PROGRESS IN PLANT PROTECTION
63 (2): 86–96, 2023
eISSN 2084-4883

Received: 29.03.2023 / Accepted: 10.05.2023

DOI: 10.14199/ppp-2023-010
Published online: 16.06.2023

SHORT COMMUNICATION

Wpływ aplikacji pyłu bazaltowego z dodatkiem siarki na odczyn gleby oraz wartość żywieniową pszenicy i grochu

Effect of basalt dust application with sulfur addition on soil pH and nutritional value of wheat and pea

Jolanta Korzeniowska[1]*, Ewa Stanisławska-Glubiak[1], Mariusz Kowalczyk[2], Mariusz Kucharski[1]

Streszczenie

Doświadczenie mikropoletkowe przeprowadzono na dwóch glebach (lekkiej i średniej) z pszenicą jarą i grochem pastewnym. W doświadczeniu badano działanie granulatu wytworzonego z pyłu bazaltowego i siarki elementarnej, o zawartości siarki 1,5%. Nawożenie pszenicy siarką w dawce 30 kg/ha S i grochu w dawce 20 kg/ha S w postaci granulatu bazaltowo-siarkowego spowodowało istotny wzrost zawartości metioniny, cystyny i białka w ziarnie pszenicy na glebie lekkiej. Nie zaobserwowano natomiast wzrostu zawartości tych aminokwasów oraz białka w nasionach grochu. Ponadto odnotowano wzrost zawartości siarki w ziarnie pszenicy i słomie oraz w słomie grochu. Zastosowanie siarki w połączeniu z pyłem bazaltowym nie spowodowało obniżenia pH żadnej z gleb doświadczalnych.

Słowa kluczowe: granulat bazaltowo-siarkowy, pH gleby, ziarno/nasiona, metionina, cystyna, białko

Abstract

The microplot experiment was carried out on two soils (clay and sandy) with spring wheat and fodder pea. In the experiment, the effect of a granular product made of basalt dust and elemental sulphur with a sulphur content of 1.5% was tested. Fertilization of wheat with sulphur in the dose of 30 kg/ha S and pea in the dose of 20 kg/ha S in the form of basalt-sulphur granulate resulted in a significant increase in the content of methionine, cystine and protein in wheat grain on sandy soil. However, no increase in the content of these amino acids and protein in pea seeds was observed. Moreover, an increase in the content of sulphur in wheat grain and straw as well as in pea straw was noted. The use of sulphur in combination with basalt dust did not lower the pH of any of the experimental soils.

Key words: granulated basalt-sulphur dust, soil pH, grain/seeds, methionine, cysteine, protein

[1]Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
Zakład Herbologii i Technik Uprawy Roli
ul. Orzechowa 61, 50-540 Wrocław
[2]Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
Zakład Biochemii i Jakości Plonów
ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy
*corresponding author: j.korzeniowska@iung.wroclaw.pl

Wstęp / Introduction

Nowym problemem w rolnictwie krajów europejskich jest pogłębiający się deficyt siarki spowodowany w ostatnich latach ubiegłego wieku drastycznym zaostrzeniem norm dotyczących ochrony środowiska (Dyrektywa 2010/75/UE). O ile w roku 1990 emisja SO_2 w naszym kraju kształtowała się na poziomie 2679 tys. ton, to w 2020 roku wynosiła już tylko 431 tys. ton (Raport MKiŚ 2022). Do występowania niedoborów siarki przyczyniło się również znacznie mniejsze zużycie obornika oraz zmiana asortymentu nawozów mineralnych, głównie fosforowych. W związku ze zmniejszonym dopływem siarki do gleby w wielu krajach europejskich zaczęto obserwować deficyt tego składnika w glebach i roślinach uprawnych (Bender i Weigel 2011; Smith i wsp. 2016). Nasilający się deficyt niedoborów siarki w Polsce (Szulc 2008; Siebielec i wsp. 2012) wiąże się z koniecznością nawożenia roślin uprawnych tym pierwiastkiem. Zachodzi obawa, że stosowane zwyczajowo nawożenie NPK nie będzie zbilansowane, a niedobór siarki może ograniczać wykorzystanie pozostałych składników, w tym przede wszystkim azotu. Wiadomo bowiem, że metabolizm azotu w roślinach jest ściśle związany z metabolizmem siarki i niedobór jednego składnika hamuje działanie drugiego (Janzen i Bettany 1984). Z literatury wynika, że nie tylko rzepak jako roślina siarkolubna (Chahal i wsp. 2020), ale również zboża i trawy (Zenda i wsp. 2021) oraz rośliny bobowate (Barczak i wsp. 2013, 2017) reagują zwyżką plonu na nawożenie siarką.

Brak siarki ma konsekwencje nie tylko w zakresie wielkości uzyskiwanych plonów, ale także pogorszenia ich wartości paszowej i odżywczej. Poprawa wartości żywieniowej ziarna zbóż i nasion bobowatych poprzez nawożenie siarką polega między innymi na zwiększeniu w nich zawartości białka oraz poprawie jego jakości. Siarka jest niezbędna w biosyntezie białek, ponieważ wchodzi w skład trzech aminokwasów: metioniny, cystyny i cysteiny (Scherer i wsp. 2008). Szczególnie interesująca z punktu widzenia wartości odżywczych białka jest metionina. Aminokwas ten, zaliczany do aminokwasów egzogennych, nie może być syntetyzowany samodzielnie przez organizmy zwierzęce, tylko musi być dostarczany w pożywieniu. Z tego powodu metionina jest pierwszym aminokwasem limitującym w dietach dla drobiu, a od jej poziomu w paszy zależy stopień wykorzystania wszystkich pozostałych aminokwasów (Brzóska i wsp. 2010; Zonenberg i Drażbo 2018). Często zdarza się, że zawartość naturalnej metioniny i cystyny w pożywieniu dla drobiu i trzody jest zbyt niska, co wymaga dodawania do pasz drogiej metioniny syntetycznej (Rachwał 2016). Jednak aminokwasy syntetyczne są niedozwolone w żywieniu metodami ekologicznymi, gdzie konieczne jest stosowanie bezpiecznej diety. Analiza krajowego rynku wskazuje na stale wzrastające zainteresowanie konsumentów jajami i mięsem drobiowym z ekologicznego systemu chowu, ponieważ coraz powszechniej uważa się, że produkty te mają prozdrowotne wartości i są smaczne (Krawczyk i wsp. 2011). W tej sytuacji, nawożenie siarką roślin paszowych może znacząco poprawić w nich poziom zawartości aminokwasów egzogennych i dzięki temu umożliwić żywienie zwierząt bez dodatków syntetycznych.

Nawożenie siarką często działa zakwaszająco na glebę, co nie jest cechą korzystną, zwłaszcza że większość gleb w naszym kraju to gleby lekko kwaśne lub kwaśne. Jedną z możliwości ograniczenia zakwaszającego działania siarki jest jej aplikacja w połączeniu z pyłem bazaltowym. Pył bazaltowy wprowadzony do gleby, zwłaszcza kwaśnej, może wpłynąć na poprawę jej odczynu. Gillman i wsp. (2002) donoszą, że aplikacja odpadowego pyłu bazaltowego powodowała wzrost pH gleby, a także znacząco redukowała jej kwasowość wymienną oraz przyczyniła się do wzbogacenia w wymienne formy Ca, Mg i K.

Stosowanie mączek skalnych w uprawie roślin jest w naszym kraju stosunkowo mało znane i słabo jak dotąd rozpowszechnione, a łączna aplikacja z siarką w postaci jednego produktu jest zupełnie nowym rozwiązaniem. Ponadto zagospodarowanie produktu ubocznego powstającego przy obróbce bazaltu jest rozwiązaniem prośrodowiskowym. Likwidacja składowisk pyłu mogłaby przyczynić się do poprawy walorów krajobrazowych terenu wokół kopalni surowców skalnych oraz zmniejszenia zapylenia powietrza.

W podjętych badaniach postawiono hipotezę, że nawożenie pszenicy i grochu pyłem bazaltowym z dodatkiem siarki przyczyni się do poprawy wartości żywieniowej ziarna i nasion tych roślin. Jednocześnie aplikacja do gleby produktu bazaltowo-siarkowego nie spowoduje jej zakwaszenia, co mogłoby nastąpić w przypadku stosowania samej siarki.

Głównym celem badań było: (1) ocena wpływu siarki aplikowanej do gleby w połączeniu z pyłem bazaltowym na zawartość białka oraz aminokwasów siarkowych (metioniny i cystyny) w ziarnie i nasionach przeznaczonych na cele konsumpcyjne i paszowe, (2) określenie wpływu produktu bazaltowo-siarkowego na zmiany odczynu gleby oraz zawartość siarki w glebie i roślinach.

Materiały i metody / Materials and methods

Doświadczenie mikropoletkowe

Ocenę wpływu aplikacji pyłu bazaltowego z dodatkiem siarki na wartość żywieniową ziarna pszenicy i nasion grochu przeprowadzono w sezonie wegetacyjnym 2021/2022 na podstawie dwóch dwuczynnikowych doświadczeń mikropoletkowych zlokalizowanych w Stacji Doświadczalnej Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowego Instytutu Badawczego (IUNG – PIB) w Jelczu-Laskowicach koło Wrocławia. W jednym doświadczeniu rośliną testową była pszenica jara odmiany Harenda, a w drugim groch pastewny odmiany Milwa.

W doświadczeniach wykorzystano obetonowane mikropoletka o wymiarach 1 × 1 × 1 m, które latem 2021 roku wypełniono do głębokości 40 cm dwiema glebami pochodzącymi z wierzchniej warstwy pól uprawnych zlokalizowanych w pobliżu Jelcza-Laskowic. Gleby te, oznaczone jako A i B zostały dobrane tak, aby różniły się składem granulometrycznym i jednocześnie cechowały się możliwie niską zawartością siarki (tab. 1). Użycie mikropoletek pozwoliło wyeliminować niekontrolowaną zmienność glebową charakterystyczną dla doświadczeń polowych, co zmniejszyło błąd doświadczenia i zwiększyło wiarygodność badań.

W obu doświadczeniach testowano działanie granulowanego produktu bazaltowego (Bazalt-S), wytworzonego z pyłu bazaltowego i siarki elementarnej, o zawartości siarki 1,5%. Pył bazaltowy pochodził z produkcji ubocznej Przedsiębiorstwa Surowców Skalnych „BAZALT-GRACZE", a siarka z przedsiębiorstwa „Siarkopol-Tarnobrzeg". Skład pyłu bazaltowego przedstawiono w tabeli 2.

Schemat pojedynczego doświadczenia obejmował: dwie gleby: A – średnia i B – lekka (I czynnik) oraz dwa warianty nawożenia: 0 – bez nawozu i granulat Bazalt-S (II czynnik). Łącznie wykorzystano 32 poletka (2 doświadczenia × 2 gleby × 2 sposoby × 4 powtórzenia).

Granulat Bazalt-S został wysiany ręcznie, a następnie wymieszany z glebą 2 tygodnie przed siewem roślin. Wraz z produktem Bazalt-S pod pszenicę zastosowano 30 kg/ha, a pod groch 20 kg/ha siarki. Dawki granulatu wyliczono na podstawie dawek siarki (tab. 3). Nawożenie NPK zastosowano jako tło, identyczne na wszystkie poletka doświadczalne w ramach jednego gatunku rośliny.

Pojawiające się zachwaszczenie usuwano ręcznie. Mikropoletka były osłonięte siatką w celu zabezpieczenia dojrzewającego ziarna przed ptakami i systematycznie podlewane w okresach bez opadów. Podlewanie mikropoletek w znacznym stopniu uniezależniło rośliny od warunków pogodowych i uwiarygodniło wnioskowanie na podstawie jednego roku badań.

Rośliny zbierano w fazie pełnej dojrzałości. Po zbiorze rośliny rozdzielano odpowiednio na kłos/strąki/słomę, a po wysuszeniu na ziarno/nasiona. Kłosy i strąki obcinano, dosuszano, a następnie ręcznie młócono. Plon ziarna/nasion i słomy określano indywidualnie dla każdego mikropoletka. Próbki ziarna, nasion i słomy pobierano z każdego mikropoletka, mielono i poddawano analizom chemicznym. Szczegółowe terminy zabiegów agrotechnicznych przedstawiono w tabeli 4.

Przed wypełnieniem mikropoletek glebami A i B zgromadzonymi na pryzmach, pobrano z nich reprezentatywne próbki w celu określenia początkowych właściwości gleb. Po zbiorze roślin z każdego poletka pobierano próbki gleby z warstwy 0–20 cm przy pomocy laski glebowej Egnera. W obrębie jednego poletka pobrano 5 próbek jednostkowych, z których przygotowano próbkę średnią, którą po wysuszeniu przesiano przez sito o średnicy 2 mm.

Analizy chemiczne

W próbkach glebowych oznaczano skład granulometryczny metodą areometryczną (PN-R-04033:1998), pH – metodą potencjometryczną w roztworze KCl (ISO10390:2005), zawartość węgla organicznego (C_{org}) metodą Tiurina (PB 021 – wyd. IV – 28.08.2020), zawartość przyswajalnego P i K metodą Egnera-Riehma (PN-R-04022:1996) oraz Mg metodą Schachtschabela (PN-R-04020:1994). Ponadto w glebie oznaczano Ca wymienny metodą FAAS (PB 030 – wyd. IV – 28.03.2022) i S-SO_4 metodą ICP-OES (PB 110.3 – wyd. II – 17.06.2013).

W próbkach ziarna, nasion i słomy, po ich uprzedniej mineralizacji mikrofalowej, oznaczono zawartość siarki me-

Tabela 1. Charakterystyka gleb doświadczalnych
Table 1. Characteristics of experimental soils

Gleba Soil	pH KCl	P	K	Mg	S-SO_4	C_{org}	Frakcja [mm] – Fraction [mm]			
							2,0–0,05	0,05–0,002	< 0,02	< 0,002
		[mg/kg]				[%]				
A – średnia – medium	6,4	83 ś	191 w	63 ś	6,5 n	0,8	65,9	30,1	24,4	4,0
B – lekka – light	6,2	93 w	213 bw	84 bw	5,8 n	0,7	69,9	26,5	19,2	3,6

Ocena zawartości S według Kabaty-Pendias i wsp. (1993); ocena P, K, Mg według Zaleceń nawozowych (1990) – S assement according to Kabata-Pendias et al. (1993); P, K, Mg assement according to Fertilizer Recommendations (1990)
n – niska – low, ś – średnia – medium, w – wysoka – high, bw – bardzo wysoka – very high

Tabela 2. Skład pyłu bazaltowego [g/kg]
Table 2. Composition of basalt dust [g/kg]

Si	Ti	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	P	S	Cl	F	LOI
189,7	13,0	28,4	41,9	1,5	85,3	91,7	24,5	7,0	4,1	0,04	1,0	0,1	19,0

LOI – straty prażenia – loss on ignition

Tabela 3. Dawki granulatu Bazalt-S i NPK zastosowane pod pszenicę i groch [kg/ha]
Table 3. Doses of Basalt-S and NPK applied to wheat and pea [kg/ha]

Roślina – Plant	Bazalt-S	N	P_2O5	K_2O
Pszenica – Wheat	2000 (w tym 30 kg S) (including 30 kg S)	100 (w tym 40 kg pogłównie) (including 40 kg top dressing)	50	100
Groch – Pea	1333 (w tym 20 kg S) (including 20 kg S)	20 (całość pogłównie) (the whole top dressing)	30	30

Tabela 4. Terminy zabiegów agrotechnicznych
Table 4. Dates of agrotechnical treatments

Zabieg – Treatment	Pszenica – Wheat	Groch – Pea
Aplikacja NPK i granulatu Bazalt-S – Application NPK and Bazalt-S	01.03	01.03
Siew – Sowing	15.03	14.03
Wschody – Sunrises	04.04	09.04
Pogłówna aplikacja N – Top dressing application N	09.05	09.05
Zbiór – Harvest	05.08	04.07
Pobranie próbek glebowych – Collection of soil samples	11.08	11.08

todą ICP-OES (PB 111 – wyd. IV – 24.02.2020). Zawartość całkowitą metioniny wyznaczono metodą hydrolizy kwaśnej przez 22 h w 110°C z 4M kwasem metanosulfonowym. Zobojętnione próbki analizowano techniką chromatografii oddziaływań hydrofilowych (HILIC) na kolumnie Waters Atlantis Premiere Z-HILIC (150 × 2,1 mm, ziarno 2,5 µm) stosując 17 min gradient od 10 do 50% 20 mM wodnego mrówczanu amonu pH 3 w acetonitrylu. Do detekcji jonów aminokwasów zastosowano spektrometr mas wysokiej rozdzielczości Bruker Impact II HD. Z uzyskanych danych wyodrębniono chromatogramy jonowe dla protonowanych cząsteczek metioniny, cystyny oraz ich wzorców wewnętrznych. Podstawą kalibracji (w zakresie 10–1000 µM) była zależność pomiędzy stężeniem danego aminokwasu a proporcją pola powierzchni jego piku do pola powierzchni piku jego wzorca wewnętrznego. Zawartość białka obliczono jako proporcję sumy zawartości wszystkich aminokwasów białkowych do suchej masy użytego materiału roślinnego.

Większość analiz chemicznych materiału glebowego i roślinnego wykonano w Głównym Laboratorium Chemicznym Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowego Instytutu Badawczego w Puławach, akredytowanym przez Polskie Centrum Akredytacji (certyfikat numer AB 339 na podstawie normy PN-EN ISO/IEC 17025). Analizy aminokwasów obejmujące zawartość metioniny, cystyny oraz białka wykonano w Zakładzie Biochemii i Jakości Plonów IUNG – PIB.

Obliczenia statystyczne

Odczyn gleby oraz zawartość w niej wapnia i magnezu, zawartość siarki w glebach i roślinach, pobranie siarki oraz zawartość metioniny, cystyny i białka w ziarnie i nasionach poddano dwuczynnikowej analizie wariancji z wykorzystaniem testu Tukeya HSD ($P < 0,05$) przy wykorzystaniu programu AWAR opracowanego w IUNG – PIB (Filipiak i Wilkos 1995).

Wyniki i dyskusja / Results and discussion

Odczyn gleby i zawartość w niej magnezu i wapnia

Nawożenie siarką, często niezbędne dla roślin, zwłaszcza gatunków siarkolubnych, na ogół przyczynia się do zakwaszenia gleby w stopniu zależnym od wielkości dawki siarki oraz intensywności mikrobiologicznych przemian tego składnika w glebie. Gupta i wsp. (1988) po pięciu latach corocznego stosowania 22 i 44 kg/ha siarki elementarnej stwierdzili obniżenie pH gleby z 5,7 na obiekcie kontrolnym do 5,2 i 4,7 odpowiedno na obiektach z siarką. W badaniach Skwierawskiej i wsp. (2008), po trzech latach corocznego stosowania siarki elementarnej w dawce 40 kg/ha, stwierdzono obniżenie wartości pH z 5,9 do 4,4. W doświadczeniu polowym prowadzonym przez Filipek-Mazur i wsp. (2018) jednorazowa aplikacja siarki elementarnej skutkowała obniżeniem pH gleby z 6,0 do 5,8 i 5,7, adekwatnie do dawek 25 i 50 kg S/ha. Analogiczne dawki siarki w formie siarczanu amonu po roku od zastosowania zmieniły pH z 6,0 na 5,8 i 5,6. Znaczne obniżenie się odczynu gleby pod wpływem stosowania siarki odnotowali również Kulczycki (2004), Karimizarchi i wsp. (2014) oraz Akay i wsp. (2019) w doświadczeniach wazonowych.

Zakwaszenie gleby wskutek nawożenia siarką jest zjawiskiem niekorzystnym, ponieważ większość gleb naszego kraju charakteryzuje się zbyt niskim pH. W odróżnieniu od wymienionych przykładów zakwaszającego działania siarki,

aplikacja tego składnika w połączeniu z pyłem bazaltowym w formie badanego granulatu, nie powodowała obniżenia pH analizowanych gleb doświadczalnych (tab. 5). Zarówno po zbiorze pszenicy, jak i po zbiorze grochu nie odnotowano zmiany wartości tego parametru w porównaniu do obiektu, na którym nie stosowano testowanego granulatu. Prawdopodobnie bazalt, będący nośnikiem siarki, przeciwdziałał zakwaszeniu gleby, z uwagi na stosunkowo dużą zawartość magnezu i wapnia (tab. 2).

Po zastosowaniu granulowanego pyłu bazaltowego z dodatkiem siarki, zawartość przyswajalnego magnezu wzrosła istotnie tylko w glebie lekkiej (B), na której rosła pszenica, natomiast po zbiorze grochu stwierdzono tylko nieudowodnioną tendencję wzrostu zawartości tego składnika (tab. 5). W glebie średniej (A) nie odnotowano istotnych zmian zawartości przyswajalnego magnezu. Równocześnie stwierdzono wzrost zawartości wapnia wymiennego w obu glebach, ale tylko na stanowiskach po pszenicy.

Zawartość siarki w glebie i roślinach

Z wielu badań wynika, że nawożenie siarką w formie siarczanowej może powodować wzrost zawartości tego składnika w roślinach pszenicy. Habtegebrial i Singh (2009) uzyskali istotny wzrost koncentracji siarki w ziarnie pszenicy na skutek aplikacji 60 kg/ha S w postaci siarczanu amonu, Filipek-Mazur i wsp. (2017) po aplikacji 25 kg/ha w formie siarczanu amonu i saletrosanu, a Klikocka i wsp. (2016) po zastosowaniu 50 kg/ha S w postaci siarczanu magnezu. Gondek i Gondek (2010) natomiast nie stwierdzili wzrostu zawartości siarki ani w ziarnie, ani w słomie pszenicy w wyniku zastosowania 20 kg S/ha w formie siarczanu amonu.

Siarka elementarna zastosowana do gleby działa wolniej niż siarczanowa, ponieważ najpierw ulega biologicznemu utlenieniu do formy siarczanowej, która jest dostępna dla roślin. Na proces ten wpływa szereg czynników, takich jak wielkość i aktywność biologiczna mikroorganizmów, temperatura gleby, stopień rozdrobnienia nawozu oraz czas jaki upłynął od aplikacji siarki (Eriksen i wsp. 1995; Wen i wsp. 2001; McGrath i wsp. 2003).

W przeprowadzonych badaniach stwierdzono, że aplikacja siarki elementarnej razem z pyłem bazaltowym spowodowała istotny wzrost zawartości siarki siarczanowej w glebie, zwłaszcza w glebie B (lekkiej), w której zawartość na obiekcie kontrolnym była istotnie mniejsza niż w glebie A (średniej) (rys. 1). Po pszenicy i po grochu w glebie B stwierdzono odpowiednio o 81 i 67% więcej tego składnika w porównaniu z kontrolą, a w glebie A (średniej) o 36 i 27% więcej.

W konsekwencji wzrostu zawartości w glebie siarki siarczanowej, przyswajalnej dla roślin, w pszenicy na obu glebach nastąpił podobny 7–8% wzrost koncentracji siarki w ziarnie i 10–12% wzrost w słomie w porównaniu z kontrolą (rys. 2). W grochu natomiast, niezależnie od rodzaju gleby, odnotowano wzrost zawartości S tylko w słomie. Stwierdzono w niej 15 i 18% więcej tego pierwiastka w porównaniu z kontrolą, odpowiednio na glebie A i B (rys. 3).

Pobranie siarki przez rośliny

W okresie wegetacji pszenica pobrała istotnie więcej siarki z gleby nawożonej badanym granulatem, niż z gleby obiektu kontrolnego (rys. 4). Większa różnica w pobraniu siarki między tymi obiektami wystąpiła na glebie A (średniej) niż na B (lekkiej). Z gleby A rośliny nawożone granulatem bazaltowo-siarkowym pobrały w sumie (ziarno + słoma) 17% więcej siarki w porównaniu z kontrolą, przy czym różnica ta dla ziarna wynosiła 14%, a dla słomy 23%. Z gleby B pszenica nawożona granulatem pobrała ogólnie 10% więcej siarki w porównaniu z kontrolą. Dla ziarna różnica w pobraniu siarki między obiektem nawożonym i kontrolą wynosiła 9%, a dla słomy 10%.

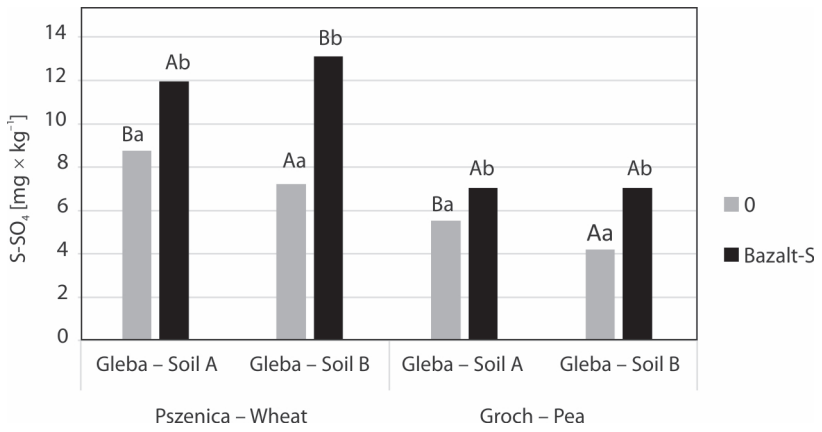
Sumaryczne pobranie siarki przez groch z gleby A (średniej) nawożonej granulatem było większe o 35%, a z gleby

Tabela 5. Odczyn i zawartość składników pokarmowych w glebie po zbiorze roślin doświadczalnych
Table 5. Soil pH and soil nutrient content after harvest of experimental plants

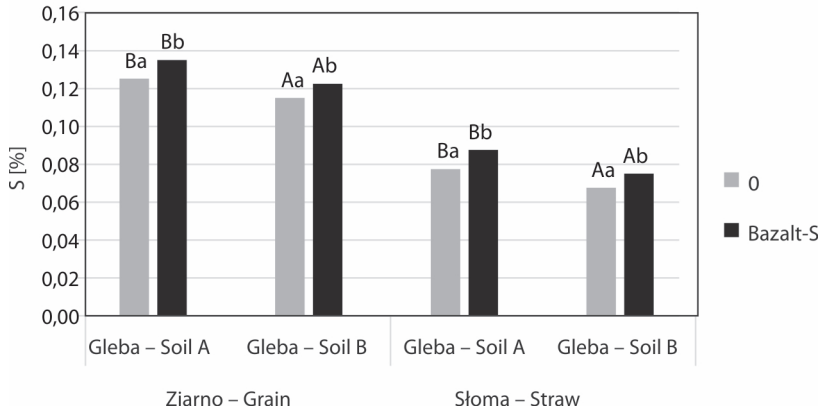
Gleba Soil	Granulat Granules	Pszenica – Wheat			Groch – Pea		
		pH KCl	Mg	Ca	pH KCl	Mg	Ca
			[mg/kg]			[mg/kg]	
A (średnia) (medium)	0	6,1 Aa	69 Aa	823 Ba	6,1 Aa	66 Aa	840 Ba
	Bazalt-S	6,2 Aa	68 Aa	868 Bb	6,1 Aa	68 Aa	835 Ba
B (lekka) (light)	0	6,0 Aa	90 Ba	628 Aa	6,0 Aa	82 Ba	738 Aa
	Bazalt-S	6,0 Aa	110 Bb	712 Ab	5,9 Aa	86 Ba	718 Aa

Różne duże litery przy liczbach pokazują istotną różnicę pomiędzy glebami w ramach jednego wariantu nawożenia (porównanie I czynnika na tle II), natomiast różne małe litery wskazują na istotną różnicę pomiędzy wariantami nawożenia w ramach tej samej gleby (porównanie czynnika II na tle I) (według testu Tukeya HSD, P < 0,05)

Different capital letters next to the numbers show a significant difference between the soils within one fertilization variant (comparison of factor I against II), while different lowercase letters indicate a significant difference between fertilization variants within the same soil (comparison of factor II against I) (according to Tukey HSD test, P < 0.05)



Rys. 1. Zawartość siarki w glebie. Różne duże litery nad słupkami pokazują istotną różnicę pomiędzy glebami w ramach jednego wariantu nawożenia (porównanie I czynnika na tle II), natomiast różne małe litery wskazują na istotną różnicę pomiędzy wariantami nawożenia w ramach tej samej gleby (porównanie czynnika II na tle I) (według testu Tukeya HSD, P < 0,05)
Fig. 1. Sulphur concentration in soil. Different capital letters above the bars show a significant difference between soils within one fertilization variant (comparison of factor I against II), while different lowercase letters indicate a significant difference between fertilization variants within the same soil (comparison of factor II against I) (according to Tukey HSD test, P < 0.05)



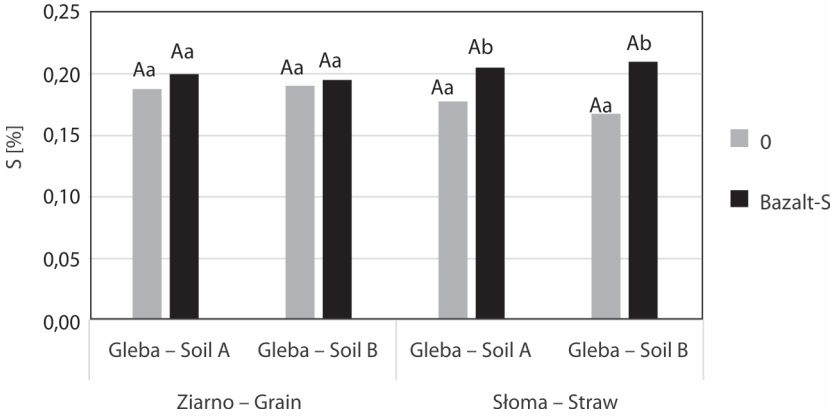
Rys. 2. Zawartość siarki w roślinach pszenicy. Różne duże litery nad słupkami pokazują istotną różnicę pomiędzy glebami w ramach jednego wariantu nawożenia (porównanie I czynnika na tle II), natomiast różne małe litery wskazują na istotną różnicę pomiędzy wariantami nawożenia w ramach tej samej gleby (porównanie czynnika II na tle I) (według testu Tukeya HSD, P < 0,05)
Fig. 2. Sulphur concentration in wheat. Different capital letters above the bars show a significant difference between soils within one fertilization variant (comparison of factor I against II), while different lowercase letters indicate a significant difference between fertilization variants within the same soil (comparison of factor II against I) (according to Tukey HSD test, P < 0.05)

B (lekkiej) o 22% większe w porównaniu z odpowiednimi obiektami kontrolnymi (rys. 5). W odróżnieniu od pszenicy, rośliny grochu na obu glebach znacznie więcej siarki zgromadziły w słomie niż w nasionach. Różnica w pobraniu tego składnika między obiektem nawożonym a kontrolą wynosiła dla nasion 18 i 7% odpowiednio na glebie A i B, a dla słomy 43 i 33%.

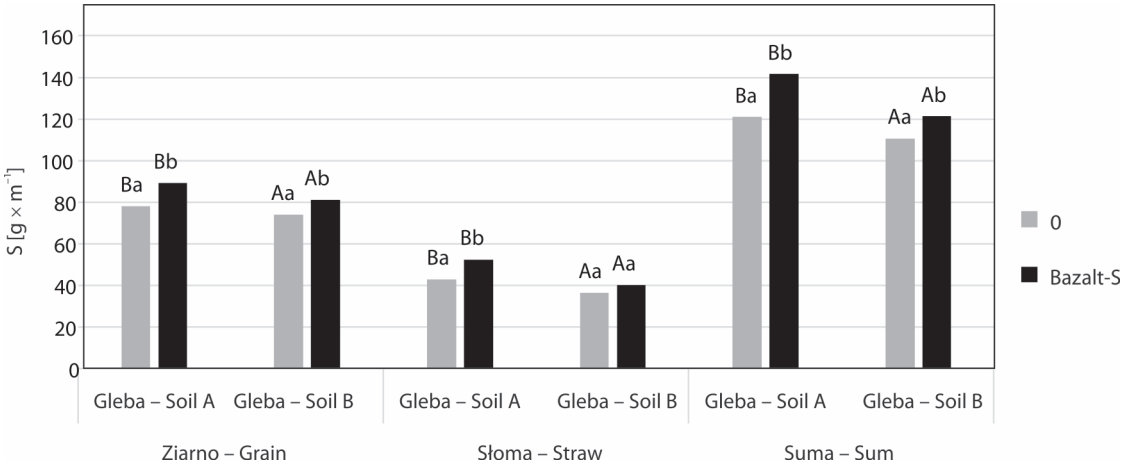
Zawartość metioniny, cystyny i białka w ziarnie i nasionach

Metionina, obok cysteiny i cystyny, należy do grupy aminokwasów siarkowych, przy czym jest ona aminokwasem niezbędnym w żywieniu ludzi i zwierząt monogastrycznych. Często do aminokwasów niezbędnych włącza się również cysteinę, ponieważ może być syntezowana tylko z metioniny, a dwie cząsteczki cysteiny tworzą cystynę. Metionina jest równocześnie aminokwasem egzogennym, co oznacza, że nie może być syntetyzowana w organizmie człowieka i zwierząt i musi być dostarczona wraz z pokarmem białkowym o odpowiednim składzie.

Przy niedostatecznej ilości siarki w glebie może nastąpić pogorszenie jakości produktów przeznaczonych do spożycia pod względem składu aminokwasowego. Järvan i wsp. (2012) stwierdzili mniejszą zawartość metioniny w ziarnie



Rys. 3. Zawartość siarki w roślinach grochu. Różne duże litery nad słupkami pokazują istotną różnicę pomiędzy glebami w ramach jednego wariantu nawożenia (porównanie I czynnika na tle II), natomiast różne małe litery wskazują na istotną różnicę pomiędzy wariantami nawożenia w ramach tej samej gleby (porównanie czynnika II na tle I) (według testu Tukeya HSD, P < 0,05)
Fig. 3. Sulfur concentration in pea. Different capital letters above the bars show a significant difference between soils within one fertilization variant (comparison of factor I against II), while different lowercase letters indicate a significant difference between fertilization variants within the same soil (comparison of factor II against I) (according to Tukey HSD test, P < 0.05)

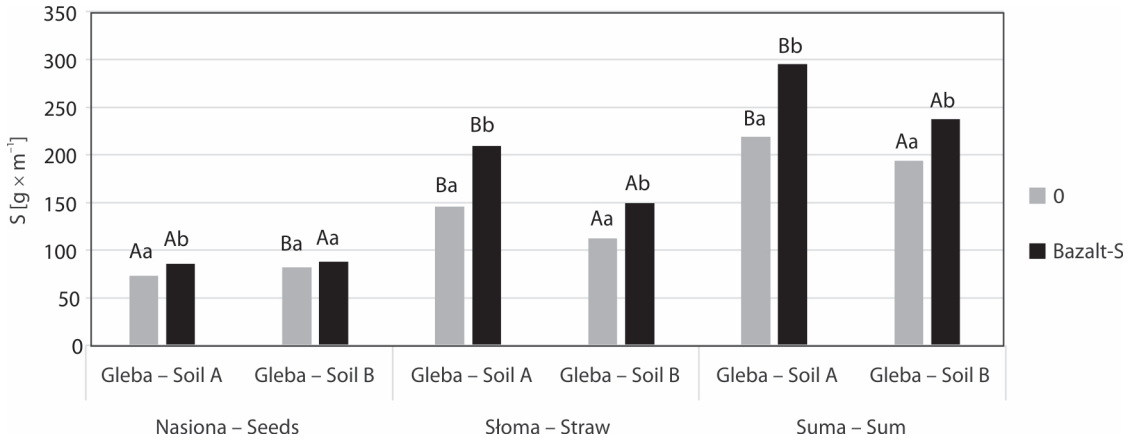


Rys. 4. Pobranie siarki przez pszenicę. Różne duże litery nad słupkami pokazują istotną różnicę pomiędzy glebami w ramach jednego wariantu nawożenia (porównanie I czynnika na tle II), natomiast różne małe litery wskazują na istotną różnicę pomiędzy wariantami nawożenia w ramach tej samej gleby (porównanie czynnika II na tle I) (według testu Tukeya HSD, P < 0,05)
Fig. 4. Sulfur uptake by wheat. Different capital letters above the bars show a significant difference between soils within one fertilization variant (comparison of factor I against II), while different lowercase letters indicate a significant difference between fertilization variants within the same soil (comparison of factor II against I) (according to Tukey HSD test, P < 0.05)

pszenicy w wyniku nawożenia azotem. Dopiero wspólne nawożenie N i S powodowało wzrost zawartości tego aminokwasu.

Wiele badań potwierdza wzrost zawartości aminokwasów siarkowych w ziarnie pszenicy i nasionach bobowatych wskutek nawożenia siarką (tab. 6). Aplikacja 12 kg/ha S w uprawie pszenicy spowodowała 13–21% wzrost zawartości metioniny oraz 13–19% cysteiny w ziarnie (Järvan i wsp. 2012). Podobnie Tao i wsp. (2018) w wyniku zastosowania 45 kg/ha S odnotowali 12–18% wzrost zawartości metioniny i 14–22% cysteiny, a Klikocka i wsp. (2016) pod wpływem 50 kg/ha S zaobserwowali 17% wzrost zawartości metioniny i 6% cystyny w ziarnie pszenicy. Nawożenie siarką fasoli w dawce 50 kg/ha S przyniosło efekt w postaci 22% wzrostu zawartości metioniny i 10% wzrostu cysteiny w nasionach (Głowacka i wsp. 2016).

W prezentowanych badaniach zawartość metioniny w ziarnie pszenicy z obiektu kontrolnego na glebie A (średniej) była istotnie większa niż na glebie B (lekkiej) i wynosiła odpowiednio 2,08 i 1,63 µg/g s.m. Po zastosowaniu dawki 30 kg/ha S w formie Bazaltu-S uzyskano 28% wzrost zawartości metioniny w ziarnie pszenicy, ale wyłącznie na



Rys. 5. Pobranie siarki przez groch. Różne duże litery nad słupkami pokazują istotną różnicę pomiędzy glebami w ramach jednego wariantu nawożenia (porównanie I czynnika na tle II), natomiast różne małe litery wskazują na istotną różnicę pomiędzy wariantami nawożenia w ramach tej samej gleby (porównanie czynnika II na tle I) (według testu Tukeya HSD, $P < 0,05$)
Fig. 5. Sulfur uptake by pea. Different capital letters above the bars show a significant difference between soils within one fertilization variant (comparison of factor I against II), while different lowercase letters indicate a significant difference between fertilization variants within the same soil (comparison of factor II against I) (according to Tukey HSD test, $P < 0.05$)

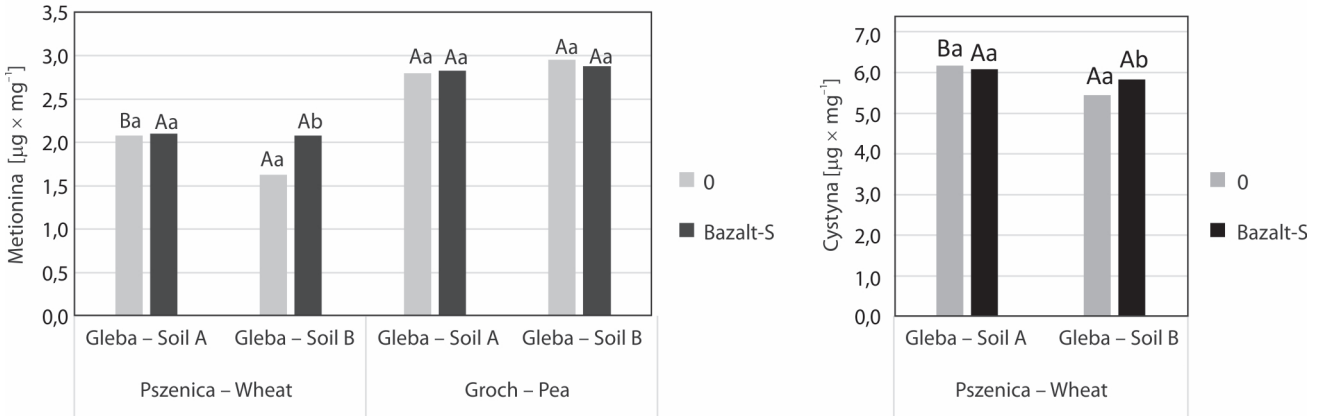
Tabela 6. Wpływ nawożenia siarką na zawartość metioniny w ziarnie i nasionach według różnych autorów
Table 6. The effect of sulfur fertilization on methionine content in grain and seeds according to various authors

Gatunek Species	Autor Author	Gleba/odmiana Soil/cultivar	Dawka S Dose S [kg/ha]	Metionina Methionine		Cystyna Cystine		Cysteina Cysteine	
				[µg/mg]	[%]	[µg/mg]	[%]	[µg/mg]	[%]
Pszenica Wheat	Klikocka i wsp. (2016) Klikocka et al. (2016)	–	0 50	2,90 a 3,38 b	100 117	4,14 a 4,39 b	100 106	–	–
	Järvan i wsp. (2012) Järvan et al. (2012)	Calaric cambisol	0 12	1,47 a 1,67 a	100 113	–	–	1,92 a 2,17 a	100 113
		Podzoluvisol	0 12	1,68 a 2,04 b	100 121	–	–	2,30 a 2,73 b	100 119
	Tao i wsp. (2018) Tao et al. (2018)	GY2018	0 45	2,95 a 3,49 b	100 118	–	–	2,55 a 3,10 b	100 122
		ZM8	0 45	2,55 a 2,85 b	100 112	–	–	2,15 a 2,45 b	100 114
Fasola Bean	Głowacka i wsp. (2019) Głowacka et al. (2019)	–	0 50	3,40 a 4,16 b	100 122	–	–	2,94 a 3,24 b	100 110

glebie lekkiej (rys. 6). W grochu natomiast nie stwierdzono istotnych statystycznie zmian zawartości metioniny. Równocześnie w ziarnie pszenicy o 8% wzrosła zawartość cystyny, której ziarno z obiektu kontrolnego na glebie lekkiej również było istotnie uboższe w ten aminokwas w porównaniu z glebą średnią (rys. 6).

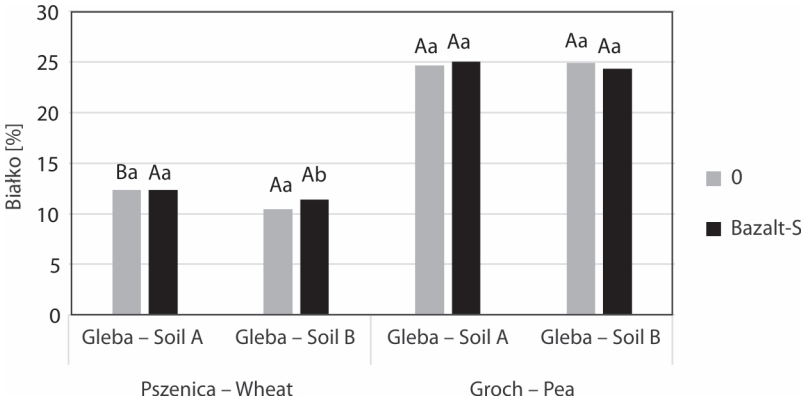
Większość białek pochodzenia roślinnego zaliczana jest do białek niepełnowartościowych, ze względu na mniejszą zawartość niezbędnych, egzogennych aminokwasów: lizyny, tryptofanu, metioniny i waliny. Ich ilość decyduje o jakości białka, zgodnie z pojęciem aminokwasu ograniczającego, czyli takiego, którego jest najmniej w porównaniu do białka wzorcowego (Jarosz i wsp. 2020).

Pszenica, w zależności od jej przeznaczenia, na paszę lub do konsumpcji, powinna zawierać w ziarnie około 11–12% białka w suchej masie, przy optymalnej dawce azotu. Niekiedy wymagana jest zawartość nawet powyżej 13%. Niska zawartość białka, oznacza niedostateczne nawożenie azotem lub deficyt siarki, który to pierwiastek intensyfikuje przemiany azotu w związki białkowe. W przypadku tych



Rys. 6. Zawartość metioniny w ziarnie pszenicy i nasionach grochu oraz cystyny w ziarnie pszenicy. Różne duże litery nad słupkami pokazują istotną różnicę pomiędzy glebami w ramach jednego wariantu nawożenia (porównanie I czynnika na tle II), natomiast różne małe litery wskazują na istotną różnicę pomiędzy wariantami nawożenia w ramach tej samej gleby (porównanie czynnika II na tle I) (według testu Tukeya HSD, P < 0,05)

Fig. 6. Methionine concentration in wheat grain and pea seeds and cystine content in wheat grain. Different capital letters above the bars show a significant difference between soils within one fertilization variant (comparison of factor I against II), while different lowercase letters indicate a significant difference between fertilization variants within the same soil (comparison of factor II against I) (according to Tukey HSD test, P < 0.05)



Rys. 7. Zawartość białka (suma wszystkich aminokwasów białkowych) w ziarnie pszenicy i nasionach grochu. Różne duże litery nad słupkami pokazują istotną różnicę pomiędzy glebami w ramach jednego wariantu nawożenia (porównanie I czynnika na tle II), natomiast różne małe litery wskazują na istotną różnicę pomiędzy wariantami nawożenia w ramach tej samej gleby (porównanie czynnika II na tle I) (według testu Tukeya HSD, P < 0,05)

Fig. 7. Protein content (sum of all protein amino acids) in wheat grain and pea seeds. Different capital letters above the bars show a significant difference between soils within one fertilization variant (comparison of factor I against II), while different lowercase letters indicate a significant difference between fertilization variants within the same soil (comparison of factor II against I) (according to Tukey HSD test, P < 0.05)

badań zawartość białka w ziarnie pszenicy rosnącej na glebie A (średniej) wynosiła powyżej 12%, a nawożenie siarką w formie Bazaltu-S nie spowodowało wzrostu jego zawartości (rys. 7). Natomiast na glebie B (lekkiej) pszenica zawierała tylko 10,4% białka w ziarnie i w tym przypadku nawożenie siarką przyniosło efekt w postaci wzrostu jego zawartości do 11,4%.

W nasionach grochu odnotowano około 25% białka w suchej masie, niezależnie od rodzaju gleby (rys. 7). Jednocześnie nie stwierdzono reakcji na nawożenie siarką w postaci wzrostu jego zawartości w nasionach.

Wnioski / Conclusions

1. Nawożenie pszenicy siarką w dawce 30 kg/ha S oraz grochu w dawce 20 kg/ha S w postaci granulatu bazaltowo-siarkowego (Bazalt-S) nie powodowało zakwasze-

nia gleb doświadczalnych, przy jednoczesnym wzroście zawartości wapnia wymiennego. Gleba lekka została wzbogacona również w przyswajalny magnez.

2. Po aplikacji siarki elementarnej w postaci granulatu Bazalt-S stwierdzono wzrost zawartości siarki siarczanowej w obu glebach, przy czym wzrost ten był większy w glebie lekkiej, gdzie wyjściowa zawartość S była mniejsza niż w glebie średniej.
3. W wyniku nawożenia produktem Bazalt-S uzyskano wzrost zawartości siarki w ziarnie i słomie pszenicy. W przypadku grochu zaobserwowano wzrost zawartości tego składnika jedynie w słomie.
4. Sumaryczne pobranie siarki przez oba gatunki roślin było istotnie większe na obiektach nawożonych granulatem Bazalt-S niż na obiektach kontrolnych, przy czym groch akumulował ponad dwukrotnie więcej siarki niż pszenica. Jednocześnie zaobserwowano większą akumulację siarki w obu gatunkach na glebie średniej niż lekkiej, co wynikało z lepszego plonowania roślin na glebie średniej.
5. Nawożenie pszenicy granulatem bazaltowo-siarkowym skutkowało wzrostem zawartości metioniny, cystyny oraz białka w ziarnie, ale tylko na glebie lekkiej, podczas gdy na glebie średniej takiego wzrostu nie zanotowano.
6. Wzrost zawartości badanych aminokwasów egzogennych oraz białka w ziarnie pszenicy uprawianej na glebie lekkiej i brak takiego efektu w pszenicy uprawianej na glebie średniej, był prawdopodobnie związany z mniejszą początkową zawartością tych składników w ziarnie pochodzącym z uprawy na glebie lekkiej.
7. Wartość odżywcza grochu nie poprawiła się po nawożeniu granulatem bazaltowo-siarkowym. W nasionach nie zmieniła się zawartość aminokwasów, jak również białka, co mogło być spowodowane zastosowaną niższą dawką siarki niż w przypadku pszenicy.

Finansowanie / Funding

Badania przeprowadzone jako część projektu pt. „Poprawa jakości ziarna zbóż oraz nasion rzepaku i roślin bobowatych poprzez innowacyjną technologię uprawy z wykorzystaniem pyłu bazaltowego i siarki" finansowanego w ramach działania Współpraca objętego programem Rozwoju Obszarów Wiejskich na lata 2014–2020.

Literatura / References

Akay A., Şeker C., Negiş H. 2019. Effect of enhanced elemental sulfur doses on pH value of a calcareous soil. Journal of Agricultural Sciences 29, Special Issue: 34–40. DOI: 10.29133/yyutbd.467632

Barczak B., Nowak K., Knapowski T., Ralcewicz M., Kozera W. 2013. Reakcja łubinu wąskolistnego (*Lupinus angustifolius* L.) na nawożenie siarką. Cz. I. Plon oraz wybrane elementy jego struktury. [Reaction of narrow-leafed lupin (*Lupinus angustifolius* L.) to sulphur fertilization. Part I. Yield and selected yield structure components]. Fragmenta Agronomica 30 (2): 23–34.

Barczak B., Nowak K., Moskal M. 2017. Ocena stanu odżywienia łubinu wąskolistnego siarką w fazie dojrzałości pełnej w warunkach nawożenia tym składnikiem. [Assessment of the nutritional status of narrow-leaf lupin of sulphur in full maturity under conditions of fertilization with this nutrient]. Fragmenta Agronomica 34 (3): 25–32.

Bender J., Weigel H.-J. 2011. Changes in atmospheric chemistry and crop health: A review. Agronomy for Sustainable Development 31: 81–89. DOI: 10.1051/agro/2010013

Brzóska F., Śliwiński B., Michalik-Rutkowska O. 2010. Pasze rzepakowe – miejsce w bilansie białkowym kraju oraz wartość pokarmowa. Cz. 1. Wiadomości Zootechniczne 48 (2–3): 11–18.

Chahal H.S., Sing A., Malhi G.S. 2020. Role of Sulphur nutrition in oilseed crop production - A review. Journal of Oilseed Brassica 11 (2): 95–102.

Dyrektywa 2010/75/UE w sprawie emisji przemysłowych (zintegrowane zapobieganie zanieczyszczeniom i ich kontrola) (wersja przekształcona). https://sip.lex.pl/akty-prawne/dzienniki-UE/dyrektywa-2010-75-ue-w-sprawie-emisji-przemyslowych-zintegrowane-67999082 [dostęp: 01.05.2023].

Eriksen J., Mortensen J.V., Nielsen J.D., Nielsen N.E. 1995. Sulphur mineralisation in five Danish soils as measured by plant uptake in a pot experiment. Agriculture, Ecosystems and Environment 56 (1): 43–51. DOI: 10.1016/0167-8809(95)00632-X

Filipek-Mazur B., Gorczyca O., Tabak M. 2017. Wpływ nawozów mineralnych zawierających siarkę na zawartość azotu, siarki oraz aminokwasów siarkowych w nasionach rzepaku jarego i ziarnie pszenicy ozimej. [Effect of mineral fertilizers containing sulfur on the content of nitrogen, sulfur and sulfur amino acids in spring rape seeds and winter wheat grains]. Fragmenta Agronomica 34 (3): 33–43.

Filipek-Mazur B., Tabak M., Gorczyca O., Bobowiec A. 2018. Oddziaływanie nawozów mineralnych zawierających siarkę na właściwości chemiczne gleby. [Influence of mineral fertilizers containing sulfur on soil chemical properties]. Fragmenta Agronomica 35 (3): 55–65. DOI: 10.26374/fa.2018.35.29

Filipiak K., Wilkos S. 1995. Obliczenia statystyczne. Opis systemu AWAR. Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa, Puławy, R (324): 1–52.

Gillman G.P., Burkett D.C., Coventry R.J. 2002. Amending highly weathered soils with finely ground basalt rock. Applied Geochemistry 17 (8): 987–1001. DOI: 10.1016/S0883-2927(02)00078-1

Głowacka A., Gruszecki T., Szostak B., Michałek S. 2019. The response of common bean to sulphur and molybdenum fertilization. International Journal of Agronomy 2019, Article ID 3830712. DOI: 10.1155/2019/3830712

Gondek K., Gondek A. 2010. Wpływ nawożenia mineralnego na plonowanie i zawartość wybranych makro i mikroelementów w pszenicy jarej. [The influence of mineral fertilization on the yield and content of selected macro and microelements in spring wheat]. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering 55 (1): 30–36.

Gupta V.V.S.R., Lawrence J.R., Germida J.J. 1988. Impact of elemental sulfur fertilization on agricultural soils. I. Effects on microbial biomass and enzyme activities. Canadian Journal of Soil Science 68 (3): 463–473. DOI: 10.4141/cjss88-045

Habtegebrial K., Singh B.R. 2009. Response of wheat cultivars to nitrogen and sulfur for crop yield, nitrogen use efficiency, and protein quality in the semiarid region. Journal of Plant Nutrition 32 (10): 1768–1787. DOI: 10.1080/01904160903152616

Janzen H.H., Bettany J.R. 1984. Sulfur nutrition of rapeseed: I. Influence of fertilizer nitrogen and sulfur rates. Soil Science Society of America Journal 48 (1): 100–107. DOI: 10.2136/sssaj1984.03615995004800010019x

Jarosz M., Rychlik E., Stoś K., Charzewska J. 2020. Normy żywienia dla populacji Polski i ich zastosowanie. Narodowy Instytut Zdrowia Publicznego – Państwowy Zakład Higieny, Warszawa, 464 ss.

Järvan M., Edesi L., Adamson A. 2012. The content and quality of protein in winter wheat grains depending on sulphur fertilization. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil and Plant Science 62 (7): 627–636. DOI: 10.1080/09064710.2012.683495

Karimizarchi M., Aminuddin H., Khanif M.Y., Radziah O. 2014. Elemental sulphur application effects on nutrient availability and sweet maize (*Zea mays* L.) response in a high pH soil of Malaysia. Malaysian Journal of Soil Science 18 (1): 75–86.

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 and Environment 62 (5): 230–236. DOI: 10.17221/18/2016-PSE

Krawczyk J., Utnik-Banas K., Sokołowicz Z. 2011. Uwarunkowania rozwoju ekologicznej produkcji drobiarskiej w aspekcie koncepcji rozwoju zrównoważonego. [Factors influencing the development of organic poultry production in terms of the sustainable development concept]. Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu 13 (4): 87–90.

Kulczycki G. 2004. Wpływ nawożenia siarką elementarną na zawartość mikroelementów w roślinach i glebach. Cz. I. Cynk, miedź. [Effect of elementary sulphur fertilization on the content of micronutrients in plants and soils. Part I. Copper and zinc]. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych 502 (1): 199–206.

McGrath S.P., Zhao F., Blake-Kalff M.M. 2003. Sulphur in soil: processes, behavior and measurement. Nawozy i Nawożenie 5 (2): 28–54.

Rachwał A. 2016. Wpływ metioniny i lizyny na wzrost kurcząt brojlerów i jakość tuszek. Hodowca Drobiu 8: 27–29.

Raport MKIŚ 2022. Krajowy bilans emisji SO2, NOx, CO, NH3, NMLZO, pyłów, metali ciężkich i TZO za lata 1990–2020. Raport syntetyczny. Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Warszawa, 40 ss. https://www.kobize.pl/uploads/materialy/materialy_do_pobrania/krajowa_inwentaryzacja_emisji/Bilans_emisji_za_2020.pdf [dostęp: 01.05.2023].

Scherer H.W. 2008. Impact of sulfur on N_2 fixation of legumes. s. 43–54. W: Sulfur Assimilation and Abiotic Stress in Plants (N.A. Khan, S. Singh, S. Umar, red.). Springer, Berlin, Heideiberg. Print ISBN 978-3-540-76325-3. Online ISBN 978-3-540-76326-0. DOI: 10.1007/978-3-540-76326-0_3

Siebielec G., Smreczak B., Klimkowicz-Pawlas A., Maliszewska-Kordybach B., Terelak H., Koza P., Łysiak M., Gałązka R., Pecio M., Suszek B., Miturski T., Hryńczuk B. 2012. Monitoring chemizmu gleb Polski w latach 2010–2012. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, 196 ss.

Skwierawska M., Zawartka L., Zawadzki B. 2008. The effect of different rates and forms of applied sulphur on nutrient composition of planted crops. Plant Soil and Environment 54 (5): 179–189.

Smith P., House J.I., Bustamante M., Sobocká J., Harper R., Pan G., West P.C., Clark J.M., Adhya T., Rumpel C., Paustian K., Kuikman P., Cotrufo M.F., Elliott J.A., McDowell R., Griffiths R.I., Asakawa S., Bondeau A., Jain A.K., Meersmans J., Pugh T.A.M. 2016. Global change pressures on soils from land use and management. Global Change Biology 22 (3): 1008–1028. DOI: 10.1111/gcb.13068

Szulc W. 2008. Potrzeby nawożenia roślin siarką oraz metody ich wyznaczania. Rozprawa Naukowa 332. Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa, 97 ss.

Tao Z., Chang X., Wang D., Wang Y., Ma S., Yang Y., Zhao G. 2018. Effects of sulfur fertilization and short-term high temperature on wheat grain production and wheat flour proteins. The Crop Journal 6 (4): 413–425. DOI: 10.1016/j.cj.2018.01.007

Wen G., Schoenau J.J., Yamamoto T., Inoue M. 2001. A model of oxidation of an elemental sulfur fertilizer in soils. Soil Science 166 (9): 607–613.

Zenda T., Liu S., Dong A., Duan H. 2021. Revisiting sulphur – the once neglected nutrient: It's roles in plant growth, metabolism, stress tolerance and crop production. Agriculture 11 (7): 626. DOI: 10.3390/agriculture11070626

Zonenberg L., Drażbo A. 2018. Wpływ żywienia kurcząt brojlerów mieszankami o zwiększonym poziomie metioniny na jakość mięśni piersiowych w różnym czasie przechowywania próżniowego w warunkach chłodniczych. [The effect of increased methionine in broiler chicken diets on the quality of breast muscles at different times of vacuum storage under refrigeration]. Roczniki Naukowe Polskiego Towarzystwa Zootechnicznego 14 (2): 49–60.