Przeciwdziałanie temu zjawisku jest zadaniem, do realizacji którego zobowiązały się wszystkie nadbałtyckie kraje UE, w tym Polska. Emisja fosforu do wód stanowi poważne zagrożenie środowiskowe związane z eutrofizacją. Fosfor w wodach stymuluje wzrost alg i glonów, które w swoich procesach metabolicznych wykorzystują tlen ze środowiska wodnego, aż do krytycznego punktu, kiedy to z powodu jego deficytu przyrost materii organicznej ustaje i następuje jej rozkład. W wyniku tego procesu ma miejsce dalsze zużycie tlenu, co skutkuje utratą bioróżnorodności, degradacją ekosystemów i pogorszeniem warunków życia ryb i innych zwierząt wodnych, włącznie z możliwością ich uduszenia. Dodatkowo podczas rozkładu materii organicznej powstają odory zmniejszające wartość rekreacyjną i ekonomiczną środowiska wodnego oraz szkodliwe toksyny, których obecność może spowodować, że zbiornik wodny nie będzie nadawał się do kąpieli oraz do zaopatrywania ludności w wodę pitną, stwarzając również (jeśli zakwit sinic nie zostanie odpowiednio wcześniej zauważony) zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi oraz zwierząt gospodarskich.

Aby nawożenie fosforem było efektywne i bezpieczne dla środowiska, niezbędne jest właściwe nim zarządzanie. Pierwszym krokiem tych działań jest dokładne rozpoznanie stanu gleby, do czego służą testy glebowe. Wyniki agrochemicznych badań gleb mogą być przedstawiane w wartościach bezwzględnych oraz w postaci jakościowej, tj. oceny testów glebowych (12). Wskaźniki agrochemiczne informujące o zasobności gleb w fosfor są podstawowym narzędziem umożliwiającym zrównoważoną gospodarkę tym składnikiem pokarmowym i to już na poziomie pojedynczego pola produkcyjnego czy gospodarstwa (15). Jako narzędzie wspomagania decyzji IUNG-PIB w Puławach, wspólnie m.in. z Krajową Stacją Chemiczno-Rolniczą (KSChR) oraz Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie (CDR), opracował i udostępnia zalecenia nawozowe. W krajowym systemie doradztwa rolniczego od wielu lat stosuje się ocenę zawartości fosforu w glebach, bazując na wynikach uzyskanych metodą Egnera-Riehma według standardowej procedury oznaczania (34). Do oceny zasobności fosforu stosuje się skalę 5-stopniową (zawartość bardzo niska, niska, średnia, wysoka i bardzo wysoka). Ocena zasobności gleby umożliwia stworzenie długofalowego planu gospodarowania składnikami pokarmowymi na polu. Jak podają Jadczyzyn i in. (12), bardzo niska i niska zawartość P wskazuje na potrzebę intensywnego nawożenia, które zabezpieczy potrzeby pokarmowe roślin i odbuduje zasobność gleby (tab. 1). Na glebach o zawartości średniej nawożenie powinno bilansować ilość fosforu pobranego z gleby przez rośliny. W warunkach zawartości wysokiej i bardzo wysokiej nawożenie należy ograniczyć, ponieważ rośliny mogą korzystać z glebowych rezerw składników.

Tabela 1

Ocena zasobności gleb w przyswajalny fosfor

Klasa zawartości	Zawartość przyswajalnego fosforu w mg P (P ₂ O ₅) na 100 g gleby	
	mineralnej	organiczej
Bardzo niska	do 5,0 (do 2,2)	do 40 (do 17,7)
Niska	5,1–10,0 (2,3–4,4)	41–60 (17,8–26,5)
Średnia	10,1–15,0 (4,5–6,5)	61–80 (26,6–35,2)
Wysoka	15,1–20,0 (6,6–8,8)	81–120 (35,3–52,6)
Bardzo wysoka	od 20,1 (od 8,9)	od 121 (od 52,7)

Źródło: Jadczyzyn i in., 2010 (12)

Pomimo funkcjonowania oficjalnych zaleceń nawozowych wdrożonych przez system doradztwa nawozowego w takich instytucjach, jak KSchR czy CDR, wciąż prowadzone są prace nad alternatywnymi metodami oznaczeń zawartości fosforu w glebie.

Metoda Mehlich 3

W Instytucie Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach od wielu lat kontynuowane są badania nad wdrożeniem do systemu rutynowych oznaczeń agrochemicznych metody Mehlich 3 (26). Jest to procedura jednoczesnego oznaczania, w tym samym wyciągu glebowym, zawartości w glebie wielu makro- i mikroelementów, tj. fosforu (tab. 2), potasu, wapnia, sodu, magnezu, żelaza, manganu, miedzi, cynku, boru i siarki (16). Uniwersalny roztwór ekstrahujący (pH 2,5±0,01) jest przeznaczony do oznaczeń próbek gleb o odczynie kwaśnym i obojętnym (48), które stanowią większość gleb wykorzystywanych rolniczo w Polsce (32). W skład roztworu ekstrahującego wchodzi fluorek amonu (roztwór 0,015 M), kwas octowy (0,2 M), azotan amonu (0,25 M), kwas azotowy (0,013 M) oraz EDTA (0,001 M). Ekstrakcja fosforu zachodzi w wyniku działania związków fluoru i kwasu octowego. Ekstrahent jest następnie poddawany analizie ilościowej metodą kolorymetryczną lub metodą emisyjnej spektrometrii ze wzbudzeniem w plazmie sprzężonej indukcyjnie (ICP) (15). Na podstawie różnych doniesień oczekiwano również mniejszych kosztów wykonywania oznaczeń chemicznych, co potwierdziły prace Fo t y m y i in. (9). Jednym z argumentów przemawiających za sprawdzeniem tej metody w Polsce był fakt, że w sąsiednich krajach, o zbliżonych warunkach agrochemicznych, tj. Estonia, Czechy czy Słowacja, metoda Mehlich 3 została już wcześniej przetestowana i wdrożona do systemu doradztwa nawozowego. Ponadto, jak zauważa Kęs i k (16), istnieje praktyczna potrzeba, aby w krajach Europy wykorzystywane były porównywalne metody analityki glebowej. Krajowe procedury analityczne, w tym zwłaszcza ekstrakcji P według metody Egnera-Riehma, powodują wiele trudności wynikających ze specyfiki wykorzystywanych odczynników. Dotyczy to głównie mleczanu wapnia, który jest

stosowany w tej metodzie, a łatwo ulega biologicznemu rozkładowi. Dodatkowo jest to odczynnik wytwarzany w Polsce niemal wyłącznie na potrzeby krajowego systemu doradztwa, a z powodu małej skali produkcji jej koszty są wysokie.

Tabela 2

Liczby graniczne zawartości form przyswajalnych fosforu wyznaczone dla metody Mehlicha 3

Odczyn/Kategoria agronomiczna gleby	Klasa zasobności gleb				
	bardzo niska	niska	średnia	wysoka	bardzo wysoka
Zawartość przyswajalnego fosforu wg metody Mehlicha (mg·kg ⁻¹ gleby)					
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: Kęsik i in., 2014 (14)

Stopień wysycenia gleb fosforem (P_{sat})

Wartością dodaną jednoczesnego oznaczania w wyciągu Mehlicha 3 m.in. zawartości fosforu (P), żelaza (Fe) i glinu (Al) jest możliwość wyznaczania wskaźnika stopnia wysycenia gleb fosforem – P_{sat}. Wskaźnik ten opiera się na koncepcji (potwierdzonej przez dane empiryczne), według której wysycenie fosforem gleb kwaśnych i obojętnych jest determinowane głównie przez wiązanie fosforu z tlenkami żelaza i glinu (33). Aby wyznaczyć wskaźnik P_{sat}, należy zawartości P, Al, Fe wyrażone w mg·kg⁻¹ gleby podzielić przez wartości wskazane w tabeli 3 i podstawić do wzoru opracowanego przez Kęsika i in. (14):

$$P_{sat} = \frac{P}{(Al + Fe)}$$

gdzie:

P_{sat} – stopień wysycenia gleb fosforem oznaczany metodą Mehlich 3,

P, Al, Fe – zawartość P, Al i Fe oznaczona metodą Mehlich 3, wyrażona w milirównoważnikach.

Tabela 3

Wartość liczbowa milirównoważników glinu, żelaza i fosforu

Wartość liczbowa milirównoważników	Fe	Al	P
	55,85	26,98	30,97

Źródło: Kęsik i in., 2014 (14)

Wykorzystanie metody Mehlich 3 w Polsce do wyznaczania Psat jest działaniem nowatorskim, a możliwym dzięki niedawnej kalibracji tej metody dla gleb naszego kraju (14). Wskaźnik Psat informuje o ryzyku wystąpienia znaczących strat fosforu z gleby do środowiska (15). Zakłada się, że w miarę wzrostu stopnia wysycenia gleb fosforem będzie on słabiej zatrzymywany przez glebę oraz że pula rozpuszczalnego P będzie wzrastać. Gleby z wyższymi wartościami Psat będą wykazywały większe ryzyko utraty P do wód zarówno ze względu na to, że będą zawierać wyższe stężenia P w roztworze glebowym, jak i dlatego, że wszelkie erodowane cząstki gleby będą silniej wzbogacone łatwo desorbowanym P. Należy więc uznać, że przekroczenie pojemności gleby względem fosforu niesie poważne ryzyko zanieczyszczenia lądowych i morskich ekosystemów wodnych. Kluczowe pozostaje ustalenie granicznych wartości Psat dla różnych gleb, warunków fizjograficznych oraz (ewentualnie) drenarskich. Istnieje wiele badań autorów obcojęzycznych wiążących wartość Psat z ryzykiem strat fosforu do wód. Według Pautlera i Simsa (33), wartości Psat wynoszące od 25 do 40% są skorelowane z większym ryzykiem utraty P podczas wymywania gleby lub spływu. Breeus w ma i in. (2) stwierdzili w swoich badaniach, że wartości DPS na poziomie 25% w profilu glebowym w warunkach średniego i wysokiego zwierciadła wody przyczyniłyby się do zanieczyszczenia płytkich wód gruntowych w Holandii.

Badając stopień wysycenia gleb fosforem, pobrano w Belgii 296 próbek gleby i uzyskano średnie wartości Psat: 57; 22 i 11%, odpowiednio dla poziomów glebowych: 0–30, 30–60 i 60–90 cm (3). Jako graniczną wartość Psat służącą do ochrony płytkich wód gruntowych, mierzoną dla głębokości od 0 do 90 cm, zaproponowano próg Psat = 30%. Pote i in. (40) wykazali, że obserwowane wartości fosforu rozpuszczonego reaktywnego w spływie z trzech czerwonoziemów w Arkansas wzrastały przy wartościach DPS od 20 do 30%.

W Zakładzie Żywienia Roślin i Nawożenia IUNG-PIB w Puławach, we współpracy z Krajową Stacją Chemiczno-Rolniczą, podjęto próbę weryfikacji tych wartości w warunkach Polski. Po przebadaniu 8539 próbek gleby Kęsik (16) stwierdził, że przeciętna wartość Psat dla gleb w kraju kształtuje się na poziomie 18,1%. Wyniki te potwierdzają niepublikowane badania Jurgi, która badając zbiór ponad 1000 próbek glebowych z wszystkich województw w kraju ($n = 1023$) uzyskała średnią wartość Psat = 19%, przy medianie wynoszącej 14,1%. Z badań Kęsika (16) wynika ponadto, że przekroczenie poziomu Psat = 25% (niezależnie od kategorii agronomicznej i zakresu pH gleby) należy uznać za nieuzasadnione z punktu widzenia potrzeb nawożenia roślin, a także ze względu na ryzyko środowiskowe.

Powyższe doniesienia i argumenty jasno wskazują na zasadność włączenia w krajowy system doradztwa nawozowego zarówno metody Mehlich 3, jak i wskaźnika Psat. Zaprezentowane metody badawcze mogą posłużyć jako narzędzia służące identyfikacji w Polsce obszarów szczególnie narażonych na straty fosforu z użytków rolnych.

Siarka

Siarka należy do składników niezbędnych w racjonalnym nawożeniu roślin uprawnych. Jednak w latach 80. XX wieku zanieczyszczenie atmosfery związkami emitowanymi przez zakłady przemysłowe, kotłownie i transport osiągnęło w Polsce największe wartości. W roku 1980 ładunek tego składnika na hektar gruntów rolnych wynosił 132 kg SO₂, czyli 66 kg S, bez względu na uprawianą roślinę i jej potrzeby żywieniowe. Siarka dostająca się z atmosfery do wód i gleb w formie suchych i mokrych opadów stanowiła ogromne zagrożenie dla ekosystemów głównie ze względu na zakwaszenie (tzw. kwaśne deszcze). Takie warunki były szkodliwe dla wzrostu roślin oraz wielkości i jakości plonu (41). W związku z tym, aż do końca lat 90. XX wieku uważano, że jest to składnik występujący w środowisku w nadmiarze (28) i nie uwzględniano go w planie nawożenia roślin. W efekcie światowych dążeń do ograniczenia zanieczyszczenia środowiska gazowymi związkami siarki i nowej polityki ekologicznej Polski (11, 45) uzyskano znaczną redukcję jej związków dostających się do atmosfery, wód i gleb (37). To wpłynęło na zubożenie rezerw glebowych tego składnika i w kolejnych latach doprowadziło do jego niedoborów w wielu rejonach Polski i świata. Rozległe badania prowadzone w 2003 roku wykazały, że bilans siarki dla głównych roślin uprawnych Polski był ujemny (42).

W większości gleb uprawnych główną pulę siarki stanowi forma organiczna w ilości przekraczającej 90% jej całkowitej zawartości w glebie. Pozostała ilość siarki glebowej to forma siarczanowa pochodząca ze stosowanych nawozów mineralnych oraz materii organicznej podlegającej procesom mineralizacji. Z tej formy korzystają rośliny, które mają zdolność bezpośredniego i sprawnego pobierania jej z gleby. Jednakże ilości siarki dostępnej, stwierdzane od kilkunastu lat w glebach uprawnych naszego kraju, nie pokrywają zapotrzebowania roślin na ten składnik. Tymczasem jego rola w kształtowaniu żyzności gleb oraz wzrostu i rozwoju roślin uprawnych jest niepodważalna i niemożliwa do zastąpienia przez inny składnik. Właściwe zaopatrzenie roślin w siarkę powoduje wzrost plonu roślin i jego jakości, co odnotowano m.in. w przypadku zbóż (22), rzepaku (35), kukurydzy (23), grochu (47) oraz ziemniaka (17) i traw (13). Ponadto jej niedobór przekłada się na zmniejszenie efektywności wykorzystania azotu i innych składników przez rośliny (36, 38). Ta sytuacja powoduje, że stwierdzone braki siarki należy uzupełniać poprzez nawożenie mineralne. Jest to szczególnie ważne, ponieważ jej wykorzystanie z nawozów kształtuje się na poziomie oscylującym wokół 50%, więc zastosowanie odpowiedniego nawożenia jest gwarancją optymalnego zaopatrzenia roślin uprawnych w ten składnik. Jednak ustalenie właściwej dawki siarki nie jest proste, bowiem efektywne zastosowanie nawozu wymaga, aby siarka była obecna w glebie w dostępnej formie i na poziomie, który zapewni zaopatrzenie roślin od początkowego okresu wzrostu do dojrzałości (44). W rolnictwie zrównoważonym obowiązuje zasada, że pomiędzy wnoszeniem, wynoszeniem z plonami i innymi stratami składników musi być zachowana przynajmniej równowaga. Natomiast deficyt należy korygować przez zmiany w zarządzaniu składnikiem

i/lub jego formą. W praktyce można skorzystać z opracowanych wskaźników roślinnych opartych na analizach zawartości siarki w organach wskaźnikowych, pobranych w fazach krytycznych, poszczególnych gatunków roślin i obserwacji pojawiających się wizualnych objawów niedoboru tego składnika. Drugą możliwością jest przeprowadzenie analiz reprezentatywnych próbek glebowych i na podstawie przyjętej skali oszacowanie potrzeb nawozowych uprawianych roślin.

Wskaźniki brane pod uwagę przy ustalaniu dawek siarki

Graniczne zawartości siarki w glebie

W warunkach glebowo-klimatycznych Polski zawartość siarki w glebach mineralnych, nie podlegających większej antropopresji, nie przekracza na ogół wartości $200 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (27). Z kolei gleby mineralno-organiczne i organiczne zawierają jej ponad dwukrotnie więcej niż mineralne, ale naturalna zawartość siarki na ogół nie przekracza $450 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$. Na podstawie badań ustalono, że zawartość siarki siarczanowej w glebach mineralnych waha się od $<1,0$ do $5,0 \text{ mg}$, a w glebach organicznych osiąga $15,0 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (28). W latach 90. XX wieku dane te zostały wykorzystane do opracowania granicznych zawartości siarki siarczanowej i siarki ogółem w związku z potrzebą szacowania skali skażenia gleb i roślin siarką. Do tego celu wzięto pod uwagę zawartość obu form tego pierwiastka, występujących w wierzchniej warstwie gleb mineralnych, o różnym składzie granulometrycznym i gleb organicznych, o różnej procentowej zawartości materii organicznej (27). Na podstawie podziału przyjętego według powyższych kryteriów wyróżniono 5 grup gleb: A, B, C, D i E (tab. 4). Stężenie wspomnianych form siarki (w $\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ gleby) dla poszczególnych stopni zawartości tego składnika jest podane według metodyki obowiązującej w tym czasie w stacjach chemiczno-rolniczych. Natomiast dla wyceny tych gleb pod względem występowania siarki wyróżniono 4 stopnie zawartości dwu jej form, tj. S-ogółem i S-SO₄. Stopnie I, II i III określają naturalną zawartość obu form tego składnika w różnych glebach, a jako stopień IV przyjmuje się zawartość podwyższoną w efekcie antropopresji. Należy zaznaczyć, iż IV stopień zawartości siarki siarczanowej (S-SO₄) w glebach informuje głównie o aktualnym ich pozostawianiu pod wpływem oddziaływania podwyższonej lub wysokiej immisji ze źródeł lokalnych albo też z dalekiego transportu SO₂. Natomiast IV stopień ogólnej zawartości S wskazuje poziom ich aktualnego i dawnego zasiarczenia. Zawartość zakwalifikowana jako stopień IV może być wielokrotnie wyższa od wartości granicznych dla poszczególnych gleb, ponieważ zależy od wielkości zagrożenia emisją związków siarki ze źródeł pochodzących z działalności człowieka.

Te same kryteria przyjmuje się stale dla określenia zawartości siarki w poszczególnych glebach uprawnych w Polsce, co służy zarówno do oceny potrzeb nawożenia tym składnikiem, jak i do monitorowania zmian zasobności w siarkę gleb w kraju na przestrzeni wielu lat (41).

Tabela 4

Graniczne zawartości siarki ($\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ gleby) w powierzchniowej warstwie gleb (0–20 cm)

Symbol grupy	Grupa gleb	Stopień zawartości							
		S-SO ₄				S-ogółem			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV
A	Gleby lekkie (0–20% frakcji <0,02mm)	≤1,5	1,6–2,5	2,6–3,5	>3,5	≤15,0	16,0–50,0	51,0–100,0	>100,0
B	Gleby średnie (21–35% frakcji <0,2 mm)	≤2,0	2,1–3,0	3,1–4,0	>4,0	≤20,0	21,0–75,0	76,0–150,0	>150,0
C	Gleby ciężkie 35% frakcji <0,02mm)	≤2,5	2,6–3,5	3,6–5,0	>5,0	≤25,0	26,0–100,0	101,0–200,0	>200,0
D	Gleby mineralno-organiczne (10–20% materii organicznej)	≤3,0	3,1–5,0	5,1–10,0	>10,0	≤50,0	51,0–100,0	101,0–250,0	>250,0
E	Gleby organiczne (>20% materii organicznej)	≤5,0	5,1–10,0	10,1–15,0	>15,0	≤100,0	101,0–250,0	251,0–450,0	>450,0

Stopień zawartości: I – zawartość niska
 II – zawartość średnia
 III – zawartość wysoka
 IV – zawartość podwyższona wskutek antropopresji

Źródło: Motowicka -Terelek i in., 1993 (27)

Liczby graniczne zawartości siarki siarczanowej w glebach mineralnych oraz dawki siarki dla wybranych gatunków i grup roślin

Jako źródło siarki dla roślin najbardziej aktywną formą jest siarka siarczanowa. Na podstawie wyników zawartości S-SO₄ w glebach mineralnych użytków rolnych pobieranych z warstwy 0–20 cm oraz zawartości siarki w próbkach roślinnych pobieranych z tych samych punktów przedstawiono próbę określenia potrzeb nawozowych względem siarki podstawowych roślin uprawnych (25). Do badań wytypowane zostały punkty, w których uprawiano rośliny mające największy udział w strukturze zasiewów, tj. zboża, buraki, ziemniak, rzepak, kukurydza i siano łąkowe oraz zróżnicowane zapotrzebowanie na siarkę. Założono, że podstawą do określenia ilości siarki siarczanowej dostępnej dla roślin w okresie wegetacji będzie jej zawartość w glebie. Zestawienie zawartości S-SO₄ w glebach oraz zapotrzebowania roślin na ten składnik, tj. jej pobrania z plonem, było podstawą wyznaczenia granicznych zawartości zasobności gleb w tę formę siarki (tab. 5). Dzięki temu wyróżniono gleby, które nie zapewniają roślinom właściwego zaopatrzenia w ten składnik (zasobność bardzo niska i niska), wymagają uzupełnienia jego ilości w glebie (zasobność średnia) oraz te, które są w stanie dostarczyć roślinie potrzebnej ilości S (zasobność wysoka i bardzo wysoka).

Tabela 5

Proponowane liczby graniczne zawartości siarki siarczanowej w glebach mineralnych oraz dawki siarki dla wybranych gatunków i grup roślin

Gatunki i grupy roślin	Dawka siarki (kg·ha ⁻¹) zależnie od zasobności gleb w siarkę (mg S-SO ₄ ·kg ⁻¹ gleby)*				
	bardzo niska <5,0	niska 5,1–10,0	średnia 10,1–15,0	wysoka 15,1–20,0	bardzo wysoka >20,0
Zboża, tytoń	20	15	10	-	-
Siano z UZ i roślin bobowatych	30	20	15	-	-
Ziemniak	60	50	40	30	-
Kukurydza	80	60	55	50	40
Rzepak	100	90	70	60	50
Burak cukrowy	150	130	110	100	80

*Współczynnik bilansowy przyjęty do obliczeń założono na poziomie 40%. Z dawką 25 lub 40 t·ha⁻¹ wprowadza się odpowiednio: 12,5 lub 20 kg S·ha⁻¹. Przy stosowaniu nawozów naturalnych, organicznych lub osadów ściekowych dawkę siarki podaną w tabeli należy zmniejszyć o jej ilość wprowadzoną w tych nawozach.

Źródło: Lipiński i in., 2003 (25)

Siarka w związkach organicznych gleby

Ponieważ główna masa siarki obecnej w glebach uprawnych występuje w formie związków organicznych, należy je uwzględniać jako ważne źródło siarki dla roślin.

Związki te ulegają w glebie procesom rozkładu i ponownej resyntezie (18). Przyjmuje się, że uwalnianie do gleby siarki w wyniku mineralizacji związków organicznych zachodzi wówczas, gdy stosunek C:S w substancji rozkładanej przez drobnoustroje jest mniejszy od 200. Jeśli stosunek C:S wynosi powyżej 400:1, to w glebie następuje przewaga procesów immobilizacji siarki, co prowadzi do jej związania w materii organicznej. Wówczas jest ona niedostępna dla roślin i trzeba zastosować nawożenie mineralne (44).

Brak dobrej korelacji pomiędzy testami glebowymi i reakcją roślin doprowadził do rozpatrywania stosunku N:S w glebach jako wskaźnika świadczącego o możliwości dostarczenia siarki roślinom (19). Podejście to opiera się na założeniu, że siarka całkowita jest wysoko skorelowana z węglem organicznym i azotem ogólnym. Stosunek N:S w glebach wynosi w granicach 6,7–11,1:1. Sugeruje się jednak, że gleby charakteryzujące się wysoką wartością tego stosunku mogą być podatne na deficyt siarki.

W poszukiwaniu wskaźnika opisującego możliwość uwalniania siarki z substancji organicznej gleby uwzględnia się również stosunek C:N:S, który wynosi średnio 140:10:1 (7), choć Brady i Weil (1) uważają, że w glebach mineralnych powinien wynosić 100:8:1.

Syntetyczny Wskaźnik Żyzności Gleb (SWŻG)

Żyzność gleby jest to jej zdolność do zaopatrywania roślin w składniki mineralne oraz wodę (8, 10). W glebie wyróżnić można fazy: stałą, ciekłą i gazową oraz fazę biologicznie czynną, w skład której wchodzi korzenie roślin (21). Z uwagi na złożoność procesów składających się na żyzność gleby i odmienne podejście metodyczne często, jakkolwiek umownie, wydziela się żyzność biologiczną, chemiczną i fizyczną.

Obecnie do oceny stanu agrochemicznego gleb w Polsce wykorzystuje się pojedyncze wskaźniki, tj. odczyn oraz zawartość przyswajalnych form fosforu, potasu i magnezu. Wyniki badań agrochemicznych są wykorzystywane do oceny stanu zasobności gleb w jednostkach administracyjnych i w skali całego kraju (24). Dotychczasowe zestawienia wykonywane są w układzie skategoryzowanym z wydzieleniem udziału próbek zaliczanych do jednej z przyjętych w Polsce kategorii (klasy) odczynu i zawartości poszczególnych składników mineralnych.

W poszczególnych dyscyplinach nauk rolniczych dąży się do opracowania syntetycznych wskaźników produktywności i żyzności gleb, obejmujących możliwie szeroki zakres parametrów szczegółowych. Do wskaźników tych można zaliczyć wskaźnik waloryzacji rolniczej przestrzeni produkcyjnej (WRPP) (46), wskaźnik jakości fizycznej gleby (S) (4, 5, 6) oraz wskaźnik jakości biologicznej (20, 29). Jeśli chodzi o wskaźniki agrochemicznej żyzności gleby, to każdy z parametrów był do niedawna traktowany oddzielnie, a jedynym wskaźnikiem dla cech pojedynczych był tzw. wskaźnik bonitacji negatywnej (lub niekiedy pozytywnej) Riehma (30). Wskaźnik ten określa procentowy udział gleb wykazujących bardzo niską i niską oraz połowę

udziału gleb wykazujących średnią zawartość danego składnika. W roku 2012 Ochał (31) wyznaczył Syntetyczny Wskaźnik Żyzności Gleb (SWŻG), który służy do oceny stanu agrochemicznej żyzności gleb w Polsce.

SWŻG został wyznaczony metodą analizy czynnikowej, a do jego opracowania wykorzystano dane okręgowych stacji chemiczno-rolniczych opisujące aktualny stan odczynu oraz zawartości w glebie przyswajalnego fosforu, potasu i magnezu (dane z lat 2005–2008), a więc parametry, które są powszechnie analizowane przez producentów rolnych w kraju. Szczegółowy sposób wyznaczenia tego wskaźnika przedstawiono w pracy Ochała (31).

Wartość syntetycznego wskaźnika żyzności gleby opisuje równanie:

$$\text{SWŻG} = 0,548551X_1 + 0,607943X_2 + 0,575494X_3 + 0,341891X_4$$

W równaniu kolejne zmienne X_1 , X_2 , X_3 i X_4 są standaryzowanymi wartościami odpowiednio dla pH, P_2O_5 , K_2O i Mg, obliczonymi przez odjęcie od każdej obserwacji wartości średniej cechy i podzielenie jej przez odchylenie standardowe. Po przeliczeniu na wartości w jednostkach rzeczywistych równanie przyjmuje postać:

$$\text{SWŻG} = -5,0313 + 0,5160\text{pH} + 0,0648P_2O_5 + 0,0655K_2O + 0,0803\text{Mg}$$

Wstawiając do ostatniego równania rzeczywiste wartości zmiennych, można dla każdej próbki gleby obliczyć syntetyczny wskaźnik jej żyzności.

Aby zachować jednolite podejście przyjęte w Polsce dla ilościowych cech agrochemicznych gleby, wyznaczono 5 klas jej żyzności. Klasy żyzności wyznaczono, dzieląc wartości wskaźnika na 5 fraktyli zawierających po 20% wyników (tab. 6). Kolejne pentyle określono jako żyzność bardzo niską, niską, średnią, wysoką i bardzo wysoką.

Tabela 6

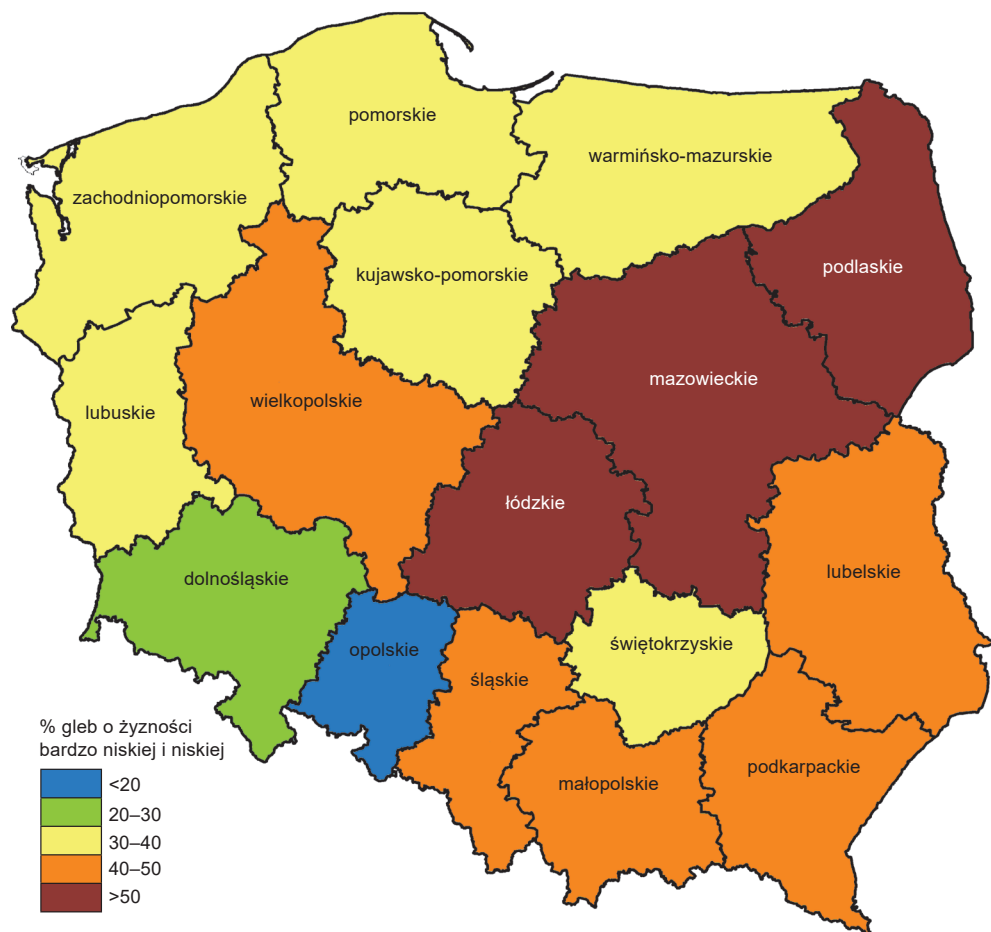
Przedziały klas żyzności

Klasa żyzności	Żyzność gleby	SWŻG
1	b. niska	$\leq -1,29$
2	niska	$-1,29 - 0,50$
3	średnia	$-0,50 - 0,25$
4	wysoka	$0,25 - 1,16$
5	b. wysoka	$\geq 1,16$

Źródło: Ochał, 2012 (31)

Na podstawie SWŻG i wyznaczonych klas żyzności oszacowano dla poszczególnych województw procentowy udział próbek gleb o bardzo niskiej i niskiej żyzności. Najwięcej gleb o żyzności bardzo niskiej i niskiej stwierdzono w województwach: łódzkim, podlaskim i mazowieckim, które wynosiły odpowiednio: 60; 58 i 55%.

Najmniejszy udział przebadanych próbek gleb w klasach żyzności bardzo niskiej i niskiej stwierdzono w województwach opolskim i dolnośląskim, który wynosił odpowiednio: 19 i 27% (rys. 1).



Rys.1. Procentowy udział gleb o bardzo niskiej i niskiej żyzności wyznaczonych dla danych OSCHR z lat 2005–2008

Źródło: Ochal, 2012 (31)

Opracowany wskaźnik żyzności gleb może być wykorzystywany do różnego rodzaju opracowań na wielu szczeblach administracyjnych, między innymi do oceny wykorzystania rolniczej przestrzeni produkcyjnej.

Podsumowanie

Racjonalne nawożenie powinno uwzględniać dostarczenie roślinom uprawnym składników pokarmowych niezbędnych dla ich wzrostu i rozwoju, w dawkach umożliwiających osiągnięcie zakładanego plonu. Jednocześnie nawożenie powinno utrzymać lub zwiększyć żyzność gleby w zakresie obejmującym minimalne obciążenie gleb uprawnych oraz wód powierzchniowych i podziemnych. Planując nawożenie, zwykle uwzględnia się potrzeby żywieniowe rośliny i oczekiwany plon, a w okresie wegetacji – analizy części wskaźnikowych roślin i ich ocenę wizualną. Jednak właściwe dobranie dawki składnika jest często działaniem trudnym, które w pierwszym etapie, obejmującym zabiegi przed siewem nasion, powinno być wspierane przez kompleksowe analizy gleby. Ich wyniki należy oceniać, opierając się na przyjętych zakresach zawartości składnika/ów w glebie lub relacjach pomiędzy nimi. W pracy przedstawiono stosowane obecnie zasady postępowania w ocenie żyzności gleb, a także w ustalaniu potrzeb oraz dawek nawożenia fosforem i siarką.

Literatura

1. Brady N.C., Weil R.R.: The nature and properties of soils. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 13th edition, 2002, pp. 960.
2. Breuwsma A., Reijerink J.G.A., Schoumans O.F.: Impact of manure on accumulation and leaching of phosphate in areas of intensive livestock farming. In: Animal waste and the land-water interface, K. Steele (ed.). Lewis Publ.-CRC Press, New York., 1995, pp. 239-249.
3. Desmet J., Hofman G., Vanderdeelen J., Van Meirvenne M., Baert L.: Phosphate enrichment in the sandy loam soils of West-Flanders. Fertilizer Research, 1996, **43(1-3)**: 209-215. (Presented at the International Symposium on Fertilizers and the Environment)
4. Dexter A.R.: Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density. And organic matter, and effects on root growth. Geoderma, 2004a, **120**: 201-214.
5. Dexter A.R.: Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tith and hard-setting. Geoderma, 2004b, **120**: 215-225.
6. Dexter A.R.: Soil physical quality Part III: Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. Geoderma, 2004c, **120**: 227-239.
7. Fageria N.K.: The use of nutrients in crop plants. 7. Sulfur. Taylor & Francis Group, CRC Press, Boca Raton, USA, 2009, p. 215-240.
8. Fotyma M., Mercik S.: Chemia rolna. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1995, ss. 356.
9. Fotyma M., Kęsik K., Lipiński W., Filipiak K., Purchała L.: Testy glebowe jako podstawa doradztwa nawozowego. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2015, **42(16)**: 9-51.
10. Grzebisz W.: Nawożenie roślin ogrodniczych. PWRiL Poznań, 2008, ss. 428.
11. Iskrycki K., Suwała W., Kaszyński P.: Dekompozycja redukcji dwutlenku siarki w polskich elektrowniach, 1995–2008. Polityka Energetyczna, 2011, **14(2)**: 107-125.
12. Jadczyzyn T., Kowalczyk J., Lipiński W.: Zalecenia nawozowe dla roślin uprawy polowej i trwałych użytków zielonych. Materiały Szkoleniowe. Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach, 2010, **95**: 3.
13. Kaczora, Zuzańska J.: Efektywność nawożenia siarką kupkówki pospolitej w warunkach zróżnicowanego zaopatrzenia roślin w azot. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 2010, **556**: 134-142.

14. Kęsik K., Lipiński W., Jadczyżyszyn T., Boreczek B., Janda B., Sumorek-Gołabek A., Kocoń A., Ochal P., Pikuła D., Bochniarz A.: Liczby graniczne oraz procedura badawcza oznaczania metodą Mehlicha 3 ruchomych form fosforu, potasu i magnezu w glebach mineralnych. Instrukcja wdrożeniowa nr 230, IUNG-PIB Puławy, 2014, ss. 26.
15. Kęsik K., Jadczyżyszyn T., Lipiński W., Jurga B.: Adaptacja testu Mehlicha 3 do rutynowych oznaczeń zawartości fosforu, potasu i magnezu w glebie. *Przemysł Chemiczny*, 2015, **94(6)**: 973-976.
16. Kęsik K.: Zastosowanie metody Mehlich 3 w systemie doradztwa nawozowego. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2016, **48(2)**: 95-104.
17. Klinkocka H.: Nawożenie ziemniaka siarką. *Fragmenta Agronomica* 2004, **3(83)**: 80-94.
18. Klinkocka H.: Sulphur status in environment. *Journal of Elementology*, 2005, **10(3)**: 625-643.
19. Kovar J.L., Grant C.A.: Nutrient cycling in soils: sulfur. <https://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub/1383><https://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub/1383>
20. Kucharski J.: Relacje między aktywnością enzymów a żyznością gleby. W: *Drobnoustroje w środowisku, występowanie, aktywność i znaczenie*, W. Barabasz (red.). AR Kraków, 1997, ss. 327-347.
21. Łabętowicz J.: Współczesne poglądy na żyzność i metody testowania gleb. *Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization*, 2000, **3a**: 106-130.
22. Lepiarczyk A., Filipek-Mazur B.: Wpływ nawożenia siarką na plonowanie i skład elementarny ziarna pszenicy ozimej. Cz. I. Wielkość i komponenty plonu ziarna pszenicy ozimej. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 2010, **556**: 157-163.
23. Lepiarczyk A., Filipek-Mazur B., Joniec B., Tabak M.: Wpływ nawożenia azotem i siarką na plonowanie i skład chemiczny ziarna kukurydzy. Cz. I. Wielkość i komponenty plonu ziarna kukurydzy. *Fragmenta Agronomica*, 2013, **30(3)**: 115-122.
24. Lipiński W.: Pięćdziesiąt lat działalności stacji chemiczno-rolniczych w Polsce. *Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization*, 2005, **23**: 7-25.
25. Lipiński W., Terelak H., Motowicka-Terelak T.: Propozycja liczb granicznych zawartości siarki siarczanowej w glebach mineralnych na potrzeby doradztwa nawozowego. *Roczniki Gleboznawcze*, 2003, **LIV(3)**: 79-84.
26. Mehlich A.: Mehlich 3 soil test extractant: a modification of Mehlich 2 extractant. *Commun. Soil Science and Plant Analysis*, 1984, **15**: 1409-1416.
27. Motowicka-Terelak T., Terelak H., Witek T.: Liczby graniczne do wyceny zawartości siarki w glebach i roślinach. W: *Ocena stopnia zanieczyszczenia gleb i roślin metalami ciężkimi i siarką. Ramowe wytyczne dla rolnictwa*, A. Kabata-Pendias, T. Motowicka-Terelak, M. Piotrowska i in. (red.). IUNG Puławy, 1993, **P(53)**: 15-19.
28. Motowicka-Terelak T., Terelak H.: Siarka w glebach Polski – Stan i zagrożenie. *PIOŚ, Biblioteka Monitoringu Środowiska*, Warszawa, 1998, ss. 106.
29. Myśków W., Zięba S.: Aktywność biologiczna gleby w aspekcie jej żyzności i urodzajności. *Biuletyn informacyjny IUNG*, 1997, I/II kwartał, **5**: 24-26.
30. Bojski J., Strączyński S.: Odczyn i zasobność gleb Polski w makro i mikroelementy. *IUNG Puławy*, 1995, ss. 40.
31. Ochal P.: Wykorzystanie syntetycznego wskaźnika do oceny stanu agrochemicznego gleb w Polsce. Praca doktorska (maszynopis), IUNG-PIB Puławy, 2012, ss. 108.
32. Ochal P.: Wąpnowanie podstawowym elementem dobrych praktyk rolniczych. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2014, **37(11)**: 9-18.
33. Pautler M., Sims J.T.: Relationships between soil test phosphorus, soluble phosphorus, and phosphorus saturation in delaware soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64(2)**: 765-773, <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642765x>
34. PN-R-04023:1996: Analiza chemiczno-rolnicza gleby, Oznaczanie zawartości przyswajalnego fosforu w glebach mineralnych, ss. 4.
35. Podleśna A.: Wstępna ocena potrzeb nawożenia siarką rzepaku ozimego. *Rośliny Oleiste*, 2003, **XXIV**: 641-649.
36. Podleśna A.: Wpływ deficytu siarki na gospodarkę składnikami pokarmowymi pszenicy ozimej. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 2010, **545**: 237-243.

-
37. Podleśna A.: Studia nad rolą siarki w kształtowaniu gospodarki mineralnej oraz wielkości i jakości plonu wybranych roślin uprawnych. Monografie i Rozprawy Naukowe, IUNG-PIB Puławy, 2013, **37**: 1-141.
 38. Podleśna A., Podleśny J., Klikocka H.: Wpływ nawożenia siarką i azotem na azotowo-fosforową gospodarkę kukurydzy. Przemysł Chemiczny, 2017, **6**: 1374-1377.
 39. Potarzycki J.: Fosfor w glebie. Journal of Elementology, 2003, **8**: 19-32.
 40. Pote D.H., Daniel T.C., Nichols D.J., Moore P.A. Jr., Miller D.M., Edwards D.R.: Seasonal and soil-drying effects on runoff phosphorus relationships to soil phosphorus. Soil Science Society of America Journal, 1999, **63**: 1006-1012. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6341006x>
 41. Siebielec G., Smreczak B., Klimkowicz-Pawlas A. i in.: Monitoring chemizmu gleb ornych w Polsce w latach 2010–2012. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, 2012, ss. 196.
 42. Szulc W.: Potrzeby nawożenia roślin uprawnych siarką oraz metody ich wyznaczania. Rozprawy Naukowe i Monografie, Wyd. SGGW, Warszawa 2008, **332**: 1-98.
 43. Tabatabaia M.A.: Sulphur in agriculture. American Society of Agronomy, 1986, Madison, USA, pp. 688.
 44. Till A.R.: Sulphur and sustainable agriculture. Int. Fertilizer Industry Association, 2010, Paris, France, pp. 70.
 45. Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne (Dz.U. z 2021 r. poz. 716).
 46. Witk T., Górski T.: Przyrodnicza bonitacja rolniczej przestrzeni produkcyjnej w Polsce. Wyd. Geologiczne, Warszawa 1997, s. 14-45.
 47. Zhao F.J., Wood A.P., McGrath S.P. Effects of sulphur nutrition on growth and nitrogen fixation of pea (*Pisum sativum* L.). Plant Soil, 1999, **212**: 207-2017.
 48. Ziadin, Sen Tran T.: Mehlich 3 extractable elements. In: Soil sampling and methods of analysis, M.R. Carter, E.G. Gregorich (eds). Taylor and Francis, 2008, pp. 81-88.
-

Adres do korespondencji:

mgr Beata Jurga
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. 81 4786 839
e-mail:bjurga@iung.pulawy.pl

AUTOR	ORCID
Beata Jurga	0000-0001-9398-0359
Piotr Ochal	0000-0002-5246-3192
Anna Podleśna	0000-0001-5652-8881