



¹ Zakład Produkcji Roślinnej, Instytut Nauk Rolniczych, Ochrony i Kształtowania Środowiska,
Uniwersytet Rzeszowski, Zelwerowicza 4, 35-601 Rzeszów, Polska

² Agrobonus sp. z o.o., Korzenica 20b, 37-5043 Laszki, Polska

* eszpunar@ur.edu.pl

EWA SZPUNAR-KROK ^{1*}, RENATA PAWLAK²

Znaczenie składników odżywczych dla roślin bobowatych grubonasiennych – makroelementy

The importance of nutrients for legumes – macroelements

Streszczenie: Rośliny potrzebują szerokiej gamy mineralnych składników odżywczych, które biorą udział w biologicznych, biochemicznych i fizjologicznych procesach leżących u podstaw ich wzrostu i rozwoju. Rośliny potrzebują N, P, K, S, Ca i Mg w stosunkowo dużych ilościach (>0,1% suchej masy), a każdy z tych makroelementów jest niezbędny do ukończenia cyklu życiowego rośliny. Zbilansowane nawożenie znacząco poprawia parametry fizjologiczne, wzrostowe i plonotwórcze oraz wielkość i jakość plonu nasion roślin bobowatych grubonasiennych. Ten przegląd prac badawczych przedstawia znaczenie ważniejszych makroelementów dla roślin bobowatych grubonasiennych oraz skutki ich niedoboru.

Słowa kluczowe: rośliny bobowate, odżywianie roślin, niedobory składników mineralnych

WSTĘP

Duże znaczenie gospodarcze roślin bobowatych grubonasiennych (strączkowych) wynika przede wszystkim z wysokiej zawartości białka w nasionach. Nasiona stanowią źródło pożywienia dla człowieka, są też podstawowym źródłem białka w żywieniu zwierząt. Powszechnie znane jest także znaczenie tej grupy roślin w płodozmianie, co wynika z ich zdolności wiązania azotu atmosferycznego i dodatniego bilansu glebowej materii organicznej.

Szpunar-Krok E., Pawlak R., 2023. Znaczenie składników odżywczych dla roślin bobowatych grubonasiennych – makroelementy. *Agron. Sci.* 78(1), 135–151.

Według danych Agencji Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa [[https:// rejestr-praw.arimr.gov.pl/](https://rejestr-praw.arimr.gov.pl/)] w 2022 r. zajmowały one ok. 3,1% użytków rolnych, o 0,41% więcej w porównaniu z 2020 r. Spośród gatunków wykorzystywanych na cele paszowe największe znaczenie mają groch siewny (pastewny), łubin i bobik, a spośród bobowatych jadalnych fasola i groch siewny. Pomimo obserwowanej w ostatnich latach tendencji wzrostu powierzchni uprawy tej grupy roślin nadal ich udział w strukturze zasiewów jest niski. Choć możliwości poszerzenia powierzchni uprawy roślin bobowatych, warunkowanych zapotrzebowaniem na pasze wysokobiałkowe (blisko 60% wysokobiałkowych surowców do produkcji pasz to importowana śruta sojowa), są duże, dotychczas wielkość produkcji tych gatunków pokrywa niespełna 7% krajowego zapotrzebowania na pasze wysokobiałkowe [Oleksiak i Bronisz 2021]. Czynnikiem zniechęcającym rolników do uprawy roślin bobowatych grubonasiennych jest duża zmienność plonowania w latach, ograniczenia w wykorzystaniu na cele paszowe ze względu na zawartość w nasionach substancji nieżywniowych, jak też błędy agrotechniczne, w tym w zakresie nawożenia, wynikające w głównej mierze z braku tradycji ich uprawy w gospodarstwach w Polsce.

Powszechnie wiadomo, że stres biotyczny i abiotyczny uniemożliwia roślinom osiągnięcie potencjalnych plonów. Stresom abiotycznym można zapobiegać poprzez optymalizację warunków wzrostu i rozwoju roślin oraz dostarczanie wody i składników odżywczych oraz regulatorów wzrostu roślin, stosując nawozy mineralne, naturalne i organiczne [Książak 2017]. Rośliny potrzebują szerokiej gamy mineralnych składników odżywczych, by przeprowadzić złożone procesy biochemiczne zachodzące w komórkach, które wpływają na przebieg procesów fizjologicznych i rozwój roślin [Zhang i in. 2014]. Dostępność makroelementów, takich jak Ca, S, Mg, K, N i P ma kluczowe znaczenie dla prawidłowego przebiegu procesów życiowych roślin, co bezpośrednio wpływa na ich wzrost i plonowanie. Jedynie część całkowitej ilości składników odżywczych wprowadzonych z nawozem jest efektywnie wykorzystywana przez rośliny, a efektywność ich pobierania jest różna w zależności od pierwiastka [Salih 2013, Kalaji i in. 2014]. W uprawie roślin stosowanie nawozów dogłębowo jest bardziej powszechne i skuteczniejsze w przypadku składników odżywczych, które są wymagane w większych ilościach. Niedobór składników pokarmowych może wynikać z ich niewystarczającej ilości w glebie lub z braku możliwości ich pobrania przez korzenie lub też liście roślin, szczególnie w niekorzystnych warunkach wywołanych przez różne czynniki stresowe [Fageria i in. 2009, Singh i in. 2014]. W sytuacji, gdy pobieranie składników pokarmowych z gleby jest utrudnione, dolistne nawożenie może być alternatywną i wysoce efektywną metodą dostarczania roślinom brakujących makro- i mikroelementów [Fageria i in. 2009, Fernández i in. 2013, Niewiadomska i in. 2020, Sulewska i in. 2020].

Każdy pierwiastek pobierany przez roślinę uprawną pełni określone funkcje metaboliczne, które kształtują dynamikę akumulacji biomasy oraz strukturę plonu. Zwykle pierwiastki pobierane są przez korzenie roślin z roztworu glebowego w postaci jonowej, przy czym Ca^{2+} , Mg^{2+} i K^{+} występują jako wolne kationy, P oraz S jako ich oksyaniony fosforanowe (PO_4^{3-}) i siarczanowe (SO_4^{2-}), a także N jako anion azotanowy (NO_3^-) lub kation amonowy (NH_4^+) [Maathuis 2009]. W żywieniu roślin obowiązuje tzw. prawo minimum Liebiga, według którego niedostatek któregośkolwiek z niezbędnych dla rośliny składników pokarmowych ogranicza przyswajanie innych, powodując zakłócenia w metabolizmie rośliny i w następstwie obniżkę plonu. W związku z tym, w nawożeniu

roślin ważna jest zarówno ilość zastosowanego składnika, jak i wzajemne proporcje pomiędzy danymi pierwiastkami. Relacje w pobieraniu makroskładników przez rośliny bobowate są następujące: N : P₂O₅ : K₂O : CaO : MgO : Na₂O jak 1,70 : 0,45 : 1,00 : 1,10 : 0,15 : 0,03 [Grzebisz 2011].

Celem opracowania jest przegląd najnowszych doniesień literatury krajowej i zagranicznej traktującej o znaczeniu wybranych makroelementów w uprawie roślin bobowatych grubonasiennych.

AZOT (N)

Azot jest składnikiem odżywczym potrzebnym roślinom w największych ilościach, a brak jego dostępności to główny czynnik ograniczający wzrost i rozwój roślin. Pierwiastek ten decyduje zarówno o plonie, jak i jego jakości [Kraiser i in. 2011, McAllister i in. 2012]. Azot bierze udział w wielu procesach fizjologicznych i metabolicznych. Ma też kluczowe znaczenie w budowie strukturalnej roślin, ponieważ jest głównym składnikiem białek, enzymów i kwasów nukleinowych [Maathuis 2009]. Pierwiastek ten jest także składnikiem chlorofilu, cytochromów, fitohormonów (np. cytokinin, auksyn) i niektórych witamin, wchodzi także w skład metabolitów wtórnych takich jak: alkaloidy, olejki gorczyczne, glikozydy cyjanogenne. Bierze udział w niemal wszystkich przemianach zachodzących w komórkach roślinnych. Jest składnikiem nukleotydów (ATP i ADP) odpowiedzialnych za magazynowanie i przenoszenie energii w komórkach. Zapewnia roślinie efektywne wykorzystanie promieniowania słonecznego oraz odpowiednią dynamikę wzrostu. W warunkach niedoboru N obserwuje się bladzielone zabarwienie lub żółknięcie starszych liści oraz zahamowanie wzrostu części nadziemnych i podziemnych roślin. Rośliny są wątłe, cienkie i chlorotyczne, słabiej wytwarzają pędy boczne lub redukują wytworzone zawiązki, rośliny słabiej kwitną, zawiązują strąki i nasiona, a w konsekwencji następuje obniżenie plonu [Leghari i in. 2016]. U większości roślin zapotrzebowanie na N jest największe w początkowym okresie wegetacji i zmniejsza się wraz z wiekiem rośliny. Dynamika akumulacji N w okresie wegetacji zależy od gatunku rośliny. Krytycznymi stadiami rozwojowymi dla roślin bobowatych grubonasiennych są: początek wzrostu wydłużeniowego oraz początek kwitnienia. Maksymalizacja kumulacji N zachodzi w początkowej fazie formowania strąków, natomiast w okresie pełnego wzrostu nasion następuje stabilizacja lub nawet zmniejszenie akumulacji tego pierwiastka.

Pod względem zapotrzebowania na N rośliny bobowate są zazwyczaj samowystarczalne dzięki symbiozie z bakteriami glebowymi, które wykazują zdolność do biologicznego wiązania N cząsteczkowego (atmosferycznego). Biologiczne wiązanie N (BNF – biological nitrogen fixation) przez rośliny bobowate pozwala im wiązać znaczne ilości N₂ atmosferycznego, co z kolei umożliwia zmniejszenie zużycia syntetycznych nawozów azotowych w ich uprawie oraz wpływa na poprawę warunków fizycznych gleby i różnorodność biologiczną [Rubiales i Mikič 2015, Mahmud i in. 2020]. Większość z tych bakterii należy do rodzaju *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium*, *Rhizobium* i *Sinorhizobium* [Fauvert i Michiels 2008, Andrews i Andrews 2017, Clúa i in. 2018]. Proces BNF polega na aktywacji N₂ z powietrza i redukcji go do amoniaku NH₃, który jest następnie w roślinie wbudowany w związki organiczne. O skutecznym przebiegu procesu

wiązania N atmosferycznego świadczy obecność leghemoglobiny o czerwonym zabarwieniu w brodawkach [Singh i Varma 2017, Ferguson i in. 2019]. Wiązanie N atmosferycznego przez rośliny bobowate jest procesem, który uzależniony jest od czynników glebowo-klimatycznych oraz od zabiegów agrotechnicznych [Vuong i in. 2016, Santachiara i in. 2019]. Do ważniejszych czynników agrotechnicznych wpływających na występowanie populacji bakterii *Rhizobium* należą: dostępność składników pokarmowych, odczyn gleby oraz częstotliwość uprawy roślin bobowatych na danym polu. Proces BNF może przynieść korzyści nie tylko roślinom bobowatym, ale także roślinom następczym, zmniejszając w ten sposób lub eliminując potrzebę stosowania nawozów azotowych [Mahmud i in. 2020]. BNF jest ograniczane nie tylko przez deficyt wody w glebie, długie okresy nasycenia gleby wodą, niskie i wysokie pH, zasolenie, ekstremalne temperatury, ale także przez wysoką dostępność N, w szczególności NO_3^- [Dimpka i in. 2009, Santachiara i in. 2019]. Rośliny bobowate wolą bowiem absorbować N mineralny z gleby niż wiązać go z atmosfery, ze względu na mniejszy koszt energetyczny. Wiązanie N na drodze symbiozy wiąże się z wysokimi kosztami dla roślin: bezpośrednie koszty produkcji energii, koszty redukcji N_2 do NH_3 , a także synteza białka i transport do części nadziemnej oraz koszty pośrednie związane z tworzeniem i utrzymywaniem brodawek korzeniowych. Szacowane koszty kształtują się w granicach $2,4 - 7,0 \text{ g C} \cdot \text{g}^{-1}$ związanego przez rośliny N_2 [Saari i Ludden 1987].

W uprawie roślin bobowatych grubonasiennych, w warunkach małej zawartości N w glebie, zaleca się stosowanie nawożenia tym składnikiem w tzw. dawce „startowej” $20 - 30 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$, przed rozpoczęciem wykształcania brodawek korzeniowych [McKenzie i in. 2001], natomiast nie stwierdzono korzyści ze stosowania dawki startowej N, gdy zasobność gleby w N była wysoka ($\geq 44 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ NO}_3^- \text{ N}$) [Huang i in. 2017]. Kocoń [2014] wskazuje, iż w warunkach Polski symbiotyczne wiązanie N_2 przez rośliny bobiku i grochu nie w pełni pokrywa ich potrzeby pokarmowe, w związku z tym zaleca się pogłównne nawożenie w łącznej ilości do $60 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$, szczególnie na glebach mniej zasobnych w ten składnik. Nawożenie N w czasie kwitnienia, stosowane w przypadku grochu, soi i fasoli, jest uzasadnione w sytuacji, gdy brodawki korzeniowe starzeją się lub jest ich mała liczba, a strąki są znaczącymi konkurentami dla węglowodanów. Bakterie brodawkowe wymagają bowiem ciągłego dostarczania węglowodanów, aby wytworzyć wymaganą energię i wychwytywać atmosferyczny N_2 [Carranca 2013]. W późniejszych fazach rozwojowych bardziej efektywne jest podanie N dolistnie niż doglebowo [Kocoń 2014]. Według Schweiger'a i in. [2012] jedynie $40 - 52\%$ całkowitego poboru N pochodzi z symbiotycznego wiązania N, a pozostała ilość tego składnika pokarmowego rośliny czerpią z gleby. Wykazano, że nawożenie przedsiewne soi azotem w dawce $30 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ przyczynia się do wzrostu zawartości w nasionach kwasów palmitynowego (C16:0), palmitooleinowego (C16:1) i nasyconych kwasów tłuszczowych (SFA) przy jednoczesnym zmniejszeniu zawartości kwasów stearynowego (C18:0), arachidowego (C20:0) oraz nienasyconych (UFA) i wielonienasyconych kwasów tłuszczowych (PUFA), natomiast podwyższenie dawki azotu do $60 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ nie powodowało oczekiwanych zmian, co może wskazywać na celowość stosowania jedynie dawki „startowej” [Szpunar-Krok i in. 2021]. W badaniach tych nasiona soi o korzystniejszej równowadze kwasów tłuszczowych dla celów żywieniowych uzyskano jednak pod wpływem wyższej dawki $60 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ [Szpunar-Krok i in. 2022]. Z kolei Głowacka i in. [2023], biorąc pod uwagę plon i skład chemiczny nasion soi, zaleca nawożenie $60 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ (w porcjach: $\frac{1}{2}$

lub $\frac{3}{4}$ przed siewem, a pozostałą część w okresie rozwoju strąków i nasion), w połączeniu z aplikacją siarki. Zgodnie z rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 12 lutego 2020 r. w sprawie przyjęcia „Programu działań mających na celu zmniejszenie zanieczyszczenia wód azotanami pochodzącymi ze źródeł rolniczych oraz zapobieganie dalszemu zanieczyszczeniu” (Dz. U. z 2020 r. poz. 243), w uprawie roślin bobowatych można zastosować do $30 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ N}$ w formie nawozów mineralnych i do $50 \text{ kg} \text{ N} \cdot \text{ha}^{-1}$ w formie nawozów naturalnych. Jadczyzsyn i in. [2010] zalecają ustalanie dawki N w zależności od prognozowanego plonu nasion (tab. 1).

Tabela 1. Zalecane dawki nawozów mineralnych ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) na glebach o średniej zawartości składników pokarmowych w zależności od prognozowanego plonu nasion wybranych gatunków roślin bobowatych grubonasiennych [Jadczyzsyn i in. 2010].

Table 1. Recommended doses of mineral fertilizers ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) on soils with an average content of nutrients depending on the expected yield of selected legume species [Jadczyzsyn et al. 2010].

Roślina Plant	Plon Yield ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$)	Azot Nitrogen (N)	Fosfor Phosphorus (P_2O_5)	Potas Potassium (K_2O)	Magnez Magnesium (MgO)
Bobik Horse beans	3,0	20	40	55	10
	4,0	20	55	70	10
	5,0	20	65	90	10
Groch Pea	2,5	20	25	30	0
	3,0	20	30	35	10
	3,5	20	35	40	10
Łubin żółty Yellow lupin	1,0	0	15	15	0
	1,5	0	25	25	0
	2,0	0	30	30	0
Łubin wąskolistny Narrow-leafed lupin	2,0	0	30	30	0
	3,0	0	45	45	10
	4,5	0	70	70	10
Mieszanki zbożowo- strączkowe na ziarno Cereal and legume mixtures for grain	2,5	30	20	20	5
	3,5	40	30	30	10
	4,5	60	40	35	15

FOSFOR (P)

Rośliny zaangażowane w BNF są szczególnie wrażliwe na niedobory P, K i S. Te składniki odżywcze mogą bezpośrednio wpływać na BNF poprzez modulowanie wzrostu ryzobii, tworzenia się i funkcjonowania brodawek korzeniowych lub pośrednio wpływając na wzrost rośliny żywicielskiej [Divito i Sadras 2014].

Niska dostępność P jako podstawowego makroskładnika pokarmowego roślin w większości gleb poważnie ogranicza produkcję roślinną [Nesme i in. 2014]. P jest obecny w strukturze molekularnej roślin, ułatwia transformację energii oraz reguluje aktywność reakcji enzymatycznych zachodzących w roślinie. Jest składnikiem nukleotydów wchodzących w skład DNA i RNA oraz nukleotydów ATP i ADP odpowiedzialnych za magazynowanie i przenoszenie energii w komórkach. Te wysokoenergetyczne związki fosforanowe kontrolują procesy zachodzące w roślinach bobowatych, w tym

fotosyntezę, oddychanie, syntezę kwasów nukleinowych oraz tworzenie białek i komórek roślinnych poprzez transport składników odżywczych [Mitran i in. 2018 za Nesme i in. 2014, Meena i in. 2018]. Fosfor jest składnikiem nukleotydów transportujących kation wodoru (H^+) i elektrony (NAD, NADP) w fotosyntezie i oddychaniu [Cabeza i in. 2014]. U roślin bobowatych P stymuluje rozwój systemu korzeniowego, zwiększa wytrzymałość łodyg w fazie rozwoju wegetatywnego roślin oraz odporność na choroby powodowane przez zgniliznę korzeni, wpływa na wielkość plonu oraz wcześniejsze dojrzewanie nasion [Mitran i in. 2018]. Sulieman i Tran [2015] oraz Korir i in. [2017] odnotowali, że P wpływa na wcześniejsze tworzenie aktywnych brodawek, zwiększa ich rozmiar i liczbę oraz poprawia ilość przyswajalnego N w brodawkach na jednostkę masy. Ograniczona dostępność P w glebie prowadzi do słabego wzrostu i rozwoju roślin bobowatych grubonasiennych. Niedobór P ma negatywny wpływ na tworzenie się brodawek korzeniowych i proces BNF. Badania Rotaru i Sinclair [2009] wykazały istotną korelację między stężeniem P w brodawkach korzeniowych, a wiązaniem N_2 w procesie BNF. Niedobór P u roślin objawia się zwykle zmianą barwy liści z niebieskozielonej na ciemnozieloną, czasem z purpurowym odcieniem, objawy te można zaobserwować również na starszych liściach. Silniejszą reakcją na niedobory P wykazuje łubin żółty niż bobik i groch [Wiwart i in. 2009].

Do zaspokojenia potrzeb upraw wystarczy zastosowanie 30–35 $kg \cdot ha^{-1} P_2O_5$ na glebach ubogich w P [Lafond i Pageau 2010]. Wykazano, że rośliny bobowate grubonasienne mogą rozpuszczać i pobierać umiarkowanie labilny P, jak również labilny P w glebie poprzez wydzielanie kwasów organicznych i fosfomonoesterazy [Nuruzzman i in. 2006, Ma i in. 2021]. Aby zwiększyć rozpuszczalność fosforu w ryzosferze, łubin biały wydziela do gleby cytryniany, a ciecierzycza wydziela meloniany [Podleśna 2019]. Dla warunków Polski dawki P dla wybranych gatunków roślin bobowatych grubonasiennych, w zależności od kompleksu glebowego i zasobności gleby w ten składnik, dla grochu wahają się od 15 do 80 $kg P_2O_5 \cdot ha^{-1}$ [Strażyński i Mrówczyński 2016], dla bobiku od 20 do 115 $kg P_2O_5 \cdot ha^{-1}$ [Strażyński i Mrówczyński 2016], dla łubinu żółtego i wąskolistnego od 0 do 60 $kg P_2O_5 \cdot ha^{-1}$, a dla białego od 15 do 70 $kg P_2O_5 \cdot ha^{-1}$ [Krawczyk i Mrówczyński 2012]. W przypadku soi zaleca się, w zależności od kategorii agronomicznej gleby, od 10,0 $kg P_2O_5 \cdot ha^{-1}$ na glebach bardzo lekkich do 14,5 $kg P_2O_5 \cdot ha^{-1}$ na glebach ciężkich [Filoda i Mrówczyński 2016]. Nawożenia P nie należy stosować, gdy jego zawartość w glebie przekracza 40 $mg P_2O_5 \cdot 100 g^{-1}$ (80 $mg P_2O_5 \cdot 00 g^{-1}$ w glebach węglanowych). Dotyczy to stosowania zarówno nawozów mineralnych, jak i naturalnych (zwłaszcza gnojowicy) oraz innych substancji użyźniających o dużej zawartości fosforu (np. osady ściekowe) [Jadczyszyn i in. 2010]. Planując nawożenie, należy mieć również na uwadze prognozowany plon nasion (tab. 1).

POTAS (K)

Potas występuje jako jon K^+ , nie tworząc połączeń organicznych. W roślinach składnik ten pełni ważne funkcje fizjologiczne i metaboliczne, a jego dostępność może wpływać na tolerancję na stresy biotyczne i abiotyczne.

Funkcje K w roślinie obejmują [Grzebisz 2004]:

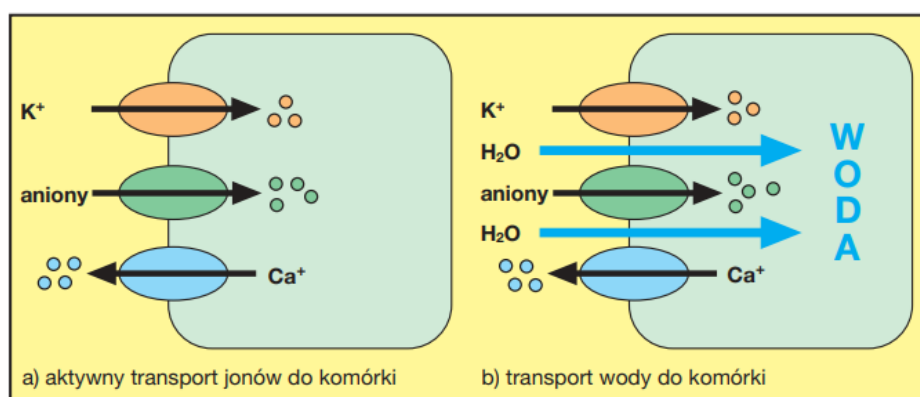
1. procesy osmotyczne: wzrost komórek merystematycznych, regulację cyklu dobowego pracy aparatów szparkowych,

2. aktywację enzymów roślinnych: fotosynteza, produkcja energii, pobieranie jonów z gleby, synteza węglowodanów, białek, tłuszczów, akumulacja związków organicznych w organach zapasowych,

3. transport jonów i składników organicznych w ksylemie,

4. transport związków organicznych i nieorganicznych we floemie.

Grzebisz [2004] podaje, że najbardziej wrażliwy na niedobór K, silnie zależny od stężenia jonów K^+ w komórce, jest wzrost komórek merystematycznych. Najważniejsze procesy obejmują: regulację potencjału osmotycznego komórki merystematycznej, usuwanie protonów (H^+) z cytoplazmy do apoplastu i aktywację enzymów odpowiedzialnych za syntezę białek. Rolę K w procesie osmozy przedstawia ryc. 1.



Ryc. 1. Rola K w procesie osmozy [Grzebisz 2004]: a) wtórny ruch kationów, głównie K^+ , z apoplastu do komórki; b) wzrost koncentracji jonów K^+ w wakuoli wywołuje osmotyczny przepływ wody, prowadząc do wzrostu rozmiarów komórki

Fig. 1. The role of K in the osmosis process [Grzebisz 2004]: a) secondary movement of cations, mainly K^+ , from the apoplast to the cell; b) an increase in the concentration of K^+ ions in the vacuole causes an osmotic flow of water, leading to an increase in cell size.

Potas odgrywa znaczącą rolę regulacyjną w wielu procesach fizjologicznych roślin, a mianowicie kiełkowaniu nasion i wschodach, reguluje funkcjonowanie aparatów szparkowych, transport składników pokarmowych, syntezę białek, fotosyntezę, transfer energii, osmoregulację, aktywację enzymów, równowagę składników odżywczych i odporność na stres [Ahmad i Maathuis 2014], co ostatecznie zwiększa plon i poprawia jakość nasion [Zorb i in. 2014, Lu i in. 2016]. Ponadto K pomaga w transporcie wody i przenoszeniu związków mineralnych w całej roślinie przez ksylem. W warunkach ograniczonej ilości dostępnej wody, jony K^+ usuwane są z komórek szparkowych, a pory się zamykają. W efekcie tego procesu ograniczone zostają straty wody z rośliny [Grzebisz 2004]. Dos Santos Cotrim i in. [2023] wykazali, że u soi w odpowiedzi na dostępność K^+ regulowanych jest 19 szlaków metabolicznych, w tym najsilniej szlak biosyntezy izoflawonoidów. W warunkach bardzo małej dostępności K^+ rośliny soi gromadziły w młodych i starych liściach Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} i B. Nawożenie K poprawia u soi stabilność mechanizmów fotosyntetycznych, zapobiegając zniszczeniu fotosystemu II (PSII) na skutek nadmiernie pochłoniętej energii słonecznej [Wang i in. 2015].

W przypadku zbyt małej podaży K, przemieszczanie się jonów NO_3^- , PO_4^{3-} , Ca^{2+} i Mg^{2+} jest ograniczone [Martineau i in. 2017, Wang i Wu 2017]. Przy niedoborach K rośliny wykazują zahamowany wzrost, występowanie chlorotycznych plam, początkowo pomiędzy nerwami liści, później przechodzących od krawędzi liści w kierunku nerwu głównego i żółknięcie krawędzi liści. Objawy pojawiają się najpierw na starszych liściach. Wiwart i in. [2009] wykazali silniejszą reakcję bobiku na niedobór K niż grochu siewnego i łubinu żółtego. Częstymi objawami niedoboru K u roślin jest słaby system korzeniowy, wyleganie i zmniejszenie poziomu plonowania. Brak nawożenia K zwiększa podatność roślin na różne choroby i inwazję szkodników oraz czyni je podatnymi na uszkodzenia w różnych warunkach stresu [Wang i in. 2013]. W efekcie niedoboru jonów K^+ następuje zakłócenie transportu elektronów w procesie fotosyntezy. Niedobór tego pierwiastka zwiększa aktywność oksydaz NADPH, które aktywują syntezę aktywnych rodników tlenowych, jak anion ponadtlenkowy (O_2^-), nadtlenek wodoru (H_2O_2), tlen singletowy ($^1\text{O}_2$), rodnik hydroksylowy (OH^\cdot). Obecność tych reaktywnych form tlenu (ROS) może prowadzić do destrukcji komórek liścia, których zewnętrznym objawem są chlorozy i nekrozy (tzw. poparzenia). Pierwszym objawem niedoboru potasu jest zahamowanie szybkości wzrostu najmłodszych organów rośliny. W odniesieniu do zawartości K w całej roślinie przyjmuje się, że zjawisko to zachodzi przy zawartości K poniżej 1,0% s.m. Zawartość K w nasionach roślin bobowatych jest wyższa niż P, Ca, Mg i Na, a jego akumulacja zależy od gatunku rośliny. W przypadku bobowatych jadalnych, w kolejności malejącej zawierają go nasiona bobu, fasoli, ciecierzycy, grochu i soczewicy (tab. 2).

Tabela 2. Średnia zawartość składników mineralnych w nasionach ($\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) wybranych gatunków roślin bobowatych grubonasiennych [Kotecki 2020 za Pokorny i Dostalova 1996]
Table 2. Average content of minerals in the seeds ($\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) of selected legume species [Kotecki 2020 after Pokorny and Dostalova 1996]

Gatunek Species	Fosfor Phosphorus	Potas Potassium	Wapń Calcium	Magnez Magnesium
Bób/ Broad bean	373	1503	98	215
Ciecierzycza/Chickpea	366	1044	165	203
Fasola/Beans	427	1476	117	152
Groch jadalny/ Edible peas	348	992	38	136
Soczewica/Lentils	409	970	59	181

Jako makroskładnik K jest najczęściej stosowany doglebowo. W formie oprysku dolistnego K zaleca się stosować szczególnie na glebach piaszczystych [Sarkar i Malik 2001] lub podmokłych [Ashraf i in. 2011]. Optymalne nawożenie roślin K pomaga złagodzić efekt deficytu wody poprzez lepszą efektywność wykorzystania wody. W przypadku roślin bobowatych nawożenie K decyduje także o powodzeniu procesu brodawkowania [Divito i Sadras 2014]. Do zaspokojenia potrzeb roślin wystarczy zastosowanie $50 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$ na glebach o umiarkowanym poziomie K ($201\text{--}400 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ K}$) [Lafond i Pageau 2010]. Przy średnim plonie nasion grochu wynoszącym $3\text{--}4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ zalecana dawka K powinna wynosić $80\text{--}100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ [Czuba 2001], natomiast w warunkach niskiej zawartości przyswajalnego K w glebie istotnie najwyższe plony nasion grochu polnego oraz najwyższy pobór N w nasionach, słomie i strąkach, Symanowicz i in.

[2017] uzyskali przy dawce K wynoszącej $124 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Wyższy plon nasion grochu siewnego można uzyskać, stosując siarczanową formę nawozu potasowego [Stępień i in. 2009]. Krytyczne fazy związane z reakcją bobowatych na K przypadają od momentu wykształcenia przez rośliny drugiego liścia do pełni kwitnienia pędu głównego. W fazie wzrostu wydłużeniowego rośliny pobierają go z całej warstwy gleby przerośniętej korzeniami, nie tylko z warstwy ornej [Grzebisz 2008]. Rośliny uprawne w większym stopniu pobierają K z rezerw zakumulowanych w całej strefie ukorzenienia niż z bieżącego stosowania nawozu [Gaj 2018].

Ustalając dawki K dla roślin bobowatych grubonasiennych w warunkach Polski, w zależności od kompleksu glebowego i jego zasobności w glebie dawki K wynoszą: dla grochu $20\text{--}135 \text{ kg K}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1}$ [Strażyński i Mrówczyński 2016], dla bobiku $30\text{--}130 \text{ kg K}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1}$ [Strażyński i Mrówczyński 2016], dla łubinu żółtego i wąskolistnego od $0\text{--}70 \text{ kg K}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1}$, a dla białego $30\text{--}70 \text{ kg K}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1}$ [Krawczyk i Mrówczyński 2012]. Dla soi zaleca się dawki K w ilości od $10,0 \text{ kg K}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1}$ na glebach bardzo lekkich do $17,5 \text{ kg K}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1}$ na glebach ciężkich [Filoda i Mrówczyński 2016]. Zdaniem Jadczyńskich i in. [2010] nawożenie K można zaniechać, jeśli zawartość tego pierwiastka w glebie jest większa niż: $35 \text{ mg K}_2\text{O} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ w glebach bardzo lekkich, $40 \text{ mg K}_2\text{O} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ w glebach lekkich, $50 \text{ mg K}_2\text{O} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ w glebach średnich i $60 \text{ mg K}_2\text{O} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ w glebach ciężkich. Ustalając dawki K w uprawie bobowatych, zaleca się brać pod uwagę także jednostkowe pobranie tego składnika na wytworzenie 1 tony nasion (tab. 1).

SIARKA (S)

Ważną rolę w nawożeniu roślin, w tym bobowatych, spełnia także siarka. Jest ona głównym składnikiem metioniny i cysteiny, aminokwasów niezbędnych do wzrostu roślin, odgrywających rolę w syntezie enzymów, szczególnie związanych z metabolizmem N (reduktaza azotanowa, azotaza) [Droux 2004]. Uczestniczy w biologicznej redukcji N cząsteczkowego [Scherer i in. 2008, Barczak i in. 2013a]. Kluczowe znaczenie w procesie wiązania azotu przez bakterie brodawkowe odgrywiają ferredoksyna i nitrogenaza, które zawierają klastery metalosiarkowe: żelazo-siarkowy i molibdeno-żelazo-siarkowy [Barczak 2010 za Kopcewicz i Lewak 2005]. S może wpływać na biologiczne wiązanie N poprzez modulowanie wzrostu i funkcji brodawek korzeniowych lub wpływając na wzrost rośliny żywicielskiej. Niedobór S ogranicza efektywność biologicznego wiązania N w roślinach bobowatych poprzez zmniejszenie stężenia ferredoksyny i leghemoglobiny oraz podaży ATP [Pacyna i in. 2006]. Niedobór S prowadzi do zmniejszenia wykorzystania N z nawozów. Bobowate zalicza się do grupy roślin o stosunkowo dużym zapotrzebowaniu na S [Jakubus 2006, Sulieman i in. 2010]. Dla roślin bobowatych grubonasiennych, w zależności od gatunku i warunków klimatyczno-glebowych, zalecana dawka stosowania waha się od 20 do $60 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$ [Głowacka i in. 2023]. Badania potwierdzają korzystny wpływ S na plonowanie łubinu wąskolistnego [Barczak i in. 2013a], bobu [Pacyna i in. 2006], ciecierzycy [Islam i in. 2012]. W badaniach Głowackiej i in. [2019] stwierdzono, że nawożenie S, niezależnie od metody aplikacji doglebowej czy nalistnej, wpłynęło na wzrost plonu nasion fasoli zwykłej (o 14,5%) i zawartość białka (o $0,63 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$). Ponadto wpłynęła ona na poprawę wartości biologicznej białka poprzez zwiększenie zawartości metioniny (o $0,92 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

i cysteiny (o $0,42 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$). Barłóg i in. [2014] stwierdzili natomiast brak istotnego wpływu nawożenia S na plon bobiku i zawartość tego pierwiastka w nasionach. Zdaniem Klikockiej i in. [2016] wysoką efektywność nawożenia S można osiągnąć na glebach charakteryzujących się deficytem tego pierwiastka. Również w uprawie łubinu wąskolistnego na glebie o niskiej zasobności zastosowanie S dodatnio wpływało na wielkość plonu nasion i słomy [Barczak i in. 2013a] oraz zawartość tłuszczu w nasionach i jego plon [Barczak i in. 2013b], a aplikacja dolistna okazała się korzystniejsza niż zastosowanie doglebowe. Największy przyrost masy plonu nasion oraz liczby nasion w strąku uzyskano, stosując dawkę $40 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$, największy przyrost masy tysiąca nasion i liczby strąków na roślinie osiągnięto pod wpływem dawki $20 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ [Barczak i in. 2013a], a największą zawartość tłuszczu w nasionach i plon tłuszczu pod wpływem dawki $60 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ [Barczak i in. 2013b]. Z kolei Głowacka i in. [2019] w uprawie fasoli zwykłej lepsze efekty uzyskali, aplikując S dolistnie w dawce $50 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ w formie kizerytu $\text{MgSO}_4\cdot 7 \text{ H}_2\text{O}$ ($\frac{1}{2}$ dawki w fazie BBCH 15–17 i $\frac{1}{2}$ dawki w fazie BBCH 51–55) niż doglebowo przed siewem nasion. Najkorzystniejsze efekty uzyskano pod wpływem nawożenia S + Mo. Jednorazowa dawka S nie powinna przekraczać $20 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ [Barczak i in. 2013a]. W uprawie soi wielu autorów [Dhaker i in. 2010, Głowacka i in. 2023] zaleca dawkę $40 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$. Wpływa ona na istotny wzrost plonu nasion oraz wartości cech kształtujących plon.

Nawożenie S stosuje się często w formie nawozów wieloskładnikowych. Planując nawożenie S, należy mieć na uwadze, że znaczące ilości tego pierwiastka towarzyszą innym składnikom pokarmowym w nawozach. Najbardziej popularne nawozy mineralne zawierają następujące ilości S (w przeliczeniu na formę pierwiastkową): siarczan amonowy – 24% S, superfosfat prosty pylisty – 11,5–14% S, siarczan potasowy – 17% S, sól potasowa (40% K_2O) – 2% S, Kalimagnezja – 18% S, Kainit – do 7% S [Jadczyzyn i in. 2010].

MAGNEZ (MG)

Magnez odgrywa ważną rolę w wielu procesach biochemicznych i fizjologicznych wpływających na wzrost i rozwój roślin. Jest podstawowym składnikiem cząsteczki chlorofilu, biorącego udział w procesie fotosyntezy, aktywatorem enzymów w syntezie kwasów nukleinowych (DNA i RNA), odgrywa istotną rolę w syntezie węglowodanów, reguluje pobieranie innych niezbędnych pierwiastków, służy jako nośnik związków fosforanowych w całej roślinie [Guo i in. 2016, Adnan i in. 2021]. Około 75% Mg w liściach bierze udział w syntezie białek, a 15–20% całkowitego Mg związane jest z pigmentami chlorofilowymi [White i Broadley 2009], działając głównie jako kofaktor szeregu enzymów biorących udział w fotosyntetycznym wiązaniu C i metabolizmie [Hermans i in. 2013]. Ponadto Mg jest uważany za ważny dla pobierania N i efektywności jego wykorzystania przez rośliny [Grzebisz 2013]. Rośliny reagują na niedobór Mg znacznym zmniejszeniem tempa asymilacji netto CO_2 , w rezultacie zmniejsza się tempo tworzenia biomasy. Ograniczona asymilacja przy niedoborze Mg zwiększa stres oksydacyjny, ponieważ elektrony i energia wzbudzenia niewykorzystane w fotosyntezie indukują nadmierną produkcję ROS w komórkach, co z kolei powoduje zwiększenie aktywności układu antyoksydacyjnego, w tym enzymów detoksykujących ROS [Hauer-

Jákli i Tränkner 2019]. Konsekwencją niedoborów Mg jest również upośledzony wzrost korzeni w stosunku do pędów wskutek hamowania transportu sacharozy z liści do korzeni [Farhat i in. 2016]. Gdy Mg jest dostępny w bardzo wczesnych fazach wzrostu, stosunek pędu do korzenia nie jest zaburzony, nawet gdy rośliny odczuwają jego niedobór w późniejszym okresie. Gatunki roślin bobowatych grubonasiennych (np. soja i orzech ziemny) mają wyższe krytyczne stężenia Mg w liściach niezbędne dla prawidłowego wzrostu i przebiegu procesu fotosyntezy (0,2–0,3% s.m.) niż rośliny jednoliścienne (0,1–0,2% s.m.) [Tränkner i in. 2016].

Ze względu na małą powłokę hydratacyjną Mg^{2+} jego adsorpcja na cząstkach gleby jest stosunkowo słaba, co powoduje wysoki stopień wymywania. Z tego powodu niedobór Mg^{2+} w glebach jest powszechny [Deng i in. 2006], szczególnie na glebach piaszczystych, na których ulega utlenieniu i staje się niedostępny dla roślin oraz zostaje wymywany [Rady i Osman 2010]. Niedobór Mg objawia się chlorozą starszych liści, a następnie ich żółknięciem. Na podstawie cyfrowej analizy zmiany wybarwienia liści Wiwart i in. [2009] wykazali silniejszą reakcję bobiku, grochu i łubinu żółtego na niedobory N i Mg niż P i K.

Negatywny wpływ niedoboru Mg można zmniejszyć poprzez jego aplikację dolistną. W badaniach Howladara i in. [2014] nawożenie dolistne Mg istotnie wpłynęło na wzrost plonu zielonych strąków i nasion grochu siewnego oraz skład chemiczny nasion. Nawożenie Mg łączy się najczęściej z zabiegiem wapnowania, gdyż gleby zakwaszone często charakteryzują się małą lub bardzo małą zawartością Mg [Jadczyzyn i in. 2010].

Dawki nawozów zawierających Mg stosowanych w uprawie roślin bobowatych grubonasiennych na glebach o średniej zawartości składników pokarmowych, w zależności od poziomu plonowania, zamieszczono w tabeli 1.

PODSUMOWANIE

Przedstawiony przegląd prac badawczych pokazuje znaczenie N, P, K, Mg i S dla bobowatych grubonasiennych oraz ich rolę w procesach życiowych roślin. W pracy wykazano, że niedobory składników pokarmowych są ważnym czynnikiem ograniczającym produkcję roślin bobowatych grubonasiennych, bowiem mogą one wpływać negatywnie na różne procesy biologiczne, fizjologiczne i metaboliczne, m.in. na biologiczne wiązanie N poprzez hamowanie wzrostu brodawek korzeniowych i aktywności bakterii symbiotycznych, jak też wzrostu roślin. Planując dawki nawożenia w uprawie roślin bobowatych, należy mieć na względzie możliwość poprawy symbiotycznego wiązania N. Źródłem składników odżywczych mogą być stosowane doglebowo nawozy mineralne, naturalne lub organiczne. W celu uzupełnienia niedoborów poszczególnych pierwiastków w roślinie można zalecać ich dolistną aplikację. Dokarmianie dolistne nie wykazuje długotrwałego efektu nawozowego, dlatego należy je stosować kilkukrotnie, w krytycznych fazach rozwojowych roślin, a ilość dostarczanego składnika pokarmowego powinna być dostosowana do stanu odżywienia roślin i zasobności gleby.

PIŚMIENNICTWO

- Adnan M., Tampubolon K., ur Rehman F., Saeed M. S., Hayyat M. S., Imran M., Tahir R., Mehta J., 2021. Influence of foliar application of magnesium on horticultural crops: A review. *Agri-nula: J. Agroteknologi Dan Perkebunan* 4(1), 13–21. <https://doi.org/10.36490/agri.v4i1.109>
- Ahmad I., Maathuis F.J., 2014. Cellular and tissue distribution of potassium: physiological; relevance, mechanisms and regulation. *J. Plant Physiol.* 171(9), 708–714. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.10.016>
- Andrews M., Andrews M.E., 2017. Specificity in legume-rhizobia symbioses. *Int. J. Mol. Sci.* 18(4), 705. <https://doi.org/10.3390/ijms18040705>
- Ashraf M.A., Ahmad M.S.A., Ashraf M., Al-Qurainy F., Ashraf M.Y., 2011. Alleviation of waterlogging stress in upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) by exogenous application of potassium in soil and as a foliar spray. *Crop Pasture Sci.* 62(1), 25–38. <https://doi.org/10.1071/CP09225>
- Barczak B., 2010. Siarka jako składnik pokarmowy kształtujący wielkość i jakość plonów wybranych roślin uprawnych. Rozprawy nr 144, Wyd. Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz, ss. 131.
- Barczak B., Nowak K., Knapowski T., Ralcewicz M., Kozera W., 2013a. Reakcja łubinu wąskolistnego (*Lupinus angustifolius* L.) na nawożenie siarką. Cz. I. Plon oraz wybrane elementy jego struktury. *Fragm. Agron.* 30(2), 23–34.
- Barczak B., Nowak K., Kozera W., Knapowski T., Ralcewicz M., 2013b. Reakcja łubinu wąskolistnego (*Lupinus angustifolius* L.) na nawożenie siarką. Cz. II. Zawartość i plon tłuszczu w nasionach. *Fragm. Agron.* 30(2), 35–41.
- Barłóg P., Niewiadomska A., Ambroży-Dereęwska K., 2014. Effect of sulphur fertilisation on seed yield and yield components of broad bean on the background of different levels of potassium content in soil. *Fragm. Agron.* 31(2), 7–17.
- Bergmann W., 1992. Nutritional disorders of plants. Verlag Gustav Fisher, Jena, 741.
- Cabeza R., Koester B., Liese R., Lingner A., Baumgarten V., Dirks J., Salinas-Riester G., Pommerenke C., Dittert K., Schulze J., 2014. An RNA sequencing transcriptome analysis reveals novel insights into molecular aspects of the nitrate impact on the nodule activity of *Medicago truncatula*. *Plant Physiol.* 164(1), 400–411. <https://doi.org/10.1104/pp.113.228312>
- Carranca C., 2013. Legumes: Properties and symbiosis. W: A.H. Camisão, C.C. Pedrosa (red.), Symbiosis: evolution, biology and ecological effects. Animal Science, Issues and Professions, Nova Science Publishers, New York, 67–94.
- Clúa J., Roda C., Zanetti M.E., Blanco F.A., 2018. Compatibility between legumes and rhizobia for the establishment of a successful nitrogen-fixing symbiosis. *Genes* 9(3), 125. <https://doi.org/10.3390/genes9030125>
- Czuba R., 2001. Znaczenie potasu w polskim rolnictwie. International Potash Institute, Basel, Switzerland, ss. 40, <https://docplayer.pl/9736798-Znaczenie-potasu-w-polskim-rolnictwie.html> [dostęp: 28.11.2022].
- Deng W., Luo K.M., Li D.M., Zheng X.L., Wei X.Y., Smith W., Thammina C., Lu L.T., Li Y., Pei Y., 2006. Overexpression of an *Arabidopsis* magnesium transport gene, AtMGT1, in *Nicotiana benthamiana* confers Al tolerance. *J. Exp. Bot.* 57(15), 4235–4243. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl201>
- Dhaker S.C., Mundra S.L., Nepalia V., 2010. Effect of weed management and sulphur nutrition on productivity of soybean [*Glycine max* (L.) Merrill]. *Indian J. Weed Sci.* 42, 232–234. https://www.isws.org.in/IJWSn/File/2010_42_Issue-3&4_232-234.pdf [dostęp: 22.03.2023].
- Dimpka C., Weinand T., Asch F., 2009. Plant–rhizobacteria interactions alleviate abiotic stress conditions. *Plant Cell Environ.* 32(12), 1682–1694. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02028.x>

- Divito G.A., Sadras V.O., 2014. How do phosphorus, potassium and sulphur affect plant growth and biological nitrogen fixation in crop and pasture legumes? A meta-analysis. *Field Crops Res.* 156(1), 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.11.004>
- Droux M., 2004. Sulfur assimilation and the role of sulfur in plant metabolism: A survey. *Photosynth. Res.* 79, 331–348. <https://doi.org/10.1023/B:PRES.0000017196.95499.11>
- Fageria N.K., Barbosa Filho M.P., Moreira A., Guimarães C.M., 2009. Foliar fertilization of crop plants. *J. Plant Nutr.* 32, 1044–1064. <https://doi.org/10.1080/01904160902872826>
- Farhat N., Elkhouni A., Zorrigh W., Smaoui A., Abdelly C., Rabhi M., 2016. Effects of magnesium deficiency on photosynthesis and carbohydrate partitioning. *Acta. Physiol. Plant.* 38, 145. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2165-z>
- Fauvert M., Michiels J., 2008. Rhizobial secreted proteins as determinants of host specificity in the rhizobium-legume symbiosis. *FEMS Microbiol. Lett.* 285(1), 1–9. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2008.01254.x>
- Ferguson B.J., Mens C., Hastwell A.H., Zhang M., Su H., Jones C.H., Chu X., Gresshoff P.M., 2019. Legume nodulation: The host controls the party. *Plant Cell Environ.* 42(1), 41–51. <https://doi.org/10.1111/pce.13348>
- Fernández V., Brown P.H., 2013. From plant surface to plant metabolism: the uncertain fate of foliar-applied nutrients. *Front. Plant Sci.* 4, 289. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00289>
- Filoda G., Mrówczyński M. (red.), 2016. Metodyka integrowanej ochrony i produkcji soi dla doradców. Instytut Ochrony Roślin – PIB, Poznań, ss. 137.
- Gaj R., 2018. Precyzyjne nawożenie roślin uprawnych. Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie Oddział w Poznaniu. pp. 34.
- Głowacka A., Gruszecki T., Szostak B., Michałek S., 2019. The response of common bean to sulphur and molybdenum fertilization. *Int. J. Agron.* 2, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2019/3830712>
- Głowacka, A., Jariene, E., Flis-Olszewska, E., Kiełtyka-Dadasiewicz, A., 2023. The effect of nitrogen and sulphur application on soybean productivity traits in temperate climates conditions. *Agronomy* 13(3), 780. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030780>
- Grzebisz W., 2004. Potas w roślinie. W: W. Grzebisz (red.), Potas w produkcji roślinnej. International Potash Institute Basel/Switzerland, Akademia Rolnicza w Poznaniu, 13–22.
- Grzebisz W., 2008. Nawożenie roślin uprawnych. T. 2. Nawozy i systemy nawożenia. PWRiL, Poznań.
- Grzebisz W., 2011. Technologie nawożenia roślin uprawnych – fizjologia plonowania. T. 1. Oleiste, okopowe i strączkowe. PWRiL, Poznań.
- Grzebisz W., 2013. Crop response to magnesium fertilization as affected by nitrogen supply. *Plant Soil* 368, 23–39. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1574-z>
- Guo W., Nazim H., Lianga Z., Yanga D., 2016. Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. *Crop J.* 4(2), 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2015.11.003>
- Hauer-Jákli M., Tränkner M., 2019. Critical leaf magnesium thresholds and the impact of magnesium on plant growth and photo-oxidative defense: A systematic review and meta-analysis from 70 years of research. *Front. Plant Sci.* 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00766>
- Hermans C., Conn S.J., Chen J., Xiao Q., Verbruggen N., 2013. An update on magnesium homeostasis mechanisms in plants. *Metallomics* 5(9), 1170–1183. <https://doi.org/10.1039/c3mt20223b>
- Howladar S.M., Osman A.S., Rady M.M., Al-Zahrani H.S., 2014. Magnesium foliar application and phosphorien soil inoculation positively affect *Pisum sativum* L. plants grown on sandy calcareous soil. *Int. J. Agric., Biosyst. Sci. Eng.* 8(5), 239–243. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1092231>
<https://rejestrupraw.arimr.gov.pl/>
- Huang J., Afshar R.K., Tao A., Chen C., 2017. Efficacy of starter N fertilizer and rhizobia inoculant in dry pea (*Pisum sativum* Linn.) production in a semi-arid temperate environment. *Soil Sci. Plant Nutr.* 63(3), 248–253. <https://doi.org/10.1080/00380768.2017.1315834>

- Islam M., Mohsan S., Ali S., 2012. Effect of different phosphorus and sulfur levels on nitrogen fixation and uptake by chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Agrociencia* 46(1), 1–12. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952012000100001&script=sci_arttext&tang=en [dostęp: 28.11.2022].
- Jadczyzyn T., Kowalczyk J., Lipiński W., 2010. Zalecenia nawozowe dla roślin i uprawy polowej i trwałych użytków zielonych. Materiały szkoleniowe nr 95, Wyd. Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa-PIB w Puławach, ss. 23.
- Jakubus M., 2006. Siarka w środowisku. Wyd. AR Poznań, ss. 61.
- Kalaji H.M., Oukarroum A., Alexandrov V., Kouzmanova M., Brestic M., Zivcak M., Samborska I.A., Cetner M.D., Allakhverdiev S.I., Goltsev V., 2014. Identification of nutrient deficiency in maize and tomato plants by *in vivo* chlorophyll *a* fluorescence measurement. *Plant Physiol. Biochem.* 81, 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.03.029>
- Klikocka H., Cybulska M., Barczak B., Narolski B., Szostak B., Kobiałka A., Nowak A., Wójcik E., 2016. The effect of sulphur and nitrogen fertilization on grain yield and technological quality of spring wheat. *Plant Soil Environ.* 62, 230–236. <https://doi.org/10.17221/18/2016-PSE>
- Kocoń A., 2014. Nawożenie roślin strączkowych. *Stud. Rap. IUNG-PIB* 37(11), 127–137. <https://doi.org/10.26114/sir.iung.2014.37.10>.
- Korir H., Mungai N.W., Thuita M., Hamba Y., Masso C., 2017. Co-inoculation effect of rhizobia and plant growth promoting rhizobacteria on common bean growth in a low phosphorus soil. *Front. Plant Sci.* 8, 141. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00141>
- Kotecki A., 2020. Zagadnienia ogólne. W: A. Kotecki (red.), *Uprawa roślin*, t. 3, 21–42.
- Kraiser T., Gras D.E., Gutiérrez A.G., González B., Gutiérrez R.A., 2011. A holistic view of nitrogen acquisition in plants. *J. Exp. Bot.* 62, 4, 1455–1466, <https://doi.org/10.1093/jxb/erq425>
- Krawczyk R., Mrówczyński M. (red.), 2012. *Metodyka integrowanej ochrony łubinu wąskolistnego, żółtego i białego*. Instytut Ochrony Roślin – PIB, Poznań, ss. 132.
- Książak J., 2017. Reakcja grochu siewnego (*Pisum sativum*) na nawożenie mineralne i naturalne. *Fragm. Agron.* 34, 77–92.
- Lafond J., Pageau D., 2010. Phosphorus and potassium fertilization of dry pea. *Can. J. Plant Sci.* 90(5), 629–636. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20103292430>
- Leghari S.J., Wahocho N.A., Laghari G.M., Hafeez Laghari A., Mustafa Bhabhan G., Hussain Talpur K., Bhutto T.A., Wahocho S.A., Lashari A.A., 2016. Role of nitrogen for plant growth and development: A review. *Adv. Environ. Biol.* 10(9), 209–219. <https://www.slideshare.net/ShahJahanLaghariAgro/role-of-nitrogen-for-plant-growth-and-development-a-review> [dostęp: 07.10.2022].
- Li C., Wang P., Menzies N.W., Lombi E., Kopittke P.M., 2017. Effects of changes in leaf properties mediated by methyl jasmonate (MeJA) on foliar absorption of Zn, Mn and Fe. *Ann. Bot.* 120, 405–415. <https://doi.org/10.1093/aob/mcx063>
- Lu Z., Lu J., Pan Y., Lu P., Li X., Cong R., Ren T., 2016. Anatomical variation of mesophyll conductance under potassium deficiency has a vital role in determining leaf photosynthesis. *Plant Cell Environ.* 39(11), 2428–2439. <https://doi.org/10.1111/pce.12795>
- Ma X., Liu Y., Shen W., Kuzyakov Y., 2021. Phosphatase activity and acidification in lupine and maize rhizosphere depend on phosphorus availability and root properties: Coupling zymography with planar optodes. *Appl. Soil Ecol.* 167, 104029. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104029>
- Maathuis F.J.M., 2009. Physiological functions of mineral macronutrients. *Curr. Opin. Plant Biol.* 12(3), 250–258. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.04.003>
- Mahmud K., Makaju S., Ibrahim R., Missaoui A., 2020. Current progress in nitrogen fixing plants and microbiome research. *Plants* 9(1), 97. <https://doi.org/10.3390/plants9010097>

- Martineau E., Domec J.C., Bosc A., Denoroy P., Fandino V.A., Lavres Jr.J., Jordan-Meille L., 2017. The effects of potassium nutrition on water use in field-grown maize (*Zea mays* L.). *Environ. Exp. Bot.* 134, 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.11.004>
- McAllister C.H., Beatty P.H., Good A.G., 2012. Engineering nitrogen use efficient crop plants: the current status. *Plant Biotechnol. J.* 10(9), 1011–1025. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2012.00700.x>
- McKenzie R.H., Middleton A.B., Solberg E.D., De Mulder J., Flore N., Clayton G.W., Bremer E., 2001. Response of pea to rhizobia inoculation and starter nitrogen in Alberta. *Can. J. Plant Sci.* 81(4), 637–643. <https://doi.org/10.4141/P01-006>
- Meena B.L., Fagodiya R.K., Prajapat K., Dotaniya M.L., Kaledhonkar M.J., Sharma P.C., Meena R.S., Mitran T., Kumar S., 2018. Legume green manuring: an option for soil sustainability. W: R.S. Meena, A. Das, G. Singh Yadaw, R. Lal (red.), *Legumes for soil health and sustainable management*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0253-4_12
- Mitran T., Meena R.S., Lal R., Layek J., Kumar S., Datta R., 2018. Role of soil phosphorus on legume production. W: R.S. Meena, A. Das, G. Singh Yadaw, R. Lal (red.), *Legumes for soil health and sustainable management*, Springer, Singapore, 487–510. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0253-4_15
- Nesme T., Colomb B., Hinsinger P., Watson C., 2014. Soil phosphorus management in organic cropping systems: from current practices to avenues for a more efficient use of P resources. W: S. Bellon, S. Pervern (red.), *Organic farming, prototype for sustainable agricultures*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7927-3_2
- Niewiadomska A., Sulewska H., Wolna-Maruwka A., Ratajczak K., Waraczewska Z., Budka A., 2020. The influence of bio-stimulants and foliar fertilizers on yield, plant features, and the level of soil biochemical activity in white lupine (*Lupinus albus* L.) cultivation. *Agronomy* 10(1), 150. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010150>
- Nuruzzaman M., Lambers H., Bolland M.D.A., Veneklaas E.J., 2006. Distribution of carboxylates and acid phosphatase and depletion of different phosphorus fractions in the rhizosphere of a cereal and three grain legumes. *Plant Soil* 281, 109–120. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-3936-2>
- Oleksiak T., Bronisz D., 2021. Stan i perspektywy produkcji nasiennej roślin bobowatych grubonasiennych w Polsce. *Biul. IHAR-PIB* 296, 43–52. <https://doi.org/10.37317/biul-2021-0012>
- Pacyna S., Schulz M., Scherer H.W., 2006. Influence of sulphur supply on glucose and ATP concentrations of inoculated broad beans (*Vicia faba minor* L.). *Biol. Fertil. Soils* 42, 324–329. <https://doi.org/10.1007/s00374-005-0030-0>
- Podleśna A., 2019. Czynniki kształtujące pobieranie i wykorzystanie fosforu przez rośliny oraz jego straty z gleb uprawnych. *Stud. Rap. IUNG-PIB* 59(13), 59–76.
- Rady M.M., Osman A.S., 2010. Possibility of overcoming the adverse conditions for growth of bean plants in sandy calcareous soil by using bio-phosphorus-fertilizer and magnesium foliar applications. *Egypt. J. Hort.* 37, 85–101. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20193140720>
- Rotaru V., Sinclair T.R., 2009. Interactive influence of phosphorus and iron on nitrogen fixation by soybean. *Environ. Exp. Bot.* 66(1), 94–99. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2008.12.001>
- Rubiales D., Mikić A., 2015. Introduction: legumes in sustainable agriculture. *Crit. Rev. Plant Sci.* 34(1–3), 2–3. <https://doi.org/10.1080/07352689.2014.897896>
- Saari L.L., Ludden P.W., 1987. The energetic and energy cost of symbiotic nitrogen fixation. W: T. Kosuge, E.W. Nester (red.), *Plant microbe interactions*. T. 2. MacMillan Publ. Co., New York, USA.
- Salih H.O., 2013. Effect of foliar fertilization of Fe, B and Zn on nutrient concentration and seed protein of Cowpea *Vigna unguiculata*. *J. Agric. Vet. Sci.* 6(3), 42–46.

- Santachiara G., Salvagiotti F., Rotundo J.L., 2019. Nutritional and environmental effects on biological nitrogen fixation in soybean: A meta-analysis. *Field Crops Res.* 240, 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.05.006>
- dos Santos Cotrim, G., da Silva, D.M., da Graça, J.P., de Oliveira Junior A., de Castro C., Zocolo G.J., Lannes L.S., Hoffmann-Campo C.B., 2023. *Glycine max* (L.) mMerr. (Soybean) metabolome responses to potassium availability. *Phytochemistry* 205, 113472. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2022.113472>
- Sarkar R.K., Malik G.C., 2001. Effect of foliar spray of potassium nitrate and calcium nitrate on grasspea (*Lathyrus sativus* L.) grown in rice fallows. *Lathyrus Lathyrism Newsletter* 2, 47–48. https://www.clima.uwa.edu.au/__data/assets/pdf_file/0011/919640/Sarkar_RK.pdf [dostęp: 28.11.2022].
- Scherer H.W., Pacyna S., Spoth K.R., Schulz M., 2008. Low levels of ferredoxin, ATP and leghemoglobin contribute to limited N₂ fixation of peas (*Pisum sativum* L.) and alfalfa (*Medicago sativa* L.) under S deficiency conditions. *Biol. Fertil. Soils.* 44, 909–916. <https://doi.org/10.1007/s00374-008-0273-7>
- Schweiger P., Hofer M., Hartl W., Wanek W., Vollmann, J., 2012. N₂ fixation by organically grown soybean in Central Europe: Method of quantification and agronomic effects. *Eur. J. Agron.* 41, 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.01.011>
- Singh D.K., Singh A.K., Singh, M., Jamir Z., Srivastava O.P., 2014. Effect of fertility levels and micronutrients on growth, nodulation, yield and nutrient uptake by pea (*Pisum sativum* L.). *Legum. Res.* 37, 93–97. <https://doi.org/10.5958/J.0976-0571.37.1.014>
- Singh S., Varma A., 2017. Structure, function, and estimation of leghemoglobin. W: A. Hansen, D. Choudhary, P. Agrawal, A. Varma (red.), *Rhizobium biology and biotechnology*. Soil Biol. 50. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64982-5_15
- Stępień W., Rutkowska B., Szulc W., 2009. Wpływ stosowania różnych nawozów potasowych na plony i jakość roślin. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 538, 251–256.
- Strażyński P., Mrówczyński M. (red.), 2016. *Metodyka integrowanej ochrony i produkcji grochu dla doradców*. Instytut Ochrony Roślin – PIB, Poznań, ss. 150.
- Sulewska H., Niewiadomska A., Ratajczak K., Budka A., Panasiewicz K., Faligowska A., Wolna-Maruwka A., Dryjański L., 2020. Changes in *Pisum sativum* L. plants and in soil as a result of application of selected foliar fertilizers and biostimulators. *Agronomy* 10(10), 1558. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101558>
- Suliman S., Fischinger S.A., Gresshoff P.M., Schulze J., 2010. Asparagine as a major factor in the N-feedback regulation of N₂ fixation in *Medicago truncatula*. *Physiol. Plant.* 140(1), 21–31. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2010.01380.x>
- Suliman S., Tran L.S.P., 2015. Phosphorus homeostasis in legume nodules as an adaptive strategy to phosphorus deficiency. *Plant Sci.* 239, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.06.018>
- Symanowicz B., Kalembsa S., Becher M., Toczko M., Skwarek K., 2017. Effect of varied levels of fertilization with potassium on field pea yield and content and uptake of nitrogen. *Acta Sci. Pol. Agric.* 16(3), 163–173. <https://doi.org/10.37660/aspagr.2017.16.3.6>
- Szpunar-Krok E., Wondolowska-Grabowska A., 2022. Quality evaluation indices for soybean oil in relation to cultivar, application of N fertiliser and seed inoculation with *Bradyrhizobium japonicum*. *Foods* 11, 762. <https://doi.org/10.3390/foods11050762>
- Szpunar-Krok E., Wondolowska-Grabowska A., Bobrecka-Jamro D., Jańczak-Pieniążek M., Kotecki A., Kozak M., 2021. Effect of nitrogen fertilisation and inoculation with *Bradyrhizobium japonicum* on the fatty acid profile of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) seeds. *Agronomy* 11(5), 941. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050941>
- Tränkner M., Jákli B., Tavakol E., Geilfus C.M., Cakmak I., Dittert K., Senbayram M., 2016. Magnesium deficiency decreases biomass water-use efficiency and increases leaf water-use

- efficiency and oxidative stress in barley plants. *Plant Soil* 406, 409–423. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2886-1>
- Vuong H.B., Thrall P.H., Barrett L.G., 2016. Host species and environmental variation can influence rhizobial community composition. *J. Ecol.* 105(2), 540–548. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12687>
- Wang M., Zheng Q., Shen Q., Guo S., 2013. The critical role of potassium in plant stress response. *Int. J. Mol. Sci.* 14(4), 7370–7390. <https://doi.org/10.3390/ijms14047370>
- Wang X.G., Zhao X.H., Jiang C.J., Li C.H., Cong S., Wu D., Chen Y.Q., Yu H.Q., Wang C.Y., 2015. Effects of potassium deficiency on photosynthesis and photoprotection mechanisms in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). *J. Integr. Agric.* 14(5), 856–863. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(14\)60848-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60848-0)
- Wang Y., Wu W.H., 2017. Regulation of potassium transport and signaling in plants. *Curr. Opin. Plant Biol.* 39, 123–128. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2017.06.006>
- White P.J., Broadley M.R., 2009. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets – iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytol.* 182, 49–84. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02738.x>
- Wiwart M., Fordoński G., Żuk-Gołaszewska K., Suchowilska E., 2009. Early diagnostics of macronutrient deficiencies in three legume species by color image analysis. *Comput. Electron. Agric.* 65(1), 125–132. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.08.003>
- Zhang Z., Liao H., Lucas W.J., 2014. Molecular mechanisms underlying phosphate sensing, signaling, and adaptation in plants. *J. Integr. Plant Biol.* 56(3), 192–220. <https://doi.org/10.1111/jipb.12163>
- Zorb C., Senbayram M., Peiter E., 2014. Potassium in agriculture-status and perspectives. *J. Plant Physiol.* 171(9), 656–669. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.08.008>

Źródło finansowania: Instytut Nauk Rolniczych, Ochrony i Kształtowania Środowiska, Uniwersytet Rzeszowski.

Summary: Plants require a wide range of mineral nutrients that are involved in the biological, biochemical and physiological processes underlying their growth and development. Plants need relatively large amounts of N, P, K, S, Ca and Mg (>0.1% dry weight), and each of these macronutrients is necessary to complete the plant's life cycle. Balanced fertilization significantly improves the physiological, growth and yielding parameters, as well as the yield of legumes. This overview of research papers presents the importance of the more important macronutrients for legumes and the effects of their deficiency.

Key words: legumes, plant nutrition, mineral deficiencies

Otrzymano/Received: 24.11.2022
Zaakceptowano/Accepted: 24.04.2023