

Agnieszka Rutkowska

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

## PRODUKCYJNE I ŚRODOWISKOWE SKUTKI WIELOLETNIEGO WYCZERPYWANIA GLEB Z FOSFORU I POTASU\*

**Słowa kluczowe:** nawożenie azotem, potas przyswajalny, fosfor przyswajalny, bilanse składników pokarmowych, doświadczenie wieloletnie

### Wstęp

Przy opracowywaniu zaleceń nawozowych dotyczących azotu, zakłada się optymalne zaopatrzenie roślin w pozostałe składniki pokarmowe, przy uregulowanym odczynie gleby. Praktyka rolnicza wskazuje jednak na szczególne preferowanie nawożenia azotem, który jest podstawowym czynnikiem plonotwórczym, kosztem zaniechania wapnowania i znacznego ograniczenia zużycia nawozów fosforowych i potasowych. Zgodnie z danymi GUS średnie zużycie nawozów mineralnych w Polsce w 2012/2013 wyniosło 141 kg NPK · ha<sup>-1</sup> UR w dobrej kulturze, przy stosunku N:P:K równym 1,0:0,3:0,3. Zjawisko to wydaje się szczególnie niebezpieczne, mając na uwadze fakt, że 32% gleb Polski należy do klasy o bardzo niskiej i niskiej zasobności w fosfor i magnez, a 42% – niskiej i bardzo niskiej zasobności w potas (25). Ponadto preferowane obecnie wysokoplonujące odmiany roślin wykazują duże potrzeby w stosunku do wszystkich składników pokarmowych, co nasila proces wyczerpywania gleb. Dążenie do zachowania zrównoważonego bilansu azotu przy jednoczesnym wyczerpywaniu rezerw pozostałych makroskładników z gleby może prowadzić z jednej strony do zaburzeń funkcji fizjologicznych roślin, a w konsekwencji do redukcji plonów, z drugiej zaś strony do znacznego zubożenia środowiska glebowego (4, 7, 17).

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

## Zasoby fosforu w glebie

Fosfor w glebie występuje w postaci związków organicznych i mineralnych. Frakcja organiczna stanowi od 20 do 70% całkowitej puli tego składnika, a jej źródłem są głównie fosfolipidy, kwasy nukleinowe i fityny (13). Mineralizacja fosforu organicznego jest ściśle związana z warunkami środowiska, a na tempo rozkładu organicznych związków fosforu wpływa przede wszystkim odczyn gleby i temperatura. Proces ten zachodzi pod wpływem enzymów wydzielanych przez bakterie i korzenie roślin (29, 33). Fosfor nieorganiczny występuje głównie w postaci soli żelaza, glinu, wapnia, magnezu oraz w minerałach, takich jak apatyt, strengit i frankolit (3, 6). W roztworze glebowym fosfor występuje przeważnie w postaci jonów ortofosforanowych bezpośrednio dostępnych dla roślin. W czasie wegetacji roślin zachodzi uwalnianie fosforu z ruchomych rezerw tego składnika (fosforanów glinu, żelaza, wapnia i magnezu oraz fosforanów związanych z minerałami ilastymi i substancją organiczną), przy czym proces ten uzależniony jest głównie od odczynu gleby. Najwięcej fosforu ruchomego znajduje się w glebach o odczynie lekko kwaśnym (14).

Ze względu na mnogość związków fosforu w glebie wyróżnia się kilka form o różnicowanej dostępności dla roślin, określanych frakcjami fosforu (10, 11).

**Frakcja mobilna** występuje w roztworze glebowym w postaci związków nieorganicznych (jonów). Frakcja fosforu mobilnego ( $P_i$ ) określana jako fosfor rozpuszczalny, aktywny, jest bezpośrednio dostępna dla roślin, stąd odgrywa zasadniczą rolę w ogólnej puli fosforu glebowego. Zasilana jest głównie przez fosfor zawarty w nawozach mineralnych, częściowo w nawozach naturalnych oraz uwalniany z frakcji labilnej gleby

**Frakcja labilna** obejmuje świeżo strącone fosforany adsorbowane na powierzchni cząstek stałej fazy gleby i labilne formy związków organicznych. Frakcja ta uzupełniana jest głównie fosforem pochodzącym z nawozów naturalnych i resztek pozbiorowych roślin.

**Frakcja zapasowa** obejmuje strącone fosforany żelaza i glinu oraz trwałe organiczne połączenia fosforu. Frakcje labilna i zapasowa związane są z fazą stałą gleby.

Rośliny pobierają fosfor wyłącznie w formie jonów  $H_2PO_4^-$ , które występują w szerokim zakresie pH gleby, ale za przedział optymalny występowania tych jonów przyjmuje się pH 5,5–7,2 (1, 30). W warunkach niedoboru jonów  $H_2PO_4^-$ , pod wpływem wydzielin korzeniowych, są one przekształcane w jony  $H_2PO_4^-$ . Całkowita zawartość fosforu w glebie waha się w granicach 500–800 mg  $P \cdot kg^{-1}$ , ale ilość P bezpośrednio dostępnego dla roślin wynosi zaledwie 0,03–0,5 mg  $P \cdot kg^{-1}$  (20, 28). Oznacza to, że w glebie o miąższości 0,0–0,2 m znajduje się zaledwie 0,09–1,5 kg  $P \cdot kg^{-1}$ . Aby pokryć potrzeby pokarmowe roślin, zasoby fosforu wyczerpywanego z roztworu glebowego muszą zatem podlegać wielokrotnemu uzupełnianiu z rezerw glebowych. Fosfor w fazie stałej gleby występuje w dwóch formach: organicznej i nieorganicznej, przy czym w glebach mineralnych stosunek zawartości związków organicznych do nieorganicznych wynosi 1:1 (12). Utrzymanie wystarczającej dla

roślin ilości fosforu nieorganicznego w roztworze glebowym zależy od równowagi pomiędzy frakcją rozpuszczalną ( $P_i$ ) i labilną ( $P_L$ ). Frakcja labilna pozostaje w stanie dużej niestabilności termodynamicznej, a zawarte w niej związki fosforu mogą być zarówno uwalniane do roztworu glebowego, jak również przekształcane w formy stałe (minerały), tworząc frakcję stabilną fosforu glebowego ( $P_S$ ). Do głównych procesów kontrolujących zawartość fosforu dostępnego  $P_i$  w roztworze glebowym należą:

- uwalnianie lub wyłączanie z roztworu glebowego jonów ortofosforanowych  $P_i$  na drodze wymiany jonowej z fazą stałą gleby, adsorpcja i desorpcja,
- wytrącanie i rozpuszczanie związków nieorganicznych fosforu w roztworze glebowym,
- immobilizacja związków nieorganicznych fosforu i mineralizacja fosforu ze związków organicznych (11).

Związki fosforu zaadsorbowane lub wytrącone z roztworu glebowego podlegają w kolejnych etapach przemianom na drodze sorpcji specyficznej lub krystalizacji przekształceniu w trwałe związki nieorganiczne stabilne – minerały lub połączenia organiczno-mineralne.

### System nawożenia fosforem

Fosfor jest pierwiastkiem niezbędnym roślinie w całym okresie jej wzrostu i rozwoju. Na podstawie tempa akumulacji i reakcji roślin na niedobór tego składnika wyróżnia się trzy fazy rozwojowe:

- rozwój początkowy – budowa podstawowych organów rośliny
- wiosenne ruszenie wegetacji u roślin ozimych – stymulacja procesów regeneracji systemu korzeniowego oraz organów nadziemnych
- kwitnienie i dojrzewanie – stymulacja procesów nalewania ziarna lub nasion,

Niedostateczne zaopatrzenie roślin w fosfor ujawnia się szczególnie w krytycznych fazach rozwojowych, powodując słabe krzewienie się zbóż, zahamowanie wzrostu organów podziemnych i nadziemnych, co przejawia się karłowatym pokrojem roślin, przeredzeniem łanu, ograniczeniem kwitnienia i zawiązywania nasion lub ziarniaków, pogorszeniem jakości plonu oraz redukcją plonu użytkowego (15, 24).

Rośliny wykazują niedobór fosforu z dwóch głównych powodów: niedoboru ortofosforanów w roztworze glebowym oraz działania niskich temperatur, które ograniczają efektywność pobierania tych jonów przez korzenie. Ujemny wpływ niskich temperatur przejawia się spowolnieniem budowy masy liściowej u rzepaku, a u zbóż – słabym krzewieniem, co determinuje wielkość plonu. W przypadku rzepaku objawy niedoboru fosforu mogą wystąpić nawet w okresie zawiązywania łuszczyn, sygnalizując reakcją na chłód. U kukurydzy z kolei może wystąpić reakcja roślin na niedobór fosforu spowodowany suszą, co przejawia się słabym uziarnieniem kolb lub całkowitym ich brakiem (5, 21).

W systemie nawożenia zrównoważonego nawożenie fosforem polega zatem na zabezpieczeniu potrzeb pokarmowych roślin i utrzymaniu zasobności gleby na optymalnym poziomie, za który przyjmuje się przedział zawartości średniej. Nawożenia fosforem nie należy stosować, jeżeli jego zawartość w glebie przekracza  $40 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \cdot 100 \text{ g}^{-1}$  gleby. Dotyczy to zarówno stosowania nawozów mineralnych, naturalnych (szczególnie gnojowicy), jak również innych substancji użyźniających glebę (16).

### Zasoby potasu w glebie

Pierwotnym źródłem potasu dla roślin jest skała macierzysta, z której powstała gleba. Gleby wytworzone z utworów gliniastych (gliny piaszczyste, piaski gliniaste mocne, gliny, ily) są naturalnie bogate w potas. Gleby wytworzone z utworów piaszczystych (piaski luźne, piaski słabo gliniaste, piaski gliniaste lekkie), z wapieni oraz utworów organicznych są ubogie w ten pierwiastek. Gleby uprawne zawierają w warstwie ornej gleby od 1000 do 25000  $\text{kg K} \cdot \text{ha}^{-1}$  (11). Rośliny pobierają jedynie tę część potasu, która w czasie wegetacji występuje w roztworze glebowym w postaci jonu  $\text{K}^+$  (18, 19, 22), jest to tzw. potas aktywny. Udział tej frakcji w glebach jest jednak niewielki i stanowi do 1% ogólnej ilości tego składnika, co odpowiada ok.  $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  w warstwie ornej. Największe stężenie formy aktywnej potasu występuje wiosną i zmniejsza się stopniowo w czasie wegetacji roślin (2).

Potas potencjalnie dostępny dla roślin w glebie, tzw. potas przyswajalny, pochodzi z zapasów, które stopniowo uwalniają się z wtórnych minerałów ilastych. Te z kolei uzupełniane są przez potas uwalniany z glinokrzemianów.

W glebie wyróżnia się trzy główne frakcje potasu:

- frakcję mobilną (rozpuszczalną bądź aktywną) związaną z fazą ciekłą gleby – jest to potas obecny w roztworze glebowym;
- frakcję słabo mobilną, którą tworzy potas frakcji wymiennej, podlegającej wymianie jonowej oraz potas minerałów ilastych frakcji niewymiennej, niepodlegającej wymianie jonowej;
- frakcję niemobilną (rezerwową) czyli potas minerałów pierwotnych, określaną jako potas strukturalny (31).

Jako potas wymienny określa się tę część potasu, która może być uwalniana z kompleksu sorpcyjnego do roztworu glebowego (23). W glebach Polski ilość potasu wymiennego wzrasta wraz ze wzrostem zawartości cząstek ilastych (9, 11).

Frakcja potasu niewymiennej jest w postaci kationów  $\text{K}^+$  w przestrzeniach wewnętrznych minerałów ilastych, takich jak illit na tyle silnie, że stają się one niedostępne dla roślin. Proces ich uwalniania jest bardzo powolny. Frakcja ta obejmuje część potasu mineralnego, jak również zawartego w biomase gleby. W warunkach małej zawartości form łatwo dostępnych rośliny aktywnie pobierają ten składnik. W glebach Polski należących do kategorii agronomicznej gleb bardzo lekkich i lekkich ilościowy i procentowy udział tej formy potasu jest największy (8, 11).

Potencjał gleby do zaopatrywania roślin w potas zależy w dużej mierze od ilości cząstek ilastych, co związane jest z kategorią agronomiczną gleby. Gleby średnie i ciężkie, najbardziej zasobne w potas, zawierają ponad połowę składnika w związkach niedostępnych dla roślin. Generalnie im większa zawartość cząstek poniżej 0,02 mm, tym większa zawartość potasu ogółem oraz każdej z jego form w ujęciu ilościowym. Jednocześnie mniejszy jest udział form aktywnych, wymiennych i niewymiennych, dochodzi również do wzrostu udziału formy strukturalnej w ogólnej puli składnika w glebie (31, 32).

### System nawożenia potasem

System nawożenia potasem opiera się na tych samych zasadach, które obowiązują w przypadku fosforu. W warunkach polskich, przy przewadze gleb lekkich o małym kompleksie sorpcyjnym, czyli o niskiej zawartości składników mineralnych, potas obok azotu odgrywa zasadniczą rolę w produkcji roślinnej. Dynamika pobierania potasu zależy od gatunku rośliny uprawnej, a krytyczny okres akumulacji tego makroskładnika rozpoczyna się już w fazie wzrostu wykładniczego łanu. Maksymalne pobranie potasu, czyli krytyczna faza zapotrzebowania na ten składnik przypada na okres wzrostu elongacyjnego. Krytyczne fazy zapotrzebowania wybranych gatunków roślin na potas zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Krytyczne fazy reakcji wybranych roślin uprawnych na potas

Roślina uprawna	Krytyczna faza rozwoju
Zboża	od strzelania w źdźbło do początku nalewania ziarna
Rzepak	od fazy rozety do pełni kwitnienia
Burak cukrowy	od drugiej pary liści do końca pierwszej połowy sierpnia
Ziemniak	od początku zawiązywania do pełnej dojrzałości bulw
Kukurydza	od piątego liścia do dojrzałości mleczonej ziarniaków
Bobowate	od drugiego liścia do pełni kwitnienia pędu głównego

Źródło: Grzebisz, 2008 (11)

W fazie wzrostu wydłużeniowego rośliny uprawne pobierają potas z całej warstwy gleby przerośniętej korzeniami, nie tylko z warstwy ornej. Dotyczy to głównie roślin okopowych, rzepaku i strączkowych. Dostępność potasu uzależniona jest zatem od odpowiednich warunków jego pobierania przez system korzeniowy, m.in. właściwego odczynu gleby czy likwidacji zagęszczonych jej warstw.

### Material i metody

Podstawę badań stanowiły dwa statyczne, dwuczynnikowe doświadczenia nawozowe prowadzone od 1985 r. na polach doświadczalnych IUNG-PIB w Grabowie

oraz Stacji Doświadczalnej w Baborówku. W historii tych doświadczeń czynnikiem niezmiennym od momentu ich założenia było nawożenie azotem na sześciu poziomach. W 2003 r. obok obiektu z optymalnymi dawkami P, K, Mg wprowadzono obiekty, z których poprzez dobór odpowiednich form nawozów, stopniowo wycofywano po jednym z wymienionych makroskładników (obiekty: minus P, minus K, minus Mg). Od momentu założenia doświadczenia nie stosowano nawozów naturalnych, nie uprawiano również roślin bobowatych. W obu miejscowościach gleba charakteryzowała się uregulowanym odczynem, a wyjściowa zawartość składników pokarmowych wyniosła: 16 mg  $P_2O_5$ , 12 mg  $K_2O$  i 5,05 mg  $MgO \cdot 100 g^{-1}$  gleby w Grabowie oraz 32 mg  $P_2O_5$ , 15,2 mg  $K_2O$  i 9,0 mg  $MgO \cdot 100 g^{-1}$  gleby w Baborówku.

W zmianowaniu uprawiano następujące rośliny: rzepak ozimy, pszenica ozima, kukurydza na ziarno, jęczmień jary. Doświadczenie prowadzono czterema polami równocześnie. Dawki azotu, fosforu, potasu i magnezu stosowane pod poszczególne rośliny w zmianowaniu przedstawiono w tabelach 2–3.

Tabela 2

Dawki fosforu, potasu i magnezu stosowane w doświadczeniu (I czynnik)

Roślina	Dawka składnika ( $kg \cdot ha^{-1}$ )			
	$P_2O_5$		$K_2O$	
	plus P	minus P	plus K	minus K
Rzepak ozimy	90	0	130	0
Pszenica ozima	70	0	90	0
Kukurydza	80	0	140	0
Jęczmień jary	70	0	80	0

Źródło: badania własne

Tabela 3

Dawki azotu stosowane w doświadczeniu (II czynnik)

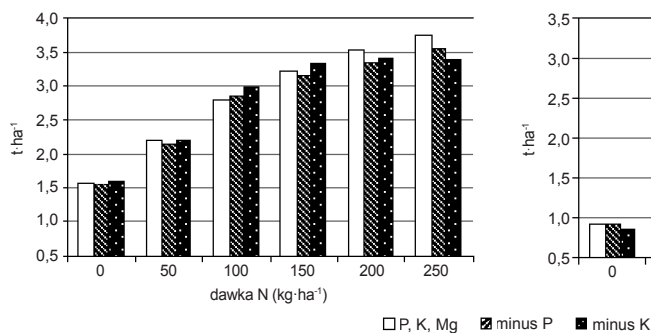
Obiekt	Roślina			
	rzepak ozimy	pszenica ozima	kukurydza	jęczmień jary
N0	0	0	0	0
N1	50	40	50	30
N2	100	80	100	60
N3	150	120	150	90
N4	200	160	200	120
N5	250	200	250	150

Źródło: badania własne

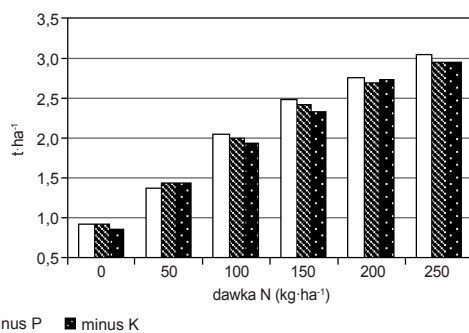
Celem realizowanych w latach 2003–2014 badań była ocena skutków wieloletniego wyczerpywania gleb z fosforu, potasu i magnezu. Jako miarę produkcyjnych skutków, przyjęto plony roślin, natomiast jako miarę skutków środowiskowych – bilanse analizowanych makroskładników oraz zmiany zawartości przyswajalnych form fosforu, potasu i magnezu w glebie.

## Plonowanie roślin

Nie udowodniono istotnego wpływu stopniowego wyczerpywania gleby z któregośkolwiek składników pokarmowych na plonowanie roślin w kolejnych rotacjach, a wielkość plonów ziarna lub nasion zależała od przebiegu pogody w poszczególnych latach (rys. 1–8). Niemniej jednak w Grabowie, na glebie o niższej wyjściowej zawartości fosforu, w przypadku wszystkich roślin zaznaczyła się tendencja do nieznacznej redukcji plonów w obiekcie, w którym nie stosowano nawozów fosforowych, a w obiekcie bez nawożenia potasem istotnie gorzej plonowała kukurydza i jęczmień. W Baborówku na glebie nienawożonej potasem istotnie niżżej plonowały rośliny o największych potrzebach pokarmowych w stosunku do tego składnika – kukurydza i rzepak.

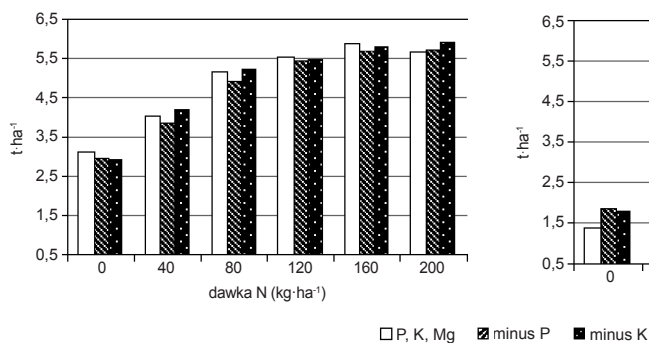


Rys. 1. Plony nasion rzepaku w Grabowie (średnia za lata 2003–2014)

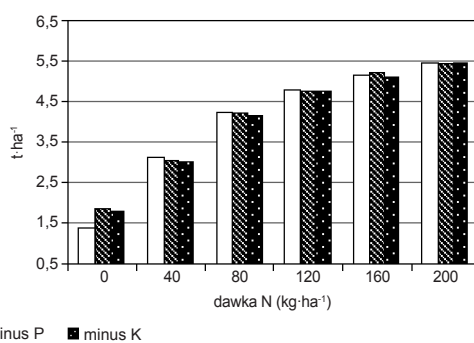


Rys. 2. Plony nasion rzepaku w Baborówku (średnia za lata 2003–2014)

Źródło: opracowanie własne

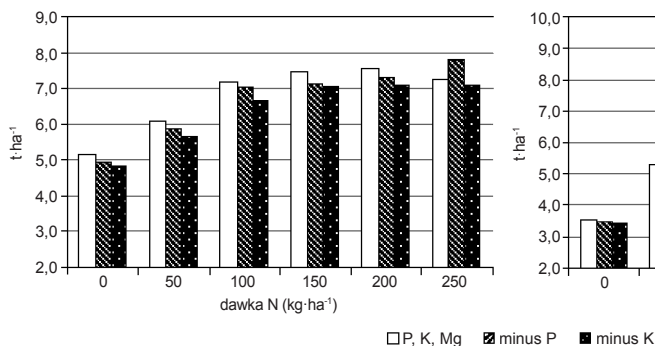


Rys. 3. Plony ziarna pszenicy w Grabowie (średnia za lata 2003–2014)

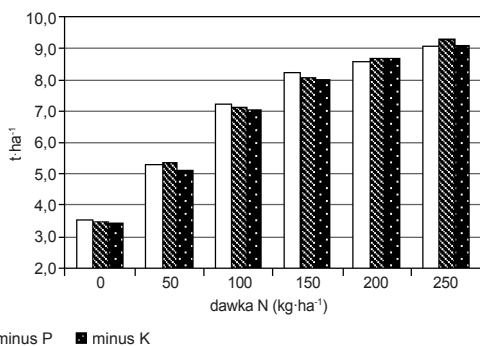


Rys. 4. Plony ziarna pszenicy w Baborówku (średnia za lata 2003–2014)

Źródło: opracowanie własne

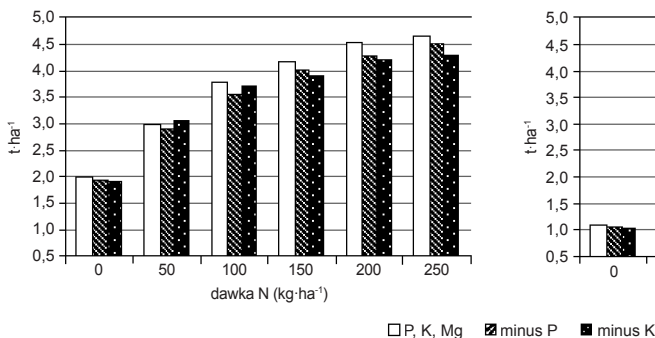


Rys. 5. Plony ziarna kukurydzy w Grabowie (średnia za lata 2003–2014)

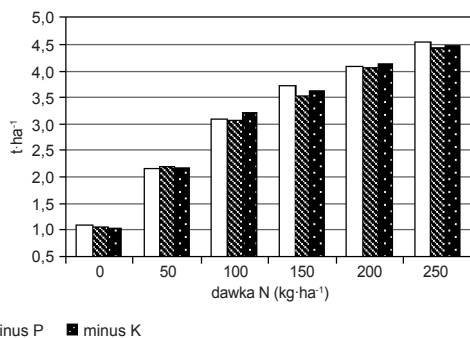


Rys. 6. Plony ziarna kukurydzy w Baborówku (średnia za lata 2003–2014)

Źródło: opracowanie własne



Rys. 7. Plony ziarna jęczmienia w Grabowie (średnia za lata 2003–2014)



Rys. 8. Plony ziarna jęczmienia w Baborówku (średnia za lata 2003–2014)

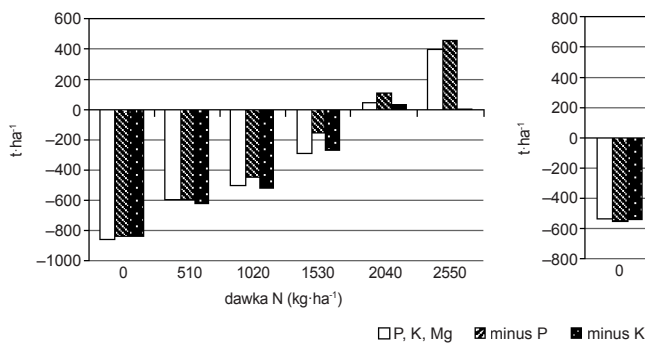
Źródło: opracowanie własne

### Bilanse składników pokarmowych

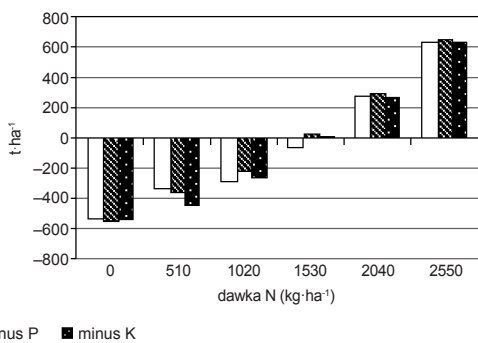
Bilanse N, P, K sporządzono za okres 12 lat metodą „na powierzchni pola”, uwzględniając po stronie przychodów ilości składników wnoszonych w nawozach, a po stronie rozchodów ilości wynoszone z plonami głównymi i ubocznymi. Całkowite dawki analizowanych makroskładników zastosowane w tym okresie wyniosły odpowiednio: 405 kg P·ha<sup>-1</sup>, 1095 kg K·ha<sup>-1</sup> oraz 506 kg Mg·ha<sup>-1</sup>. Azot stosowano w dawkach całkowitych: 0, 510, 1020, 1530, 2040, 2550 kg N·ha<sup>-1</sup>.

Ze względu na większe wartości pobrania N w warunkach optymalnego zaopatrzenia roślin w składniki pokarmowe, w obu miejscowościach najsilniej ujemny bilans azotu wystąpił w obiekcie kontrolnym (rys. 9–10). Dodatkowo saldo bilansu azotu uzyskano przy poziomie nawożenia N5, w Grabowie średnio +38 kg N·ha<sup>-1</sup>, a w Baborówku +290 kg N·ha<sup>-1</sup>. W Baborówku zaniechanie nawożenia fosforem bądź potasem nie miało wpływu na saldo bilansu N, natomiast w Grabowie w obiekcie bez fosforu, w którym rośliny pobierały mniej P, bilans tego składnika był mniej ujemny w porównaniu z obiektem kontrolnym.





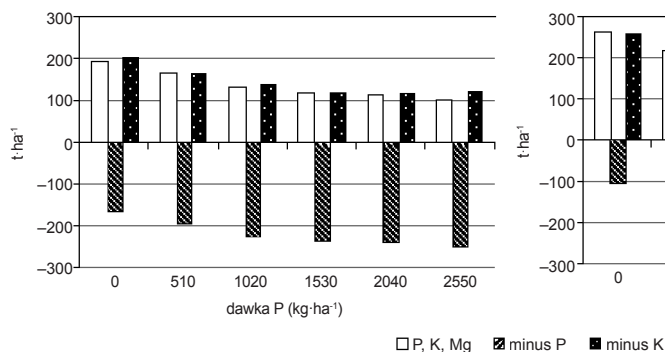
Rys. 9. Bilans azotu w Grabowie za 12 lat doświadczenia



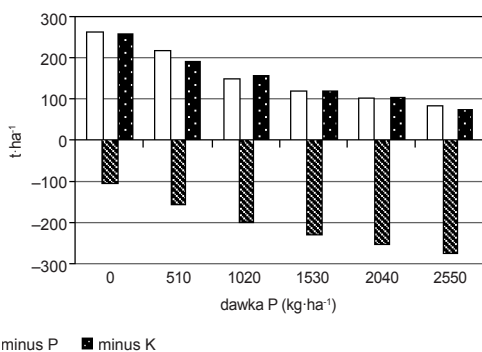
Rys. 10. Bilans azotu w Baborówku za 12 lat doświadczenia

Źródło: Rutkowska i Piłkuła, 2015 (26)

W obu miejscowościach, na glebie regularnie nawożonej fosforem, w całym zakresie dawek azotu uzyskiwano zrównoważony bilans fosforu. Na glebie nienawożonej fosforem bilans tego składnika był silnie ujemny i pogłębiał się wraz ze wzrostem poziomu nawożenia azotem, a zaniechanie nawożenia skutkowało zubożeniem gleby średnio o 217 kg P·ha<sup>-1</sup> w Grabowie i 201 kg P·ha<sup>-1</sup> w Baborówku w ciągu 12 lat (rys. 11–12).



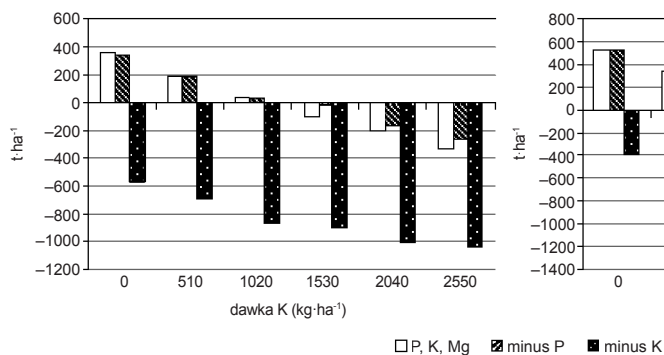
Rys. 11. Bilans fosforu zależnie od poziomu nawożenia azotem w Grabowie



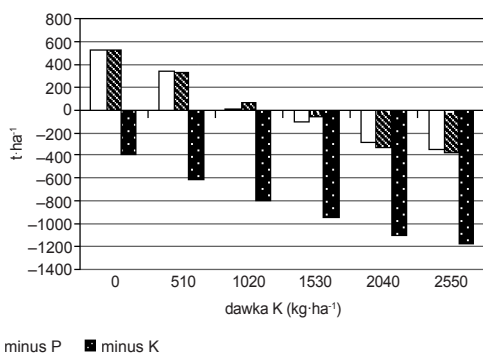
Rys. 12. Bilans fosforu zależnie od poziomu nawożenia azotem w Baborówku

Źródło: Rutkowska i in., 2015 (27)

Przy pełnym nawożeniu wszystkimi analizowanymi makroskładnikami, w obu punktach doświadczalnych zrównoważony bilans potasu uzyskano jedynie w zakresie dawek N0–N3. Przy całkowitej dawce 1020 kg N ha<sup>-1</sup> bilans tego składnika wyniósł średnio +30 kg K·ha<sup>-1</sup>. W warunkach uprawy roślin bez stosowania nawozów zawierających fosfor, przy tym samym poziomie nawożenia azotem, saldo bilansu wyniosło średnio 830 kg K·ha<sup>-1</sup> (rys. 13–14).



Rys. 13. Bilans potasu zależnie od poziomu nawożenia azotem w Grabowie

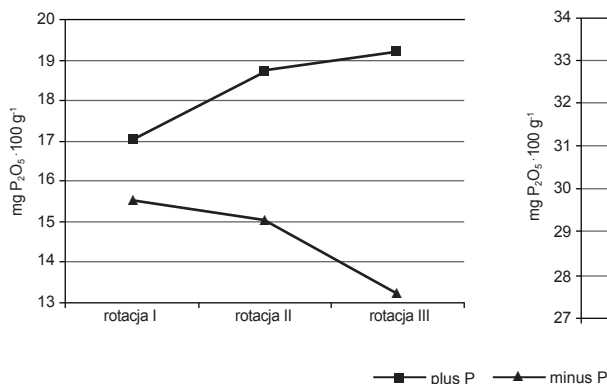


Rys. 14. Bilans potasu zależnie od poziomu nawożenia azotem w Baborówku

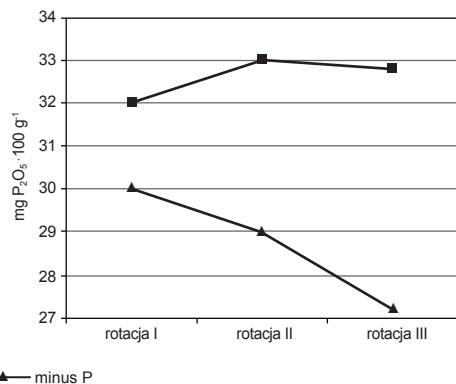
Źródło: Rutkowska i Pikula, 2015 (26)

### Zawartość przyswajalnych form potasu i magnezu w glebie

Zaprzestanie nawożenia fosforem i potasem w okresie dwunastoletnim spowodowało istotne obniżenie zawartości przyswajalnych form tych składników w warstwie ornej gleby. W obiekcie, w którym nie stosowano nawozów fosforowych zawartość  $P_2O_5$  w Grabowie spadła średnio o 30% w stosunku do zawartości w 2003 r., z klasy zawartości wysokiej do klasy zawartości średniej, natomiast w Baborówku o 18%, pozostając jednak w klasie zawartości bardzo wysokiej (rys. 15–16). Ze względu na większe pobranie potasu w Grabowie w porównaniu z Baborówkiem, pomimo regularnego nawożenia tym składnikiem zawartość potasu przyswajalnego zmniejszała się w kolejnych rotacjach doświadczenia. Zaniechanie nawożenia potasem skutkowało znacznym zubożeniem gleby w  $K_2O$  – o ponad 60% w stosunku do zawartości wyjściowej w Grabowie i 35% w Baborówku (rys. 17–18).

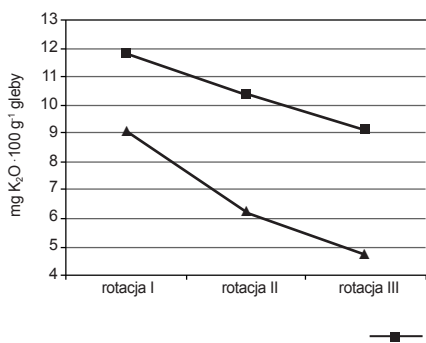


Rys. 15. Zawartość fosforu przyswajalnego w warstwie ornej gleby w Grabowie

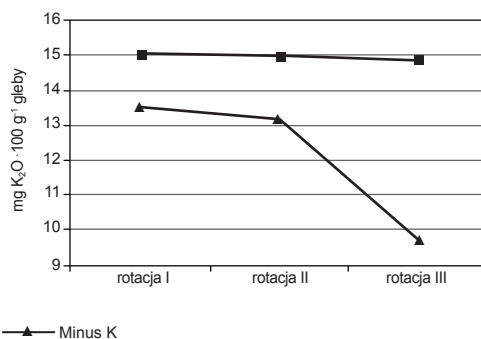


Rys. 16. Zawartość fosforu przyswajalnego w warstwie ornej gleby w Baborówku

Źródło: Rutkowska i in., 2015 (27)



Rys. 17. Zawartość potasu przyswajalnego w warstwie ornej gleby w Grabowie



Rys. 18. Zawartość potasu przyswajalnego w warstwie ornej gleby w Baborówku

Źródło: Rutkowska i Pikuła, 2015 (26)

## Podsumowanie

Rolnictwo zrównoważone ma na celu zarówno optymalizację plonów, jak również dbałość o jakość środowiska przyrodniczego, w tym zachowanie podstawowych funkcji gleby. Zintegrowany system nawożenia, na którym opiera się system doradztwa nawozowego zakłada zatem właściwe zaopatrzenie roślin we wszystkie niezbędne dla wzrostu i rozwoju składniki pokarmowe, przy równoczesnym utrzymaniu żyzności gleby na co najmniej średnim poziomie. Zachwianie równowagi pomiędzy składnikami pokarmowymi, zwłaszcza w warunkach wieloletniego niezrównoważonego nawożenia mineralnego, może z jednej strony prowadzić do zaburzeń fizjologicznych roślin i redukcji plonu, z drugiej do znacznego zubożenia gleby. W warunkach prowadzonego w okresie dwunastoletnim doświadczenia, na glebie o bardzo wysokiej zawartości fosforu nie zaobserwowano negatywnych skutków produkcyjnych pomimo znacznego spadku zawartości przyswajalnych form tego składnika. Na glebie o średniej wyjściowej zawartości potasu odnotowano natomiast niżkę plonów roślin o największych potrzebach pokarmowych w stosunku do tego składnika – kukurydzy i rzepaku. Zarówno w przypadku fosforu, jak i potasu nastąpiło znaczne zubożenie warstwy ornej gleby w przyswajalne formy tych pierwiastków.

## Literatura

1. Ai P., Sun S., Zhao J., Fan X., Xin W., Guo Q., Yu L., Shen Q., Wu P., Miller A.J. et al.: Two rice phosphate transporters, OsPht1;2 and OsPht;6 have different functions and kinetic properties in uptake and translocation, *Plant J.*, 2009, **57**: 798-809.
2. Barber S.A.: Potassium availability at the soil – root interface and factors influencing potassium uptake. In: Johnson A. E. Potassium, magnesium and soil fertility: long-term experimental evidence. The International Fertilizer Society. Proceedings, 1985, **613**: 16.

3. Beauchemin S., Simard R.R., Cluis D.: Forms and concentration of phosphorus in drainage water of twenty – seven tile drained soils. *J. Environ. Qual.*, 1998, **27**(3): 721-728.
4. Brar M.S., Bijay-Singh, Bansal S.K., Srinivasarao Ch.: Role of potassium nutrition in nitrogen use efficiency in cereals. *Research Findings: e-ife*, 2011, **29**.
5. Davidson D.J., Chevalier P.M.: Pre-anthesis tiller mortality in spring wheat. *Crop Sci.* 1990, **30**: 832-836.
6. Filipiek T.: Zarządzanie zasobami fosforu w środowisku rolniczym. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2002, **4**(13): 247-259.
7. Fixen F.E., West F.B.: Nitrogen fertilizers: Meeting contemporary challenges. *Ambio: J. Hum. Environ.*, 2001, **31**: 169-176.
8. Fotyła M.: Content of potassium in different forms in the soils of southeast Poland. *Pol. J. Soil Sci. Soil Chemistry*, 2007, **40**/1: 19-32.
9. Fotyła M.: Potas w agrosystemach. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2011, **45**: 31-37.
10. Gaj R.: Zrównoważona gospodarka fosforem w glebie i roślinie w warunkach intensywnej produkcji roślinnej. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2007, **33**: 143.
11. Grzebisz W.: Nawożenie roślin uprawnych. 2. Nawozy i systemy nawożenia. PWRiL, Poznań 2008.
12. Hansen J.C., Cade-Menun B.J., Strawn D.G.: Phosphorus speciation in manure-amended alkaline soils. *J. Environ Qual.*, 2004, **33**: 1521-1527.
13. Harrison A.F.: Soil Organic Phosphorus – A review of world literature. CAB International, Wallingford, Oxon, UK, 1987, 257.
14. Hinsinger P.: Bioavailability of soil inorganic P in rhizosphere as affected by root - induced chemical changes – a review. *Plant Soil*, 2001, **237**: 173-195.
15. Jacob J., Lawlor D.W.: Stomatal and mesophyll limitation of photosynthesis in phosphate deficient sunflower, maize and wheat plants. *J. Exp. Bot.*, 1999, **41**: 1003-1011.
16. Jadczyż T., Kowalczyk J., Lipiński W.: Nawożenie mineralne na gruntach ornych i trwałych użytkach zielonych. Instrukcja upowszechnieniowa, IUNG-PIB, Puławy 2013, **184**.
17. Jianbo S., Lixing Y., Junling Z., Haigang L., Zhaohai B., Xinping Ch., Weifeng Z., Fusuo Z.: Phosphorus dynamics: from soil to plant. *Plant Physiol.*, 2011, **156**: 997-1005.
18. Jiang F., Li C.J., Jeschke W.D., Zhang F.S.: Effect of top excision and replacement by 1-naphthylacetic acid on partition and flow of potassium in tobacco plants. *J. Exp. Bot.*, 2001, **52**: 2143-2150.
19. Lu Y.X., Li C.J., Zhang F.S.: Transpiration, potassium uptake and flow in tobacco as affected by nitrogen forms and nutrient levels. *Ann. Bot.*, 2005, **95**: 991-998.
20. Łabętowicz J.: Skład chemiczny roztworu glebowego w zróżnicowanych warunkach glebowych i nawozowych, Wyd. Fundacja „Rozwój SGGW” Warszawa, 1995, 1-4.
21. Marschner H., Kirkby E.A., Engels C.: Importance of cycling and recycling of mineral nutrients within plants for growth and development. *Bot. Acta*, 1997, **110**: 265-273.
22. Mathuis F.J.M.: Monovalent cation transporters; establishing a link between bioinformatics and physiology. *Plant Soil*, 2007, **301**: 1-5.

23. Mclean E., Watson M.E.: Soil measurements of plant available potassium. In. Application of kinetic models in describing soil potassium release characteristics and their correlation with potassium extracted by chemical methods, A.R. Hosseinpur and R. Motaghian (eds). *Pedosphere*, 2013, **23(4)**: 482-492.
24. Rao I.M., Terry N.: Leaf phosphate status, photosynthesis and carbon partitioning in sugar beet. I. Changes in growth, gas exchange, and Calvin cycle enzymes. *Plant Physiol.*, 1989, **90**: 814-819.
25. Rocznik Statystyczny Rolnictwa. GUS, Warszawa 2014, 104-105.
26. Rutkowska A., Pikuła D.: Productive and environmental effects of soil potassium mining in long – term field experiment. Book of abstracts and proceedings of the International Conference „60th anniversary of Long-term Experiments in the Czech Republic”. 2015, 104-107
27. Rutkowska A., Pikuła D., Kęsik K.: Produkcyjne i środowiskowe skutki wieloletniego wyczerpywania gleb z fosforu. Konferencja naukowa ”Fosfor-współczesne wyzwania dla rolnictwa i środowiska”, Puławy, 15–16 czerwca 2015, 126-127.
28. Sharpley A.N.: Soil phosphorus dynamics: agronomic and environment impact. *Ecol. Engin.*, 1995, **5**: 261-279.
29. Shin H., Shin H.S., Dewbre G.R., Harrison M.J.: Phosphate transport in Arabidopsis. *Pht1 and Pht4 play a major role in phosphate acquisition from both low- and high-phosphate environments.* *Plant J.*, 2004, **39**: 629-642.
30. Smith S.E., Read D.J.: *Mycorrhizal symbiosis.*, Ed. 3. Elsevier and Academic, New York, 2008, pp. 800
31. Sparks D.L.: Potassium dynamics in soil. *Advan. Soil Sci.*, 1985, **6**: 231-266.
32. Sparks D.L., Huang P.M.: Physical chemistry of soil potassium. In. Application of kinetic models in describing soil potassium release characteristics and their correlation with potassium extracted by chemical methods, A.R. Hosseinpur and R. Motaghian (eds). *Pedosphere*, 2013, **23(4)**: 482-492.
33. Spohn M., Kuyakov Y.: Distribution of microbial – and – root – derived phosphatase – activities in the rhizosphere depending on P availability and C allocation – Coupling soil zymography with <sup>14</sup>C imaging. *Soil Biol. Biochem.*, 2013, **67**: 106-113.

---

Adres do korespondencji:

*dr Agnieszka Rutkowska*  
*Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia*  
*IUNG-PIB*  
*ul. Czartoryskich 8*  
*24-100 Puławy*  
*tel. 81 47 86 840*  
*e-mail: agrut@iung.pulawy.pl*

