

Anna Podleśna

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

SIARKA – WAŻNY MAKROSKŁADNIK POKARMOWY*

Słowa kluczowe: chlorofil, białko, fotosynteza, plon, odporność na stresy, nawozy

Wstęp

Siarka, obok azotu, fosforu i potasu, jest jednym z głównych składników pokarmowych niezbędnych dla normalnego wzrostu roślin. Jej nieznaczny niedobór często pozostaje niezauważony, ale niska zawartość w glebach prowadzi do wielorakich zmian w metabolizmie roślin uprawnych. Uwidaczniają się one zmianami w zabarwieniu roślin oraz deformacjami w rozwoju ich organów wegetatywnych i generatywnych, a w konsekwencji znacznym spadkiem plonowania.

Praca przedstawia podstawowe informacje odnośnie siarki jako ważnego składnika w żywieniu roślin, które zebrano na podstawie tematycznej literatury krajowej i zagraniczną. Jej celem było przedstawienie głównych funkcji fizjologicznych siarki w roślinie i symptomów jej niedoboru, a także roli tego składnika w kształtowaniu wysokości i jakości plonu oraz w ochronie przeciwko chorobom i szkodnikom. Przedstawiono także najważniejsze nawozy siarkowe i główne zasady ich stosowania.

Potrzeby pokarmowe roślin odnośnie siarki

W ujęciu ogólnym zapotrzebowanie roślin na siarkę jest definiowane jako „minimalna dawka siarki pobrana i wykorzystana przez rośliny, która jest wystarczająca do uzyskania maksymalnego plonu, jego jakości i kondycji tych roślin”, wyrażone w kg siarki w plonie zebranym z ha powierzchni uprawy (3). Jednak w świecie roślin uprawnych potrzeby pokarmowe względem siarki są zróżnicowane. Zależą one w pierwszym rzędzie od gatunku i fazy rozwojowej oraz wielkości wytwarzanego plonu. Zapotrzebowanie na siarkę wynika także z jej obecności w wielu substancjach

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.2 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

roślinnych, tj. białko, glukozytolany, glutation, ferredoksyna czy specyficzne olejki eteryczne (np. w cebuli i czosnku) produkowane przez te rośliny. Biorąc pod uwagę wymienione czynniki, przyjęto, że pod względem wymagań w stosunku do siarki rośliny uprawne dzielą się na 3 grupy (27):

- rośliny o bardzo dużym zapotrzebowaniu na siarkę, pobierające 40–80 kg S z hektara, tj. rzepak, kapusta, gorczyca, rzodkiew, rzepa, czosnek i cebula.
- rośliny o dużym zapotrzebowaniu na siarkę, pobierające 30–40 kg S z hektara, do których zalicza się rośliny bobowate, a zwłaszcza lucernę i koniczynę. Stosunkowo wysokie wymagania tych roślin w stosunku do siarki wynikają z symbiozy z bakteriami wiążącymi azot atmosferyczny oraz z produkcji dużych ilości białka. Do tej grupy roślin należy także kukurydza potrzebująca dużo siarki ze względu na tworzenie znacznej biomasy.
- rośliny o stosunkowo niewielkim zapotrzebowaniu na siarkę, pobierające 15–25 kg S z hektara, tj. trawy łąkowe i pastwiskowe, zboża oraz ziemniaki.

W praktyce rolniczej wielkość pobrania tego składnika jest jednak ściśle uzależniona od zawartości siarki siarczanowej w glebie, przebiegu pogody (temperatura i opady), odczynu gleb, nawożenia i obecności innych jonów w środowisku glebowym. Pobranie siarki przez rośliny w Polsce jest generalnie małe, co wynika z niższego, w porównaniu z krajami Europy Zachodniej, poziomu plonów. Stąd średnie i wysokie pobranie siarki stwierdza się w rejonach Polski charakteryzujących się wysokim poziomem kultury rolnej. Wielkość zapotrzebowania głównych roślin uprawnych w warunkach naszego kraju przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Jednostkowe pobranie siarki przez rośliny uprawne w kg S·t⁻¹·m.plonu

Roślina	kg S·t ⁻¹	Roślina	kg S·t ⁻¹
Rzepak	20,00	Owies	3,75
Kukurydza	5,00	Jęczmień	3,75
Pszenica	4,50	Siano łąkowe	3,00
Pszenżyto	4,50	Buraki cukrowe	0,80
Żyto	4,00	Ziemniaki	0,50

Źródło: Grzebisz i Przygocka-Cyna, 2003 (8)

Rola plonotwórcza siarki

Wpływ siarki na wzrost i rozwój roślin uprawnych oraz ich końcowy plon wynika z jej wielorakich i niemożliwych do zastąpienia funkcji fizjologicznych. Wszelkie najważniejsze procesy fizjologiczno-biochemiczne mogą prawidłowo przebiegać w rosnącej roślinie tylko w sytuacji jej optymalnego zaopatrzenia w siarkę (19). Jest to specyficzny składnik, ponieważ pełni on dodatkowo rolę budulcową (białka i fotosynteza), zapewnia roślinie sprawne oddychanie (glutation) i funkcjonowanie enzymów (związanych z metabolizmem azotowym, tj. reduktaza azotanowa i nitrogenaza) oraz właściwe cechy jakościowe (białko, tłuszcz, smak i zapach),

a dodatkowo pełni funkcję ochronną względem stresów biotycznych (choroby grzybowe i szkodniki) oraz abiotycznych (chłód, susza).

Rzepak ozimy najbardziej, spośród roślin uprawnych, reaguje na nawożenie siarką. Doświadczenia polowe prowadzone w ostatnich latach w Polsce i innych krajach Europy wykazują wzrost plonu nasion rzepaku pod wpływem zastosowanej siarki, odpowiednio o 0,15–2,7 t·ha⁻¹. Plon nasion wzrasta na ogół po zastosowaniu dawek niższych, w zakresie 30–40 kg S·ha⁻¹. Dawki wyższe ocenia się jako za wysokie i często w takich obiektach obserwuje się wręcz spadek plonu nasion. Korzystne działanie nawożenia siarką wykazali Malarz i in. (13), którzy uzyskali wzrost plonu nasion rzepaku aż do dawki 90 kg S·ha⁻¹ (tab. 2).

Tabela 2

Plony nasion i elementy struktury plonu rzepaku ozimego nawożonego siarką

Nawożenie S (kg·ha ⁻¹)	Plon nasion (t·ha ⁻¹)	Liczba		Masa nasion w łuszczyńce (mg)	Masa 1000 nasion (g)
		łuszczyń na roślinie	nasion w łuszczyńce		
0	3,92	116	21,5	115,7	5,28
30	4,14	116	21,9	119,5	5,14
60	4,25	130	22,6	125,8	5,30
90	4,46	129	22,6	123,3	5,25
NIR ($\alpha = 0,05$)	0,13	7	0,4	4,0	0,08

Źródło: Malarz i in., 2011a,b (13, 14), zmodyfikowane

Zboża także reagują na nawożenie siarką przyrostem plonu ziarna, chociaż należą do grupy roślin o najmniejszym zapotrzebowaniu na ten składnik, a badania wskazują na zróżnicowaną ich reakcję na stosowane nawozy siarkowe. W ciągu trwania doświadczeń (20) notowano wzrost plonu ziarna pszenicy ozimej od 0,13 do 0,49 t·ha⁻¹. Nieco wyższe przyrosty stwierdzono u pszenicy jarej i wynosiły one 0,30–0,43 t·ha⁻¹ (20). Przyrost plonu zbóż wynika głównie ze wzrostu liczby kłosów na jednostce powierzchni i wzrostu liczby nasion z kłosa lub lepszego wypełnienia ziarna. Reakcja roślin na nawożenie siarką jest z reguły bardziej widoczna w warunkach większego jej deficytu i wyższych dawek nawozów azotowych.

Burak cukrowy jest zaliczany do grupy roślin o dużym zapotrzebowaniu na siarkę, chociaż nie zawiera specyficznych związków bogatych w ten składnik (9). Jednak w krótkim czasie wytwarza dużą biomasę, przez co wymaga sprawnego i wydajnego przebiegu fotosyntezy, która warunkuje wzrost roślin przez dostarczenie roślinom dużej puli asymilatów oraz wpływa na gromadzenie cukru w korzeniach. To z kolei wymaga odpowiedniej zawartości chlorofilu w liściach, którego produkcja jest możliwa przy właściwym zaopatrzeniu rośliny w siarkę. W efekcie burak cukrowy potrzebuje odpowiedniej ilości siarki dla zabezpieczenia swoich wymagań produkcyjnych.

Doświadczenie prowadzone przez Potarzyckiego i Lewicką (24) wykazało dużą zmienność plonów korzeni buraka oraz cukru biologicznego i technologicznego

uzależnioną od warunków termiczno-wilgotnościowych w okresie dużego zapotrzebowania roślin na składniki pokarmowe. Badania polowe ww. autorów (21) prowadzone na glebie średniej, na którą corocznie stosowano obornik wykazały, że największym działaniem plonotwórczym charakteryzował się nawóz zawierający w swoim składzie 20 kg S·ha⁻¹, na którym przeciętny plon korzeni był o 8% wyższy w porównaniu z obiektem z nawozem niewnoszącym siarki mineralnej.

Rola siarki w kształtowaniu cech jakościowych płodów rolnych

Rzepak

Rzepak potrzebuje wysokiego nawożenia mineralnego, w tym dużych dawek azotu. Aby procesy biochemiczne przebiegały w roślinach prawidłowo, azot musi być w odpowiednim stosunku do siarki. Wiele badań potwierdza, że zastosowanie siarki w uprawie rzepaku na glebie z niedoborem tego składnika powodowało wzrost plonu nasion i/lub wzrost zawartości tłuszczu (22). Nawożenie siarką poprawia również wartość odżywczą oleju, zwiększając w nim udział niezbędnych nienasyconych kwasów tłuszczowych (NNKT). Jednakże dawki siarki nie mogą być zbyt wysokie i najczęściej dla uzyskania tych celów zaleca się dawkę 30–40, rzadziej 60 kg S·ha⁻¹.

Drugą ważną cechą jakościową nasion rzepaku jest zawartość białka, która na ogół wzrasta pod wpływem nawożenia siarką (tab. 3). W warunkach Polski obserwuje się wzrost tego parametru do dawki 60 kg S·ha⁻¹. Niedobór siarki powoduje pogorszenie jakości białka ze względu na niską zawartość aminokwasów siarkowych.

Tabela 3

Plon nasion i cechy jakościowe rzepaku ozimego w zależności od dawki siarki

Nawożenie S (kg·ha ⁻¹)	Plon nasion (t·ha ⁻¹)	Zawartość (%)		Wydajność (t·ha ⁻¹)	
		tłuszcz surowy	białko ogólne	tłuszcz surowy	Białko ogólne
0	3,92	43,8	20,7	1,49	0,706
30	4,14	43,9	20,7	1,57	0,747
60	4,25	43,6	21,0	1,59	0,773
90	4,46	43,6	20,9	1,68	0,808
NIR ($\alpha = 0,05$)	0,13	r.n.	r.n.	0,05	0,023

r.n. – różnice nieistotne

Źródło: Malarz i in., 2011a (13)

Ważnym elementem jakości nasion rzepaku jest odpowiednia zawartość glukozyolanów, które odpowiadają za specyficzny smak i zapach tych roślin oraz odgrywają ważną rolę w odporności rzepaku względem patogenów i są rezerwą siarki w roślinie. Niestety ich koncentracja w nasionach rzepaku wzrasta wraz ze wzrostem dawki siarki (tab. 4). Nie jest to zjawisko korzystne, ponieważ glukozyolany zaliczane są do tzw. związków antyżywniowych, co oznacza, że mają one negatywny wpływ na rozwój i ogólny stan zdrowia zwierząt gospodarskich. Znaczna część tych związków trafia do śruty rzepakowej i makuchów, które stosuje się jako wysokobiałkowe pasze

treściwe w chowie zwierząt. Za dopuszczalną normę glukozynolanów w paszach rzepakowych, stosowanych w żywieniu zwierząt, przyjęto poziom 15–20 $\mu\text{M} \cdot \text{g}^{-1}$ s.m.b.

Tabela 4
Zawartość glukozynolanów w nasionach rzepaku ozimego w zależności od nawożenia siarką

Nawożenie S ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)	Zawartość ($\mu\text{M} \cdot \text{g}^{-1}$)		Suma	
	alkenowe	indolowe	($\mu\text{M} \cdot \text{g}^{-1}$)	(%)
0	12,1	4,1	16,2	100
30	12,7	4,5	17,2	106,2
60	14,1	4,6	18,7	115,4
90	14,6	4,1	18,7	115,4
NIR ($\alpha = 0,05$)	1,5	r.n.	1,7	-

r.n. – różnice nieistotne

Źródło: Malarz i in., 2011 (13)

Ziemniak

Doświadczenia Klikockiej (11) potwierdzają korzystne oddziaływanie siarki siarczanowej w uprawie ziemniaka zarówno w aspekcie wielkości, jak i jakości plonu bulw (tab. 5). Zastosowanie siarczanu wapnia zwiększało zawartość białka w bulwach ziemniaka i zmniejszało intensywność ich ciemnienia enzymatycznego. Siarka nawozowa powoduje także wzrost zawartości w bulwach makro- i mikroelementów a także zawartości karotenu, witaminy C i skrobi. Obniża natomiast zawartość cukrów redukujących, tj. glukozy i fruktozy, co poprawia jakość ziemniaków przeznaczonych na frytki i chipsy. Wysoka zawartość tych cukrów jest przyczyną ciemnienia wyrobów i powoduje ich gorzki smak. Nawożenie siarką oddziałuje na jakość ziemniaka również w sposób pośredni, chociażby przez zwiększenie zawartości innych składników pokarmowych w bulwach, w tym także potasu. Jak wiadomo, wyższa zawartość potasu poprawia ich wartość żywieniową, a także przeciwdziała ciemnieniu bulw i wpływa na lepsze ich przechowywanie.

Tabela 5

Wpływ siarki na plon i jakość bulw ziemniaka

Dawka i forma siarki ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)	Plon bulw ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$)	Parametr jakościowy (%)		
		sucha masa	zawartość białka	zawartość skrobi
0	22,6	22,7	8,41	14,6
25 – SO_4	25,1	22,4	8,92	14,7
25 – S	23,2	22,1	9,06	15,0
50 – SO_4	24,0	21,5	8,86	14,8
50 – S	24,4	21,5	9,92	14,8
NIR ($P < 0,05$)	1,19	0,22	0,33	0,13

Źródło: Klikocka, 2004 (11), zmodyfikowane

Burak cukrowy

Zdaniem Potarzyckiego i Lewickiej (24) azot α -aminowy (tzw. azot szkodliwy) oraz zawartość K i Na są określane mianem melasotworów, których obecność w miazdze korzeniowej utrudnia odzyskanie cukru (tab. 6). Korzystne

działanie nawozów siarkowych w uprawie buraka polega na obniżaniu w korzeniach zawartości potasu, sodu i azotu α -aminowego, którego wysoka koncentracja powoduje zmniejszenie nie tylko ekstrakcji cukru, ale także klarowności soku. Nawożenie siarką jest niezbędne dla utrzymania wspomnianych parametrów jakościowych poprzez poprawę stosunku N:S, zwłaszcza w warunkach wysokich dawek azotu. Z badań wynika, że krytyczny stosunek N:S warunkujący uzyskanie dużego plonu buraka o dobrej jakości wynosi 11:1 (29).

Tabela 6

Wpływ dawek siarki na plon i cechy jakościowe buraka cukrowego

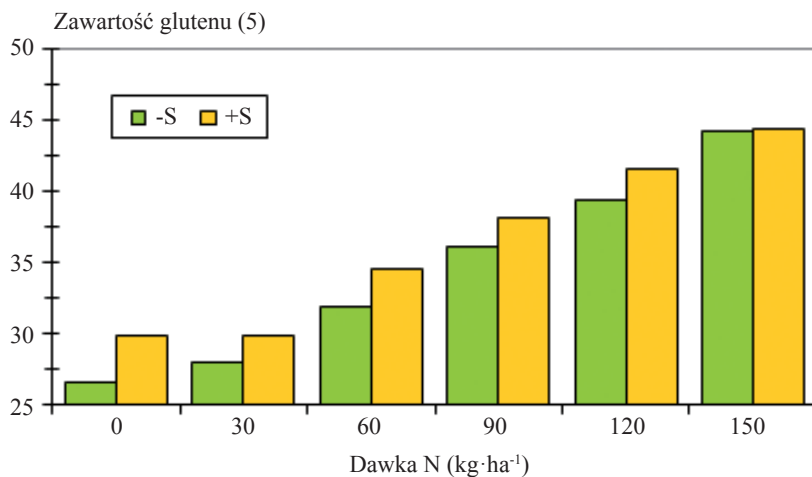
Wyszczególnienie	Dawka nawożenia siarką (mg·wazon ⁻¹)				
	0	10	50	200	2000
N/S w młodych liściach	57,3d*	57,7d	33,6c	18,1b	11,3a
Plon korzeni (g/roślinę)	75,0c	115,7c	286,0b	400,7a	367,3a,b
Zawartość sacharozy (%)	12,9c	14,0b	15,0a,b	15,5a	15,3a
Zawartość potasu (mmol kg ⁻¹ korzeni)	98,1a	95,1a	60,9b	39,6d	48,6c
Zawartość sodu (kg ⁻¹ korzeni)	6,5a	6,5a	5,2bb	1,4c	1,6c
Zawartość N α -aminowego (%)	66,0a	60,5a	38,1	24,0b	26,6b
Straty cukru (%)	3,3a	4,2a	2,2b	1,6c	1,7c
Plon cukru (g/roślinę)	7,3c	12,0c	34,4b	53,6a	48,4a

*wartości w wersach oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie

Źródło: Hoffmann i in., 2004 (9)

Pszenica

Nawożenie siarką wpływa na wiele elementów jakości technologicznej ziarna pszenicy. W efekcie stosowania siarki obserwuje się na ogół zwiększoną zawartość białka i glutenu, które są uznawane za podstawowe wskaźniki jakościowe tego zboża (20, 21). Zmianom tych cech towarzyszy często poprawa biologicznej jakości białek poprzez wzrost wartości indeksu glutenu. Składniki glutenu są ze sobą połączone różnymi wiązaniami, wśród których ważną rolę odgrywiają wiązania disulfidowe. Dzięki takiej budowie gluten tworzy zwartą sieć, która stanowi podstawę struktury ciasta. Przyjmuje się, że wiele ważnych cech ciasta, tj. elastyczność i odporność na rozciąganie jest związanych z zawartością składników siarkowych we frakcjach glutenu (np. aminokwasy siarkowe), ponieważ są one odpowiedzialne za połączenia między molekułami. Korzystne oddziaływanie siarki jest w tym przypadku związane z tworzeniem dwusiarczkowych mostków. Stwierdza się także istotny wpływ siarki na obniżenie zawartości popiołu oraz wzrost wartości celności i wyrównania, co znacznie poprawia wartość przemiałową ziarna. Pod wpływem siarki nawozowej często poprawiają się cechy chemiczne mąki, tj. zawartość białka, glutenu i rozpylność glutenu, a także niektóre cechy reologiczne ciasta pszennego (rys. 1). Deficyt siarki w uprawie pszenicy uwidacznia się jako pogorszenie cech pieczywa bowiem obniżeniu ulega zarówno objętość bochenka, jak i stosunek jego wysokości do szerokości. Stąd objętość bochenków wyprodukowanych z pszenicy nawożonej tylko azotem była od 24 do 34% mniejsza niż upieczonych z ziarna pszenicy nawożonej azotem i siarką (21).



Rys. 1. Wpływ siarki i azotu na zawartość glutenu w ziarnie pszenicy ozimej

Źródło: Podleśna i in., 2003 (21)

Jęczmień

Zalecenia dotyczące jęczmienia browarnego zawarte w Polskiej Normie (23) określają, że ziarno technologiczne powinno zawierać 9,5–11,5% białka. Aby nie przekroczyć tych wartości, należy stosować niższe dawki azotu, które powinny być w największym stopniu wykorzystane do produkcji ziarna. Badania Eriksena i in. (4) wykazały, że jeśli nawożenie jęczmienia azotem jest zbilansowane przez dodatek siarki, wówczas nawet mniejsza dawka N jest wystarczająca do produkcji ziarna o pożądanym właściwościach. Odpowiednie zaopatrzenie jęczmienia w siarkę powoduje obniżenie stosunku N:S, wzrost koncentracji aminokwasów siarkowych (metioniny i cysteiny) oraz zmiany proporcji grup hordein (białek typowych dla ziarna jęczmienia), co wpływa na produkcję białka o dobrych parametrach technologicznych (2).

W badaniach Barczak (1) dawka siarki silnie oddziaływała na zawartość azotu ogólnego i białkowego w ziarnie jęczmienia jarego. Udział azotu białkowego w jego zawartości ogólnej w ziarnie jęczmienia wynosił 88,6%, co wskazuje na wydajną syntezę białka roślinnego. Jest to ważny wskaźnik, zwłaszcza w przypadku rośliny pastewnej, potwierdzający jednocześnie ważną rolę siarki w metabolizmie azotu. Dawka siarki wywierała także największy, spośród badanych czynników, wpływ na skład aminokwasowy, w tym na 22,2% wzrost metioniny przy dawce 40 kg S·ha⁻¹ i skład frakcyjny białka ziarna jęczmienia. Jej zastosowanie spowodowało zwiększenie się zawartości N-globulin, co wynika prawdopodobnie z faktu, iż frakcja ta w ziarnie zbóż wyróżnia się wyjątkowo dużą liczbą grup hydrosulfidowych (-SH) i disulfidowych (-S-S-). Rozszerzone badania z udziałem zwierząt laboratoryjnych wykazywały na ogół wyższe w porównaniu z obiektem kontrolnym wartości takich wskaźników, jak strawność rzeczywista (TD), wartość biologiczna (BV) i wykorzystanie białka netto (NPU), co dowodzi ważnej roli siarki w utrzymaniu dodatniego bilansu azotowego tych zwierząt.

Rośliny bobowate

U tej grupy roślin siarka spełnia podwójną rolę: 1) jest niezbędna do procesów symbiotycznego wiązania azotu i 2) do syntezy białka. Przy niedostatku siarki produkowane jest białko mniej wartościowe, czyli zawierające mniejszą ilość aminokwasów egzogennych. Rośliny tworzą wówczas mniej metioniny, która staje się podstawowym aminokwasem limitującym jakość nasion tych roślin. Mają one też mniej cysteiny, która jest uważana za niezbędny składnik diety człowieka i paszy dla zwierząt. Również proces wiązania N_2 przez rośliny bobowate jest wysoce wrażliwy na niedobór siarki. Rośliny deficytowe w siarkę wytwarzają mniejsze i mniej liczne brodawki korzeniowe, co ma wpływ na efektywność wiązania N_2 i syntezę białka (5). Siarka jest niezbędna także do funkcjonowania białka ferredoksyny i enzymu nitrogeazy, które zawierają klastery metalosiarkowe: żelazo-siarkowy i molibdeno-żelazo-siarkowy, a które odgrywają kluczową rolę w procesie wiązania azotu atmosferycznego (12). Zależność między odpowiednim zaopatrzeniem w siarkę a zwiększeniem zawartości białka w częściach nadziemnych i nasionach bobu oraz peluski została stwierdzona już w latach 70. XX w. (6). Również Barczak (1) wykazała, że siarka była czynnikiem, który istotnie determinował zawartość azotu ogólnego i azotu białkowego w nasionach łubinu oraz ziarnie jęczmienia. Najwyższe przyrosty obu form azotu stwierdzono pod wpływem dawki 4–60 kg S·ha⁻¹. Zastosowanie siarki w już najniższej dawce 20 kg·ha⁻¹ powodowało wzrost wartości wskaźnika aminokwasów egzogennych (EAAI) określanego jako ważne kryterium wartości odżywczej białka.

Rola siarki w adaptacji roślin do stresowych warunków środowiska

Rośliny optymalnie zaopatrzone w siarkę odznaczają się również większą odpornością na stresy biotyczne, tj. występowanie chorób i szkodników oraz abiotyczne, czyli na suszę, wysoką temperaturę czy chłód. Barczak (1) prowadziła kilkuletnie badania nad wpływem siarki na plonowanie i cechy jakościowe jęczmienia, łubinu i gorczyca. Wykazała w nich, że pozytywna reakcja plonu badanych gatunków na nawożenie tym składnikiem była wyraźnie silniejsza w latach suchych. Siarka ma również istotny wpływ na tworzenie naturalnej odporności roślin przeciwko patogenom, a przede wszystkim na ograniczanie rozwoju niektórych chorób grzybowych. W przypadku roślin z rodziny krzyżowych, tj. rzepak, gorczyca czy kapusta ochronne działanie siarki tłumaczy się jej obecnością w glukozyzolanach, czyli tzw. metabolitach wtórnych. Stwierdzono m.in., że produkty rozpadu glukozyzolanów hamowały wzrost grzybów wywołujących suchą zgniliznę kapustnych (*Phoma lingam*) i zgniliznę twardzikową (*Sclerotinia sclerotiorum*). W ocenie Jędrzycki i in. (10) są one efektywne także przeciwko mączniakowi rzekomemu kapustnych (*Peronospora parasitica*) i czerni krzyżowych (*Alternaria* spp.) (tab. 7). W reakcjach obronnych roślin ważną rolę odgrywa również glutation, który zawiera jony siarki. Biochemiczne funkcje glutationu w zainfekowanych roślinach polegają na produkcji

ligniny (wzmocnienie ścian komórkowych) i fitoaleksyn, które są syntetyzowane dopiero po ataku choroby, w komórkach usytuowanych blisko miejsca infekcji. Jednakże wymienione substancje nie blokują całkowicie choroby, mogą natomiast znacznie ograniczyć jej rozmiar.

Tabela 7

Porażenie rzepaku ozimego przez patogeny grzybowe (%)

Dawka siarki (kg·ha ⁻¹)	<i>Leptosphaeria maculans</i>	<i>Alternaria spp.</i> na łuszczynach	<i>Pyrenopeziza brassicae</i>	<i>Erysiphe cruciferarum</i>
SD Baborówko				
0	13,0a*	19,3a	58,0a	73,7a
60	10,7a	21,7b	50,3b	70,0a
RZD Grabów				
0	11,8a	42,7a	-	72,3a
60	15,3b	29,7b	-	62,0b

*wartości w kolumnach oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie

Źródło: Jędrzycka i in., 2002 (10), zmodyfikowane

Objawy deficytu siarki na plantacjach roślin uprawnych

Wizualne objawy niedoboru danego pierwiastka mogą być bardzo skutecznym narzędziem diagnostycznym dla określenia stanu zaopatrzenia rośliny w składnik pokarmowy. Pierwszym zauważalnym objawem deficytu siarki są przejaśnienia na najmłodszych liściach w przeciwieństwie do niedoboru azotu (N), który objawia się przejaśnieniem na liściach starszych. Azot, odwrotnie do siarki, jest składnikiem bardzo ruchliwym w roślinie i podlega przemieszczaniu z liści starszych do młodych, i te starsze stają się żółte. Żółknięcie i jasne przejaśnienia na liściach wynikają z tego, że deficyt siarki powoduje rozpad chlorofilu. Występuje wówczas także zahamowanie wzrostu roślin w wyniku skrócenia międzywęźli.

Rzepak i rośliny z rodziny krzyżowych

Największe wymagania żywieniowe względem siarki ma rzepak oraz inne rośliny z rodziny krzyżowych, i na nich najczęściej spotyka się objawy jej niedoboru. Głównym objawem deficytu siarki u tej grupy roślin jest chloroza zaczynająca się od brzegowych części liści, chociaż tkanka wokół nerwów pozostaje zielona. Powstaje wówczas tzw. marmurkowatość w powiązaniu z łyzeczkowanym wygięciem blaszki górnych liści na lodydze. Liście stają się sztywne i łatwo ulegają złamaniu. Deformacja ta jest wynikiem napięć w tkance liści roślin z niedoborami siarki. Na te zniekształcenia są narażone najbardziej liście, które osiągnęły około 50% swojej końcowej masy. Deficyt siarki powoduje także pojawienie się antocyjanowego zabarwienia na dolnej stronie liści, które jest często obserwowane na plantacjach już wczesną wiosną, po podaniu nawozów azotowych (fot. 1).

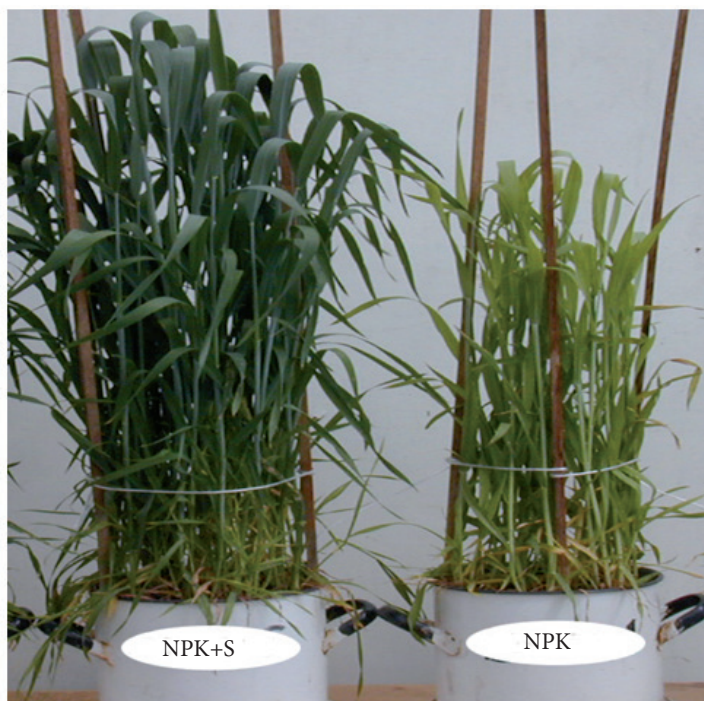


Fot. 1. Charakterystyczne objawy silnego niedoboru siarki w uprawie rzepaku ozimego
Źródło: Podleśna, 2003 (16)

Jeśli niedobór siarki jest znaczny i pojawił się wczesnie, może dojść do deformacji i zaniku żółtego barwnika płatków korony kwiatu. Zmienione płatki są jasnożółte, o mniejszej powierzchni i jajowatym kształcie, przez co stają się mniej atrakcyjne dla pszczoł. W przypadku silnego deficytu, kwiaty rzepaku opadają zaraz po otwarciu. W wyniku tych zmian zmniejsza się zarówno liczba, jak i rozmiar łuszczyń, które są jasnozielone z antocyjanowym przebarwieniem i charakterystycznym wygięciem. Zawierają tylko 1–5 nasion, co daje mały plon w porównaniu z 15–20 nasionami wytwarzanymi w łuszczyńce rzepaku optymalnie zaopatrzonego w siarkę.

Zboża

Deficyt siarki u roślin zbożowych można rozpoznać po chlorozie międzynaczyniowej młodych, w pełni rozwiniętych liści. Obserwuje się wówczas przebarwienia w postaci jasnozielonych pasków, które biegną równolegle wzdłuż nerwów. Młode liście zbóż z niedoborem siarki są żółtozielone oraz węższe i krótsze w porównaniu z prawidłowo odżywionymi tym składnikiem (fot. 2). Charakterystycznym objawem deficytu S jest także sztywność liści. Generalnie, symptomy niedoboru siarki objawiają się na liściach najmłodszych, ale w przypadku silnego niedoboru objawy dotyczą całych roślin.



Fot. 2. Objawy silnego deficytu siarki w roślinach pszenicy

Źródło: Podleśna, 2011 (18)

Kukurydza

Symptomy deficytu siarki w uprawie kukurydzy objawiają się żółknięciem najmłodszych liści. Kiedy rośliny są małe, łagodne objawy niedoboru S są obserwowane jako tzw. chloroza międzyżyłkowa pojawiających się nowych liści. Wraz z rozwojem roślin stają się bardziej wyraźne i całe liście przybierają żółte zabarwienie, z wyraźnie zieleńszymi nerwami. Typowe objawy niedoboru siarki nie pojawiają się równo na polu, ale raczej jako plamy czy pasy wzdłuż pola. Powszechnie symptomy te obserwuje się na roślinach rosnących na obniżeniach, w miejscach gdzie pokrywa z resztek poźniwnych jest grubsza lub gdzie siew był płytszy.

Rośliny okopowe

Ziemniak także reaguje na niedobory siarki w glebie. Przede wszystkim obserwuje się wówczas chlorozę liści młodszych, która rozchodzi się od końcowych części liści i wyraźnie zaznacza się zielona tkanka wokół nerwów liści. Zmienia się pokrój roślin, które nie wydłużają łodyg, co prowadzi do karłowatości (11).

Rośliny buraka cukrowego wykazują objawy deficytu siarki jako wyraźne żółknięcie liści, często włącznie z nerwami (24).

Diagnostyka zaopatrzenia roślin uprawnych w siarkę

Z uwagi na to, że deficyt siarki jest niekorzystny dla wzrostu i rozwoju roślin, a często ma charakter ukryty, zaleca się aby w czasie wegetacji wykonać analizy zawartości tego pierwiastka w tzw. wskaźnikowych częściach roślin (tab. 8). Ponieważ siarka jest powiązana metabolicznie z azotem, analizy te służą do oceny stanu zaopatrzenia roślin w te dwa składniki, opierając się na zawartościach optymalnych wyznaczonych dla poszczególnych gatunków roślin. Wartości niższe od zawartości optymalnych wskazują na konieczność uzupełnienia deficytu siarki w czasie wegetacji roślin w formie zabiegu dokarmiania dolistnego.

Tabela 8

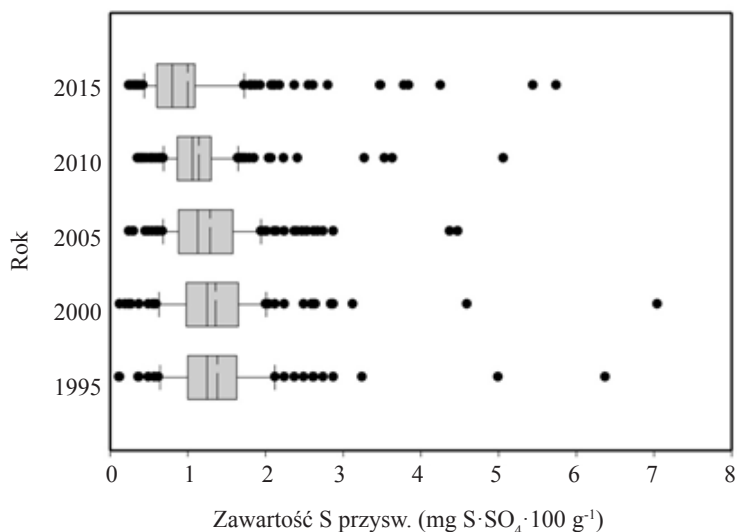
Optymalne zawartości siarki i azotu w organach wskaźnikowych wybranych roślin

Roślina	Faza pobierania próbki	Optymalna zawartość (%)		
		N	S	N/S
Rzepak ozimy	przed kwitnieniem, młode liście z górnej części łodygi	4,8	0,55–0,65	8,7–7,4
Pszenica ozima	całe rośliny tuż przed kwitnieniem	1,6	0,18–0,30	8,9–5,3
Burak cukrowy	środkowe, w pełni rozwinięte liście, początek lipca	4,7	0,4	11,8
Trawy	pełen odrost w dojrzałości do koszenia lub spasanania	2,4	0,3	8,0

Źródło: Grzebisz, 1997 (7)

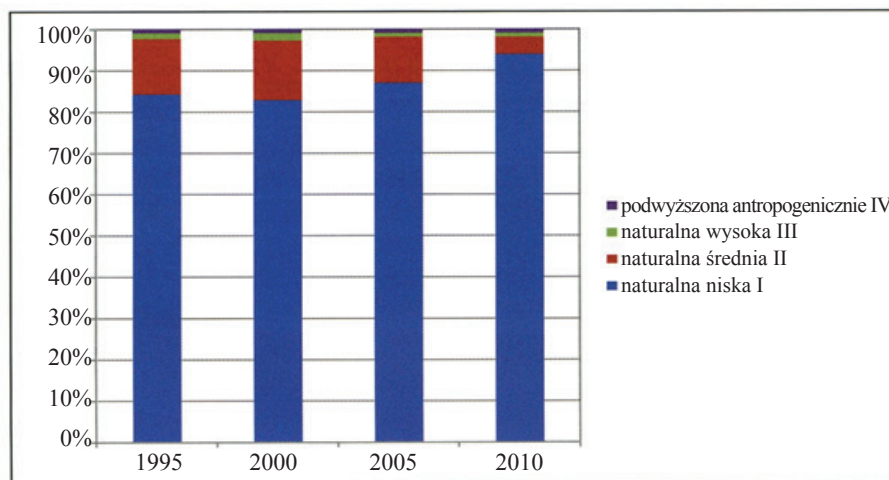
Aktualne zaopatrzenie gleb w siarkę i jej niedobory

Najnowsze opublikowane badania prowadzone w IUNG-PIB w Puławach (25) potwierdzają, że w 198 punktach monitoringowych, tj. w 91,7% wszystkich profili pobranych z gleb użytkowanych rolniczo w Polsce, stwierdzono niską zawartość siarki siarczanowej, czyli siarki przyswajalnej dla roślin (rys. 2). Autorzy opracowania podkreślają systematyczny spadek przeciętnej zawartości siarki na przestrzeni lat prowadzonego monitoringu, z 1,38 do 1,00 mg S-SO₄ · 100 g⁻¹, odpowiednio w latach 1995 i 2015. Jedynie w 2 próbkach poziom tej formy siarki mieścił się w zakresie zawartości określanej jako antropogenicznie podwyższona (IV). Także udział profili gleb o zawartości siarki w klasie „naturalnie niska I” wzrasta wraz z każdym kolejnym badaniem (rys. 3). Przedstawione wyniki wskazują, że stan zaopatrzenia gleb Polski w siarkę przyswajalną pogarsza się i może skutkować jej deficytem dla gatunków roślin uprawnych wrażliwych na niedobory tego składnika.



linia przerywana – średnia, linia ciągła – mediana, prostokąt – dolny i górny kwartył, linie pionowe na zewnątrz prostokątów – 10 i 90 percentyl, kropki – wartości odstające (poniżej 10 i powyżej 90 percentyla)

Rys. 2. Rozkład zawartości przyswajalnej siarki w glebach Polski w kolejnych latach badań
Źródło: Siebielec i in., 2017 (25)



Rys. 3. Udział profili w poszczególnych stopniach zawartości siarki przyswajalnej (S-SO₄) dla roślin
Źródło: Siebielec i in., 2012 (26)

Nawozy siarkowe

Ze względu na przeważający w kraju udział gleb o niskiej zasobności w siarkę dostępną dla roślin i ciągły jej wywóz z pól uprawnych wraz z plonami, zagrożenie deficytem (25, 26), a nawet wyliczony niedobór tego składnika (28) staje się coraz bardziej powszechny w rolnictwie polskim. Źródłem siarki dla roślin są nawozy naturalne oraz glebowa materia organiczna, co wiąże się z uprawą roślin pozostawiających dużo resztek poźniwnych. Jednak zawartość siarki w wymienionych źródłach jest niska, a jej udostępnienie roślinom wymaga odpowiednich warunków termiczno-wilgotnościowych i czasu. W celu sprawnego i efektywnego uzupełnienia niedoborów siarki w glebach uprawnych oraz zwiększenia jej dostępności dla roślin zaleca się stosowanie nawozów mineralnych. Stanowią one główne źródło tego pierwiastka, którym rolnik powinien sterować w zależności od potrzebnej dawki, formy, terminu oraz sposobu aplikacji. W uprawie roślin ozimych, wieloletnich lub traw można stosować siarkę o wolniejszym działaniu. Natomiast spotykane niedobory, i potrzeby roślin uprawnych, muszą być uzupełniane większą dawką, szybko działającej formy siarczanowej. Do najważniejszych nawozów siarkowych należy zaliczyć (15, 18):

- siarczan amonu – $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, od lat uważany za dobre źródło azotu i siarki. To typowy nawóz przedsiewny o dłuższym i powolniejszym działaniu. Ze względu na zakwaszający wpływ na środowisko glebowe jest szczególnie polecany do stosowania w warunkach uregulowanego lub wysokiego odczynu gleby;
- superfosfat prosty – $[\text{CaSO}_4 \text{ Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2]$, oprócz 32% siarki (SO_3) zawiera 19% P_2O_5 i 20% CaO rozpuszczalnych w wodzie. Jest to typowy nawóz przedsiewny dedykowany pod wszystkie rośliny uprawne;
- siarczan potasu – K_2SO_4 – jest źródłem łatwo przyswajalnych form potasu i siarki. Ponieważ zawiera 18% S przyswajalnej, zwykle zaleca się jego stosowanie pod rośliny wymagające wyższych dawek tego składnika. Jest przeznaczony do nawożenia zarówno podstawowego, jak i pogłównego. Jednak ze względu na dużą rozpuszczalność w wodzie i możliwość strat siarki przez wypłukiwanie powinien być stosowany wczesną wiosną;
- siarczan magnezu (kizeryt) – $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ zawiera siarkę i magnez w formie bezpośrednio pobieranej przez rośliny. Może być stosowany na glebę lub w formie płynnej (w formie tzw. dokarmiania dolistnego);
- sól Epsom – $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – jest stosowana do dolistnego dokarmiania roślin siarką w czasie wegetacji;
- siarczan wapnia (gips) – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – jest to nawóz o małej rozpuszczalności w wodzie i powolnym udostępnianiu siarki roślinom. Zaleca się, aby gips przed użyciem rozdrobnić, co powoduje zwiększenie jego rozpuszczalności i wzrost efektywności nawozowej;

- siarka elementarna nie jest bezpośrednio pobierana przez rośliny. Aby mogła działać efektywnie jako nawóz siarkowy musi ulec przemianom (utlenieniu) do siarczanów, która jest możliwa dzięki bakteriom z rodzaju *Thiobacillus* oraz niektórym grzybom. Proces utleniania tej formy siarki zależy od: właściwości fizycznych nawozów, tj. stopień ich rozdrobnienia, właściwości chemicznych gleby, czyli jej odczynu (preferują kwaśny) oraz warunków pogodowych, tj. wilgotności gleby i temperatury, które w całym kompleksie wpływają na obecność w glebie i efektywność działania bakterii siarkowych;
- nawozy wieloskładnikowe, w których zawartość siarki wynosi na ogół kilka procent.

Ponieważ siarka jest pobierana z roztworu glebowego przez korzenie roślin w formie siarczanów (anion SO_4^{2-}) zatem najszybciej działają nawozy, które mają tę formę składnika. Także jon $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ obecny w nawozach tiosiarczanowych (jak np. w tiosiarczanie amonu czy tiosiarczanie potasu) utlenia się szybko do siarczanu i jest prawie natychmiast gotowy do pobrania przez rośliny (15, 18). Z tego względu nawozy siarczanowe powinny być stosowane w praktyce rolniczej w niedalekiej odległości czasowej od okresu największego zapotrzebowania roślin, a ich dostępność ma sprostać wymaganiom żywieniowym uprawianych roślin. Jednakże należy pamiętać, iż efektywność tego typu nawozów maleje wraz ze wzrostem czasu, jaki upływa od ich wysiewu do pobrania. Wiąże się to z faktem, iż anion siarczanowy nie jest wiązany przez kompleks sorpcyjny gleby, co skutkuje możliwością strat tych jonów, obecnych przez dłuższy czas w glebie, poprzez wymycie do wód glebowych. Wielkość strat siarki siarczanowej zależy od jej puli pozostającej w glebie i częstości oraz nasilenia opadów, wilgotności gleby. W tym przypadku należy uwzględnić tzw. okresy krytyczne, czyli okresy największego zapotrzebowania na siarkę, kiedy rośliny muszą być bezwarunkowo zaopatrzone w ten składnik. Zwiększy to jej wykorzystanie przez rośliny i zmniejszy straty. Z kolei siarka elementarna może dostarczyć dostępnych siarczanów w wydłużonych okresach czasu, ponieważ jej stopniowa przemiana do siarczanów może zmniejszyć straty (18). Jednakże od momentu, kiedy siarka elementarna ulegnie przemianom do siarczanu staje się podatna na wymywanie podobnie jak siarczany pochodzące z siarczanu amonu.

Podsumowanie

Zbilansowane nawożenie roślin uprawnych, uwzględniające siarkę, wpływa na utrzymanie prawidłowego metabolizmu, co warunkuje uzyskanie odpowiednio wysokich plonów, jak też korzystnie oddziałuje na ich jakość. Pojawiające się na plantacjach niedobry siarki wskazują, że składnik ten powinien być traktowany jako czynnik ograniczający realizację celów produkcyjnych. Aby zapobiec tej sytuacji, należy uwzględnić siarkę w planach nawożenia, opierając się na znajomości jej

zawartości w glebach, potrzeb roślin uprawnych oraz przemian tego składnika w glebach i wielkości jego strat. Ważne jest także uzależnienie dawki siarki od innych składników pokarmowych, a zwłaszcza od dawki azotu.

Literatura

1. Barczak B.: Siarka jako czynnik pokarmowy kształtujący wielkość i jakość plonów wybranych roślin uprawnych. Rozprawy **144**, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, 2010.
2. Castle S.L., Randal P.J.: Effect of sulfur deficiency on the synthesis and accumulation of proteins in the developing wheat seed. *Aust. J. Plant Physiol.*, 1987, **14**: 503-516.
3. De Kok L.J., Castro A., Durenkamp M., Stuiver C.E.E., Westerman S., Yang L., Stulen I.: Sulphur in plant physiology. Proceedings No 500, The International Fertiliser Society, York, UK, 2002, pp.1-26.
4. Eriksen J., Nielsen M., Mortensen J.V., Schjorring J.J.: Redistribution of sulphur during generative growth of barley plants with different Sulphur and nitrogen status. *Plant Soil*, 2001, **230**: 239-246.
5. Ganeshamurthy A.N., Reddy K.S.: Effect of integrated use of farmyard manure and sulphur in a soybean and wheat cropping system on nodulation, dry matter production and chlorophyll content of soybean on swell-shrink soils in central India. *J. Agron. Crop Sci.*, 2000, **185**: 91-97.
6. Goźliński H.: Działanie nawozowe siarki (SO_4^{2-}) przy różnych poziomach nawożenia azotem. Cz. II. Badania nad peluszką, bobem, koniczyną, gorczycą i ziemniakami. *Rocz. Nauk Rol., A*, **97(1)**: 95-112.
7. Grzebisz W.: Czy nawożenie siarką jest już konieczne?. *Top Agrar Polska*, 1997, **1**: 20-23.
8. Grzebisz W., Przygocka-Cyna K.: Aktualne problemy gospodarowania siarką w rolnictwie polskim. *Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization*, 2003, **4(17)**: 64-77.
9. Hoffmann Ch., Stockfisch N., Koch H.J.: Influence of sulphur supply on yield and quality of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) – determination of a threshold value. *Eur. J. Agron.*, 2004, **21**: 69-80.
10. Jędrzycka M., Podleśna A., Lewartowska E.: Wpływ nawożenia azotem i siarką na zdrowotność roślin rzepaku ozimego. *Pam. Puł.* 2002, **130**: 329-337.
11. Klikocka H.: Nawożenie ziemniaka siarką. *Fragm. Agron.*, 2004, **3(83)**: 80-94.
12. Kopcewicz J., Lewak S.: *Fizjologia roślin*. PWN, 2005 Warszawa.
13. Malarz W., Kozak M., Kotecki A.: Wpływ nawożenia siarką na wysokość i jakość plonu nasion odmian rzepaku ozimego. *Zesz. Nauk. UR we Wrocławiu*, 2011, **581**: 107-116.
14. Malarz W., Kozak M., Kotecki A.: Wpływ nawożenia siarką na rozwój i cechy morfologiczne odmian rzepaku ozimego. *Zesz. Nauk. UR we Wrocławiu*, 2011, **581**: 117-126.
15. Pedersen C.A., Knudsen L., Schnug E.: Sulphur fertilization. W: *Sulphur in Agroecosystems*, E. Schnug (Red.), Kluwer Academic Publishing, 1998: 115-134.
16. Podleśna A.: Nawożenie siarką – nowy problem w rolnictwie. *Wieś Jutra*, 2003, **10**: 16-18.
17. Podleśna A.: Nawożenie siarką jako czynnik kształtujący metabolizm roślin uprawnych i jakość plodów rolnych. *Pam. Puł.*, 2005, **139**: 161-174.
18. Podleśna A.: Nawozy siarkowe. Gips czy kizeryt? *Rol. Dzierż.*, 2011, **2(167)**: 82-84.
19. Podleśna A.: Studia nad rolą siarki w kształtowaniu gospodarki mineralnej oraz wielkości i jakości plonu wybranych roślin uprawnych. *Monografie i Rozprawy Naukowe*, 2013, **37**: 1-141.
20. Podleśna A., Cacak-Pietrzak G.: Kształtowanie plonu oraz parametrów przemiałowych i wypiekowych pszenicy jarej poprzez nawożenie azotem i siarką. *Pam. Puł.*, 2006, **142**: 381-392.
21. Podleśna A., Cacak-Pietrzak G., Sowiński M.: Reakcja pszenicy ozimej na nawożenie siarką w doświadczeniu polowym. *Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization*, 2003, **4(17)**: 169-179.
22. Podleśna A., Strobel W.: Wpływ nawożenia siarką i azotem na zawartość tłuszczu i białka w nasionach rzepaku ozimego. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 2009, **542**: 373-379.
23. Polska Norma: Słód browarniany, 1997, PN-A-79082.

-
24. Potarzycki J., Lewicka L.: Efektywność plonotwórcza nawozów wieloskładnikowych w uprawie buraka cukrowego. *Biuletyn IHAR*, 2002, **222**: 111-118.
 25. Siebielec G., Smreczak B., Klimkowicz-Pawlas A., Kowalik M., Kaczyński R., Koza P., Ukalska-Jaruga A., Łysiak M., Wójtowicz M., Poręba L., Chabros E.: Zawartość siarki ogólnej i jej przyswajalnych form. W: Raport z III etapu realizacji zamówienia „Monitoring chemizmu gleb ornych w Polsce w latach 2015–2017”. IUNG-PIB w Puławach, 2017: 51-32.
 26. Siebielec G., Smreczak B., Klimkowicz-Pawlas A., Maliszewska B., Terelak H., Koza P., Łysiak M., Gałązka R., Pecio M., Miturski T., Hryńczak B.: Zawartość siarki ogólnej i jej przyswajalnych form. W: Monitoring chemizmu gleb ornych w latach 2010-2012. Inspekcja Ochrony Środowiska, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, 2012: 54-57.
 27. Siuta J., Rejman-Czaikowska M.: Siarka w biosferze. *PWRiL*, 1980, ss. 393.
 28. Szulc W.: Potrzeby nawożenia roślin uprawnych siarką oraz metody ich wyznaczania. *Rozprawy Naukowe i Monografie*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 2008, **332**.
 29. Thomas S., Bilsborrow P., Hocking T., Bennett J.: Sulfur deficiency in sugar beet (*Beta vulgaris*). *Laudbauforschung Volkenrode Soderheft*, 2000, **218**: 97-100.
-

Adres do korespondencji:

prof. dr hab. Anna Podleśna
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy
tel. 81 4786 831, 835
e-mail: ap@iung.pulawy.pl

AUTOR	ORCID
Anna Podleśna	0000-0001-5652-8881