

ANNA PODLEŚNA

Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy w Puławach

NAWOŻENIE SIARKĄ JAKO CZYNNIK KSZTAŁTUJĄCY
METABOLIZM ROŚLIN UPRAWNYCH I JAKOŚĆ PŁODÓW
ROLNYCH

Sulfur fertilization as a factor effected on crops metabolism and quality of agricultural products

ABSTRAKT: Nowym problemem w krajach europejskich jest pogłębiający się deficyt siarki spowodowany znacznym ograniczeniem emisji gazowych zanieczyszczeń powietrza. Ta sytuacja może doprowadzić do obniżenia poziomu plonowania wielu roślin oraz wpłynąć na pogorszenie ich jakości użytkowej, siarka odgrywa bowiem ważną rolę w metabolizmie. Jest niezbędna w biosyntezie białka, tworzeniu chlorofilu i fotosyntezie. Wiadomo obecnie, że siarka wpływa na smak, zapach i wygląd płodów rolnych, a także na ich wartość przetwórczą i żywieniową. Nadmierne nawożenie siarką może zwiększyć koncentrację glukozytolanów w rzepaku, ale z literatury i badań własnych wynika, że niedobór tego składnika obniża wartość pastewną nasion roślin strączkowych oraz motylkowatych i traw, co jest związane z zahamowaniem syntezy aminokwasów siarkowych. Nawożenie siarką wpływa korzystnie na wydajność i jakość oleju rzepakowego, skład białek zapasowych zbóż oraz podnosi jakość jęczmienia browarnego i wartość technologiczną ziarna pszenicy. Odpowiednie nawożenie siarką przeciwdziała gromadzeniu szkodliwych związków azotowych w korzeniach buraka cukrowego oraz zwiększa zawartość karotenu, witaminy C i skrobi w bulwach ziemniaka. Ponadto, nawożenie tym składnikiem podnosi naturalną odporność roślin na stresy wywołane przez suszę, mróz, choroby i szkodniki.

słowa kluczowe: key words:

siarka – *sulfur*, jakość plonów – *yield quality*, zawartość białka – *protein content*, glukozytolany – *glucosinolates*, fotosynteza – *photosynthesis*

WSTĘP

Nowym problemem w rolnictwie krajów europejskich jest pogłębiający się deficyt siarki spowodowany w ostatnich latach ubiegłego wieku drastycznym zaostrzeniem norm dotyczących ochrony środowiska (29). W tej sytuacji zachodzi obawa, że stosowane zwyczajowo nawożenie NPK nie będzie zbilansowane, a niedobór siarki może ograniczać wykorzystanie pozostałych składników, w tym przede wszystkim azotu. Wiadomo obecnie, że metabolizm azotu w roślinach jest ściśle związany z metabo-

lizmem siarki i niedobór jednego składnika hamuje działanie drugiego (15). Brak siarki ma więc konsekwencje nie tylko w zakresie wielkości uzyskiwanych plonów, ale także pogorszenia ich jakości. Jakość produkowanych surowców roślinnych staje się obecnie ważnym zagadnieniem w warunkach konkurencji krajów europejskich o rynki zbytu we wspólnym obszarze gospodarczym.

Praca ma charakter przeglądowy, a jej celem jest przedstawienie roli siarki w kształtowaniu jakości uzyskiwanych plonów w oparciu o dostępną literaturę i badania własne. W pracy nie omawia się wpływu nadmiaru siarki na jakość produktów rolniczych ze względu na mniejszą obecnie skalę tego zjawiska.

ZNACZENIE SIARKI DLA METABOLIZMU ROŚLIN UPRAWNYCH

Siarka bierze udział zarówno w procesach fizjologicznych przebiegających we wszystkich roślinach, jak i typowych dla poszczególnych gatunków. Przy braku siarki następuje obniżenie natężenia fotosyntezy, biosyntezy białka oraz zawartości kwasów nukleinowych o około 50% lub nawet więcej (8). W warunkach deficytu siarki procesy remobilizacji i retranslokacji siarczanów nie mogą dostarczyć rosnącym częściom roślin wystarczającej ilości jonów SO_4^{2-} . W efekcie, po kilkunastu dniach deficytu, liście stają się chlorotyczne, a najmłodsze z nich przestają rosnać. Całkowita powierzchnia asymilacyjna ulega więc znacznej redukcji. Khurana i Chiralekha (18) stwierdzili ponadto, że deficyt siarki obniżył zarówno zawartość chlorofilu a i b, jak również aktywność reakcji Hilla. Obserwowano także wyraźny spadek aktywności reduktazy azotanowej w liściach kukurydzy nie nawożonej siarką (14). Niedobór siarki jest, zdaniem Millarda i in. (24), związany ze znaczną akumulacją glutaminy i asparaginy, co powoduje zablokowanie syntezy białka ze względu na brak aminokwasów siarkowych. Różnorodne zaburzenia wywołane zmianami w metabolizmie w warunkach niedoboru siarki powodują zmiany w morfologii i właściwościach biochemicznych roślin.

Oddzielnym zagadnieniem jest ochronna rola siarki dla roślin rosnących w warunkach stresowych. Stresy biotyczne będą omówione w rozdziale poświęconym rzepakowi, ze względu na dostępność badań naukowych wykonywanych na tej roślinie. Powszechność występowania w rolnictwie stresów abiotycznych, takich jak: susza, mróz czy nadmiar metali ciężkich, jest powodem podejmowania badań nad wyjaśnieniem mechanizmów, dzięki którym rośliny uprawne są w stanie w takich sytuacjach funkcjonować i wydać plon. Na przykład negatywny wpływ warunków pogodowych na początku wegetacji niejednokrotnie osłabia dalszy wzrost i rozwój roślin. Na ogół prowadzi to do zmniejszenia plonu i pogorszenia jego jakości. Wiadomo obecnie, że odporność roślin uprawnych na mróz jest zależna od zawartości cukrów (aktywność enzymów) i od uwodnienia białek. Zdaniem Lewitta i in. (21), oba wymienione czynniki są związane z obecnością związków zawierających siarkę, zwanych sulfhydrydami (SH). Badania prowadzone na roślinach uprawnych wykazały

wzrost akumulacji SH związany ze wzrostem odporności na chłód. Niewykluczone, że związki te tworzą także ochronę roślin w warunkach suszy, pozwalając na utrzymanie aktywności enzymów i uwodnienia białek. Podleśna i in. (31) stwierdzili korzystny wpływ nawożenia siarką na plon i cechy jakościowe ziarna pszenicy po wystąpieniu długotrwałej suszy wiosennej.

Z kolei białka zawierające siarkę zwane fitochelatynami odgrywają istotną rolę jako czynnik ochronny przed nadmierną koncentracją metali ciężkich w roślinach, zatrzymując ich nadmiar w systemie korzeniowym (40). Fitochelatyny charakteryzują się wysoką zawartością cysteiny oraz kwasu glutaminowego i są syntetyzowane z wykorzystaniem powszechnie występującego w komórkach trójpeptydu – glutationu.

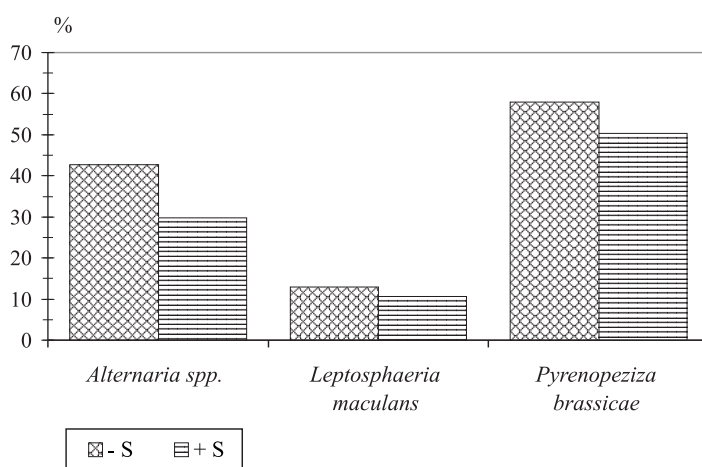
WPLYW SIARKI NA CECHY JAKOŚCIOWE NIEKTÓRYCH ROŚLIN UPRAWNYCH

Rzepak

Rośliny krzyżowe charakteryzują się największym zapotrzebowaniem na siarkę. Największe znaczenie w rolnictwie polskim ma rzepak ozimy. Wysokie zapotrzebowanie rzepaku na siarkę tłumaczy się wysoką koncentracją aminokwasów siarkowych i zawartością specyficznych substancji roślinnych. Ważną rolę wśród nich odgrywają glukozytolany, które wpływają na smak i zapach produktów roślinnych. Badania prowadzone na odmianach podwójnie ulepszonych (35) i mieszańcowych (43) wykazały, że koncentracja glukozytolanów w nasionach rzepaku zwiększa się wraz ze wzrostem nawożenia siarką. Niekorzystnym zjawiskiem jest jednak to, że znaczna ich część trafia, w trakcie pozyskiwania oleju, do śruty rzepakowej i makuchów, które stosowane są jako wysokobiałkowe pasze treściwe. Wzrost zawartości glukozytolanów w nasionach, a następnie w wytlókach rzepakowych obniża ich wartość jako paszy. Wprawdzie same glukozytolany nie są szkodliwe dla zwierząt, ale produkty ich enzymatycznego rozkładu przez mirozynazę stają się toksyczne. Powodują one zaburzenia w funkcjonowaniu tarczycy, wątroby i nerek (38). Dopuszczalny w Polsce i krajach UE poziom sumy glukozytolanów alkenowych w przemysłowych nasionach rzepaku 00 wynosi 25 μM na 1 g suchej masy beztłuszczowej (38). Z drugiej strony siarka obecna w glukozytolanach stanowi zapas tego składnika w roślinie. W warunkach niskiej dostępności siarki i wysokiego na nią zapotrzebowania związki te ulegają rozpadowi i uwolniona siarka może być włączona w przemiany metaboliczne. Zdaniem Schnuga i Ceynowej (37) biologiczna rola glukozytolanów lub produktów ich hydrolizy jest także związana z interakcjami między roślinami krzyżowymi a szkodnikami i patogenami. Autorzy ci stwierdzili, że produkty hydrolizy glukozytolanów hamowały *in vitro* wzrost grzybów *Phoma lingam* i *Sclerotinia sclerotiorum*. Szczegółowe obserwacje prowadzone w Stacjach Doświadczalnych IUNG (16) wykazały istotnie mniejsze porażenie rzepaku przez grzyby chorobotwórcze w obiektach,

w których stosowano nawożenie siarką (rys. 1). Ochronny wpływ zastosowanej siarki stwierdzono szczególnie w odniesieniu do czerni krzyżowych, mączniaka prawdziwego, jasnej plamistości liści oraz w mniejszym stopniu w przypadku suchej zgnilizny kapustnych. Zmniejszenie podatności rzepaku nawożonego siarką na choroby grzybowe stwierdzili także w warunkach Polski Pałosz (28) oraz Sadowski i in. (36). Glukozynolany mogą także oddziaływać silnie toksycznie na mszycę grochową (*Acorthosiphon pisum* H.) i mszycę kapuścianą (*Brevicoryne brassicae* L.), co ogranicza także rozprzestrzenianie się chorób (42). Ochronną rolę względem stresów biotycznych przypisuje się także innym związkom siarkowym obecnym w roślinach, powstającym w procesach redukcji siarczanów, jak siarkowodór (H_2S) znany z oddziaływania grzybobójczego.

Nawożenie siarką, zwłaszcza przy odpowiednio wysokich dawkach azotu może także korzystnie oddziaływać na utrzymanie lub wzrost zawartości tłuszczu w nasionach rzepaku, co stwierdzili w badaniach Losak i Richter (22), Podleśna (30) oraz Rotkiewicz i in. (35). Siarka powoduje na ogół wzrost plonu nasion rzepaku, więc całkowita wydajność tłuszczu z plantacji jest większa. Nawożenie siarką poprawia również wartość odżywczą oleju, zwiększając w nim istotnie udział niezbędnych nienasyconych kwasów tłuszczowych – NNKT (20). Także w przypadku **rzepy i gorczycy sarepskiej** stwierdzono wzrost zawartości oleju po aplikacji $60 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$ (2). Wyniki tej pracy potwierdzają, że połączone nawożenie azotem i siarką miało najkorzystniejszy wpływ na zawartość N i S oraz koncentrację białka i tłuszczu w obu badanych roślinach. Zastosowana siarka spowodowała także korzystne zawężenie stosunku N:S.



Rys. 1. Porażenie roślin rzepaku przez grzyby chorobotwórcze w zależności od nawożenia siarką
Infection of oilseed rape plants by fungal diseases as dependent on sulfur fertilization (16)

Pszenica

Jakość technologiczna pszenic chlebowych jest cechą bardzo złożoną i zależy od wielu czynników. O wartości wypiekowej mąki pszennej i jej przydatności do wytwarzania makaronów decyduje obok wodochłonności i wydajności także ilość i jakość glutenu. Sucha substancja glutenu zawiera 80–90% białek, w tym głównie gliadyny i gluteniny oraz kilka procent albumin i globulin. Składniki glutenu są ze sobą połączone różnymi wiązaniami, m.in. disulfidowymi (4). Dzięki takiej budowie gluten tworzy zwartą sieć, która stanowi podstawę struktury ciasta. Przyjmuje się, że wiele ważnych fizycznych cech ciasta, jak elastyczność i odporność na rozciąganie, jest związanych z zawartością składników siarkowych we frakcjach glutenu (np. aminokwasy zawierające siarkę), ponieważ są one odpowiedzialne za połączenia między molekułami (12). Korzystne oddziaływanie siarki jest w tym przypadku związane z tworzeniem dwusiarczkowych mostków pomiędzy sulhydrowymi grupami cysteiny odpowiedzialnymi za łączenie się frakcji glutenin. Ponieważ gluten jest nierozpuszczalnym w wodzie białkiem, zawartość glutenu w mące jest ściśle związana z zawartością białka w ziarnie. Na obie te cechy zwraca się uwagę przy ocenie wartości wypiekowej pszenicy. Castle i Randall (6) stwierdzili, że przy deficycie siarki następuje skrócenie początkowego okresu rozwoju bielma w ziarniakach. Okres ten charakteryzuje się wysokim wskaźnikiem podziału komórkowego, a niższym tempem akumulacji białka. Zatem właściwe zaopatrzenie roślin w siarkę pozwala na rozwój bielma i wydłużenie czasu nagromadzania białka, dzięki czemu jego ilość w ziarnie wzrasta. Według tych badaczy budowa bielma jest ważnym kryterium przemiałowej i wypiekowej jakości ziarna pszenicy. Szczegółowe badania wykazały ponadto, że zmiany w syntezie białka wywołane deficytem siarki powodują wzrost akumulacji innych białek, które charakteryzują się niską koncentracją cysteiny i metioniny (6); stwierdzono w tych warunkach obniżenie ilości niskomolekularnych albumin oraz α , β i γ gliadyn, a wzrost ilości HMW – glutenin i ω -gliadyn. Biosynteza białka jest uzależniona także od obecności aminokwasów siarkowych, których koncentracja zależy od dostępności siarki. Wiadomo bowiem, że zaopatrzenie roślin w jony SO_4^{2-} wpływa na zawartość kwasu glutaminowego, który jest wyjściowym związkem w syntezie innych aminokwasów, a następnie białek (41). Podleśna i in. (31) stwierdzili w doświadczeniu polowym istotnie wyższą zawartość białka i glutenu w ziarnie pszenicy ozimej odmiany Kobra pochodzącej z obiektów z nawożeniem siarką w stosunku do obiektów, w których od wielu lat nie stosowano nawożenia tym składnikiem (tab. 1). Również mąka otrzymana z tego ziarna miała istotnie wyższą zawartość glutenu. Dla technologii młynarstwa i piekarstwa ważną cechą ziarna jest szklistość. Wyniki wspomnianego doświadczenia z pszenicą ozimą wskazują, że udział ziarn szklistych wzrasta po zastosowaniu nawozów siarkowych (31). Siarka wpływała także na wzrost wartości przemiałowej ziarna, a pieczywo uzyskane z mąki miało o 14% większą objętość w porównaniu z pieczywem z obiektów bez siarki (tab. 2). Według Mossa i in. (27) pszenica dostatecznie zaopatrzona w siarkę daje mąkę o zwiększonej rozciągliwości i elastyczności, co powoduje wzrost objętości bochenków.

Tabela 1

Cechy fizyczno-chemiczne ziarna pszenicy w zależności od nawożenia siarką
Physical and chemical features of wheat grain in dependence on S fertilization (31)

Nawożenie Fertilization	Białko ogółem Total protein (%)	Szklistość Glassiness (%)	Gluten (%)
- S		3,7 a	22,9 a
+ S		4,2 b	23,6 b

* Liczby w kolumnach oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie; Numbers in columns marked by the same letters do not differ significantly

Tabela 2

Ocena pieczywa w zależności od nawożenia siarką
Valuation of bread in dependence on S fertilization (31)

Nawożenie Fertilization	Porowatość miękiszu Porosity of crumb (%)	Objętość pieczywa Bread volume (cm ³)	Upiek Baking (%)
- S	72,7 a*	292,8 a	12,4 a
+ S	75,6 b	334,1 b	13,5 b

* Liczby w kolumnach oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie; Numbers in columns marked by the same letters do not differ significantly

Jęczmień browarny

Literatura dotycząca wpływu siarki na jakość jęczmienia browarnego jest raczej uboga. Od dawna wiadomo jednak, że wysokie nawożenie azotem powoduje wzrost zawartości białka w ziarnie jęczmienia, co nie jest korzystne ze względu na normy technologiczne. Zalecenia dotyczące jęczmienia browarnego zawarte w Polskiej Normie (32) określają, że ziarno technologiczne powinno pozostawać na sicie o średnicy oczek 2,5 mm i zawierać nie więcej niż 9,5–11,5% białka. Z tego względu zaleca się stosowanie niższych dawek N, które powinny być wykorzystane w największym stopniu do produkcji ziarna. Eriksen i in. (11) udowodnili, że w roślinach jęczmienia odpowiednio zaopatrzonych w siarkę 70% azotu obecnego w liściach ulegało redystrybucji do kłosów, natomiast w roślinach z deficytem tego składnika tylko 35%. Uzyskane wyniki świadczą o ścisłym wzajemnym oddziaływaniu azotu i siarki w tworzeniu plonu, ze szczególnym podkreśleniem roli siarki, bowiem efekt plonotwórczy N był mały w warunkach braku S. Cytowane badania weryfikują pogląd, że siarka jest stosunkowo mało mobilna w roślinach. Potwierdzają także, że w fazie dojrzałości od 10 do 44% siarki obecnej w kłosach pochodzi z liści, a pozostała część muszą rośliny pobrać z gleby i przetransportować do organów generatywnych. Stąd obecność siarki przyswajalnej w środowisku glebowym w fazie wypełniania ziarna jest tak ważna

dla odpowiedniego rozwoju nasion i utrzymania właściwej zawartości białka. Już kilka lat wcześniej stwierdzono bowiem, że odpowiednie zaopatrzenie jęczmienia w siarkę powodowało w badanych roślinach wzrost koncentracji metioniny i cysteiny, podczas gdy rośliny z deficytem siarki wykazywały wysoką zawartość azotanów i wolnych aminokwasów (26). Ponadto aplikacja siarki mineralnej obniżała stosunek N: S, przez co dodatkowo wzrastała jakość ziarna. Bardzo ogólne informacje wskazują, że niedobór siarki powoduje zmniejszenie ilości hordein, czyli białek typowych dla ziarna jęczmienia (6). Siarka powoduje więc nie tylko poprawę jakości nasion, ale i lepsze wykorzystanie niższej dawki azotu. Spostrzeżenia te potwierdzają badania Potarzyckiego (33), który wykazał, że nawożenie siarką zwiększa plon jęczmienia jarego, przy zachowaniu odpowiedniej jakości ziarna.

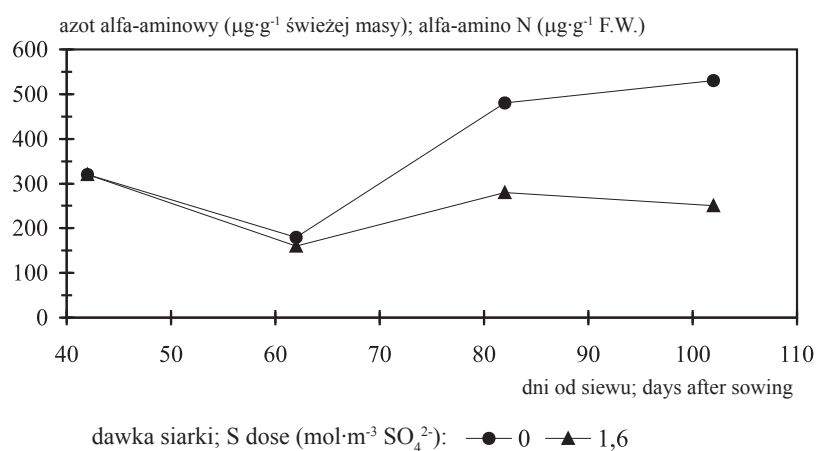
Ziemniak

Doniesienia literatury krajowej i zagranicznej potwierdzają korzystne oddziaływanie jonów siarczanowych w uprawie ziemniaka zarówno w aspekcie wielkości plonu bulw, jak i jego jakości. Klikocka i in. (19) uzyskali wyższy plon suchej masy bulw pod wpływem nawożenia różnymi formami siarki. Zastosowanie siarczanu wapnia zwiększało zawartość białka w bulwach ziemniaka i zmniejszało intensywność ich ciemnienia enzymatycznego (25). Skłonność do ciemnienia w stanie surowym oraz po ugotowaniu nie jest korzystna z punktu widzenia jakościowych cech ziemniaka i zależy od zawartości potasu. Stwierdzono, że bulwy zawierające 2,2–2,5% K w suchej masie praktycznie nie ciemnieją oraz lepiej się przechowują, ponieważ są bardziej odporne na choroby. Wykazano także, że nawożenie siarką powoduje wzrost zawartości w bulwach podstawowych makro- i mikroelementów oraz zwiększa ich pobranie (10). Dotyczy to także potasu. Z kolei El-Fayoumy i El-Gamal (9) podają, że nawożenie siarką sprzyja wzrostowi zawartości w bulwach karotenu, witaminy C, białka i skrobi. Potwierdzają to doświadczenia Boratyńskiego i Ruziewicz (5), w których siarczanowa forma nawożenia potasem spowodowała zwiększenie procentowej zawartości i wzrost plonu skrobi. Siarka obniża też zawartość cukrów redukujących, tj. glukozy i fruktozy, co poprawia jakość bulw ziemniaczanych przeznaczonych na frytki i chipsy (9). Wysoka ich zawartość jest przyczyną ciemnienia wyrobów i gorzkiego smaku, co pogarsza jakość konsumpcyjną. Dlatego przyjmuje się, że bulwy przeznaczone na chipsy nie powinny zawierać ponad 0,15%, a do produkcji frytek ponad 0,25% cukrów redukujących.

Burak cukrowy

Zagadnienie wpływu siarki nawozowej na jakość korzeni buraka cukrowego jest przedmiotem nielicznych prac naukowych, chociaż wiadomo, że ze średnim plonem 40 t korzeni z hektara buraki pobierają około 20 kg siarki. Korzystne oddziaływanie siarki można uzasadnić wysokimi wymaganiami tej rośliny względem nawożenia mineralnego, szczególnie azotem. Dla prawidłowego metabolizmu azotu konieczna

jest także siarka (15). Wysokie i jednostronne nawożenie azotem wpływa bowiem niekorzystnie na zawartość cukru i sprzyja nagromadzeniu w korzeniach azotu α -aminowego (tzw. szkodliwego). Powoduje to zmniejszenie klarowności soku, a następnie zmniejszenie ekstrakcji cukru (39). Bell i in. (3) wykazali, że w warunkach uprawy hydroponicznej w roślinach buraka rosnących bez nawożenia siarczanami, koncentracja azotu α -aminowego wzrosła w ciągu 6 tygodni z $326 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ do $535 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ świeżej masy. Natomiast dodatek siarczanów do roztworu hydroponicznego obniżył końcową zawartość azotu szkodliwego (rys. 2). Polepszenie zaopatrzenia roślin w jony SO_4^{2-} , a zatem i stosunku N:S, może więc zmienić ostateczną koncentrację związków azotowych, a w przypadku nadmiernego nawożenia N może spowodować obniżenie zawartości azotu szkodliwego w korzeniach spichrzowych. Badania polowe prowadzone w Anglii wykazały, że krytyczny stosunek N:S warunkujący uzyskanie dużego plonu buraka cukrowego o dobrej jakości wynosi 11:1 (39). Zdarza się, że wzrastające nawożenie azotem powoduje wzrost plonu korzeni buraka cukrowego, ale obniża koncentrację cukru. Zdaniem Milforda i Watsona (23), w tych warunkach zwiększa się rozmiar komórek w korzeniach, a komórki większe zawierają mniej sacharozy w jednostce objętości niż mniejsze. W doświadczeniu Bella i in. (3) wzrastające zaopatrzenie w siarczany obniżyło koncentrację sacharozy w korzeniach buraka, ale ponieważ wzrósł plon korzeni, więc uzyskano ostatecznie większy plon cukru. Stwierdzono ponadto, że w warunkach deficytu siarki a nadmiaru azotu następuje zmiana szlaku biosyntezy argininy. Zdaniem badaczy zwiększona produkcja tego aminokwasu jest mechanizmem obronnym przeciwko toksyczności amoniaku. Przy niedoborze siarki obserwowano także wzrost produkcji seryny i alaniny w tkankach części nadziemnej i korzeni oraz redukcję poziomu proliny w części nadziemnej buraka. Jednakże



Rys. 2. Wpływ siarki na zawartość azotu α -aminowego w korzeniach buraka cukrowego w warunkach uprawy hydroponicznej
The effect of sulfur on α -amino N concentration in sugar beet roots at hydroponics (3)

w roślinach bardzo zasobnych w azot związkami limitującymi syntezę białek stają się aminokwasy siarkowe, ponieważ jest ich za mało w puli wolnych aminokwasów (24).

Rośliny motylkowate i trawy

U roślin motylkowatych siarka spełnia podwójną rolę, jest niezbędna do symbiotycznego wiązania azotu oraz do syntezy białek. Dlatego też zawartość azotu całkowitego i białka w tych roślinach zależy od zaopatrzenia roślin w siarkę. Także jakość białka jest ściśle zależna od dostępności S. Przy niedostatku siarki rośliny produkują białko mniej wartościowe, zawierające mniejszą ilość aminokwasów egzogennych. Metionina jest zwykle podstawowym aminokwasem limitującym jakość nasion strączkowych (13). Mają one także stosunkowo niską zawartość cysteiny, która jest uważana za niezbędny składnik diety człowieka i zwierząt. Chociaż białka zapasowe nasion strączkowych różnią się pod względem zawartości aminokwasów siarkowych, to jednak deficyt siarki obniża syntezę białek bogatych w siarkę (leguminy i albuminy) i zwiększa syntezę białek ubogich w ten składnik (wiciliny). Zmiany te mają swój początek już we wstępnym etapie biosyntezy, a dokładniej w procesie transkrypcji mRNA. Chandler i in. (7) stwierdzili bowiem, że wpływ deficytu S na syntezę poszczególnych białek nasion grochu jest ściśle związany ze zmianami w poziomach ich mRNA. Problem ten nie jest dotychczas rozpoznany. Wymienieni badacze rozpatrują m.in. hipotezę, że podczas procesów zachodzących po transkrypcji zmieniają działanie geny białek nasion, wrażliwe na niedobór siarki.

Badania Zhao i in. (45) wykazały, że proces wiązania N_2 przez groch jest wysoce wrażliwy na niedobór siarki. Brodawki korzeniowe roślin deficytowych w S były mniej liczne i mniejsze, choć ich masa nie różniła się od masy brodawek roślin optymalnie zaopatrzonych w siarkę. Wykazano także, że koncentracja siarki w korzeniach roślin nawożonych S była 2,6–4,4 razy większa niż w łodygach. Ponieważ pędy zwykle zawierają więcej białka niż korzenie, dane te świadczą o wysokim zapotrzebowaniu roślin motylkowych na siarkę w celu utrzymania właściwego funkcjonowania brodawek. Badacze dodają, że także enzymy nitrogenaza i ferredoksyna, odgrywające kluczową rolę w procesie wiązania N_2 , zawierają związki Fe-S. Ponadto rośliny grochu deficytowe w siarkę miały zmniejszoną zawartość chlorofilu, co, zdaniem autorów, wynikało z niedostatku azotu spowodowanego ograniczonym wiązaniem N_2 . Zwłaszcza że, jak wykazano w obiektach równoległych, dodatek siarki zwiększył koncentrację azotu w liściach i łodygach w fazie wczesnego kwitnienia i dojrzałości, a także wpłynął na wzrost zawartości chlorofilu. W efekcie tych zmian ilość azotu związanego przez rośliny nawożone siarką zwiększyła się ponad dwukrotnie. Korzystny wpływ siarki na tworzenie i aktywność brodawek korzeniowych wykazali również Zaroug i Munns (44) na przykładzie fasolnika czerwonego. Dodatek siarki zwiększył także zawartość cukrów w tych roślinach w wyniku szybszego wzrostu powierzchni liści i prawdopodobnie intensyfikacji fotosyntezy i metabolizmu azotu. Wydaje się więc,

że właściwe nawożenie siarką jest szczególnie ważne w przypadku roślin motylkowatych i traw, które są często koszone lub wypasane.

Siarka jest składnikiem pokarmowym niezbędnym nie tylko dla roślin, ale także dla ludzi i zwierząt. Jednakże zapotrzebowanie organizmów zwierzęcych pokrywają nie mineralne, a organiczne połączenia siarki. Są to przede wszystkim aminokwasy siarkowe (tzw. aminokwasy egzogenne) oraz witaminy zawierające siarkę, tj. witamina B₁ zwana tiaminą lub aneuryną i witamina H – biotyna. Związki te nie są syntetyzowane w organizmie zwierząt i muszą być dostarczone z paszą. Siarkę mineralną mogą wykorzystywać jedynie zwierzęta przeżuwające, dzięki bakteriom bytującym w żwaczu.

Jones i in. (17) stwierdzili poprawę jakości roślin pastewnych oraz wzrost ich plonu po zastosowaniu nawożenia siarką. Stosowanie tych roślin w żywieniu podniosło dzienne przyrosty jagniąt z 141 do 186 g w przypadku *Trifolium subterraneum* i z 32 do 84 g przy karmieniu życią wielokwiatową (*Lolium multiflorum* L.). W efekcie całego eksperymentu stwierdzono, że jagnięta karmione koniczyną nie nawożoną siarką potrzebowały średnio 11 kg paszy na 1 kg przyrostu, a w przypadku koniczyny z obiektów z nawożeniem siarką zapotrzebowanie zmalało do 9 kg paszy na 1 kg przyrostu. Przy żywieniu życią wielokwiatową wartości te wynosiły odpowiednio 48 i 18 kg. Zdaniem autorów, mniejsze przyrosty dzienne jagniąt żywionych życią wynikają z niewystarczającej zawartości białka w paszy, tylko 6,4–8,0%. Tymczasem koncentracja białka w roślinach koniczyny była wyższa i wynosiła 10,3–13,1%. Korzystny wpływ stosowanej siarki przejawiał się we wzroście zawartości tego składnika zarówno w koniczynie, jak i w życicy. Najwyższa koncentracja siarki (0,24 i 0,22%, odpowiednio dla koniczyny i życicy) stwierdzona w roślinach nawożonych najwyższą dawką S odpowiada zawartościom tego składnika uważanym za najkorzystniejsze z punktu widzenia strawności. Nawożenie siarką powodowało zawężenie stosunku N:S do wartości 8 i 6 dla koniczyny i życicy. W obiektach bez siarki wynosił on około 13. Niższe wartości stosunku N:S w paszy są korzystniejsze ze względów żywieniowych. Zdaniem Allaway i Thompsona (1) optymalny stosunek N:S w paszy dla zwierząt przeżuwających wynosi 10:1–15:1, czyli jest niższy niż przyjęty dla ich optymalnego wzrostu.

Kukurydza

Ogólnie przyjmuje się, że kukurydza ma średnie zapotrzebowanie na siarkę, ale wytwarza wysoki plon suchej masy, który wymaga intensywnego nawożenia mineralnego. Rendig i in. (34) stwierdzili, że dodatek siarki spowodował wzrost plonu suchej masy kukurydzy. W warunkach wyższej koncentracji siarki w pożywce obserwowano także wzrost zawartości cukrów redukujących i wyraźne zmniejszenie procentowej zawartości związków azotowych w roślinach. Natomiast kukurydza nawożona niską dawką siarki wykazywała znacznie niższą koncentrację cukrów rozpuszczalnych, a wysoką zawartość azotu amidowego. Posługując się metodą chromatograficzną stwierdzono,

że akumulowane w tych warunkach amidy to asparagina. Także kukurydza pastewna rosnąca w pożywcze deficytowej względem siarki wykazywała wyższy stosunek azotu amidowego do azotu białkowego zarówno w częściach nadziemnych, jak i w korzeniach. Wysoka koncentracja substancji azotowych niebiałkowych, wskazująca na zahamowanie syntezy białka spowodowane brakiem aminokwasów siarkowych, nie jest pożądana z punktu widzenia jakości paszy.

PODSUMOWANIE

Przedstawione w pracy wyniki wielu badań naukowych wskazują, że odpowiednie nawożenie siarką oddziałuje na:

1. Wzrost i rozwój roślin poprzez wpływ na:
 - tworzenie chlorofilu i białka,
 - aktywność enzymów roślinnych (reduktaza azotanowa i nitrogenza),
 - procesy fotosyntezy i oddychania,
 - wzrost odporności roślin na warunki stresowe środowiska,
2. Jakość wytwarzanych plonów poprzez wzrost:
 - wydajności i jakości oleju rzepakowego,
 - wartości technologicznej ziarna pszenicy i jęczmienia browarnego,
 - zawartości skrobi, karotenu i witaminy C w ziemniakach,
 - zawartości cukrów rozpuszczalnych w kukurydzy,
 - koncentracji cukru w korzeniach buraka,
 - wykorzystania paszy przez zwierzęta hodowlane,
3. Poprawę jakości płodów rolnych przez obniżenie:
 - koncentracji metali ciężkich w częściach nadziemnych roślin,
 - zawartości azotu amidowego w kukurydzy i azotu α -aminowego w burakach,
 - nasilenia infekcji grzybowych i inwazji szkodników,
 - zawartości cukrów redukujących w bulwach ziemniaka i intensywności ich ciemnienia enzymatycznego.

LITERATURA

1. Allaway W.H., Thompson J.F.: Sulfur in the nutrition of plants and animals. *Soil Sci.*, 1966, **101**: 240-247.
2. Aulakh M.S., Pasricha N.S., Sahota N.S.: Yield, nutrient concentration and quality of mustard crops as influenced by nitrogen and sulphur fertilizers. *J. Agric. Sci., Camb.*, 1980, **94**: 545-549.
3. Bell C., Jones J., Franklin J., Milford G., Leigh R.: Sulphate supply and its effects on sap quality during growth in sugar beet storage roots. *Z. Pflanzernähr. Bodenk.*, 1995, **158**: 93-95.
4. Biller E., Wierzbička A.: Ocena przydatności technologicznej mąki. Cz. I. Badanie przydatności technologicznej glutenu. W: *Wybrane procesy w technologii żywności*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 2003, 64-70.
5. Boratyński K., Ruziewicz J.: Działanie wieloskładnikowych nawozów kompleksowych typu Nitrofoska w świetle doświadczeń polowych. *Pam. Puł.*, 1974, **57**: 75-88.

6. Castle S. L., Randall 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.
7. Chandler P.M., Spencer D., Randall P., Higgins T.: Influence of sulfur nutrition on developmental patterns of some major pea seed proteins and their mRNAs. *Plant Physiol.*, 1984, **75**: 651-657.
8. Dietz K. J.: Leaf and chloroplast development in relation to nutrient availability. *J. Plant Physiol.*, 1989, **134**: 544-550.
9. El-Fayoumy M.E., El-Gamal A.M.: Effect of sulphur application rates on nutrients availability, uptake and potato quality and yield in calcareous soil. *Egypt. J. Soil Sci.*, 1998, **38 (1-4)**: 271-286.
10. Eppendorfer W.H., Eggum B.O.: Sulphur deficiency of potatoes as reflected in chemical composition and some measurements of nutritive value. *Norwegian J. Agric. Sci., Suppl.*, 1994, **15**: 127-134.
11. Eriksen J., Nielsen M, Mortensen J.V., Schjorring J.K.: Redistribution of sulphur during generative growth of barley plants with different sulphur and nitrogen status. *Plant Soil*, 2001, **230**: 239-246.
12. Ewart J.A.D.: Glutamin and dough tenacity. *J. Sci. Food Agric.*, 1978, **29**: 551-556.
13. Friedman M.: Nutritional value of proteins from different food sources: a review. *J. Agri. Food Chem.*, 1996, **44**: 6-29.
14. Friedrych J.W., Schrader L.E.: Sulphur deprivation and nitrogen metabolism in maize seedlings. *Plant Physiol.*, 1978, **61**: 900-903.
15. Janzen H.H., Bettany J.R.: Sulfur nutrition of rapeseed: I. Influence of fertilizer nitrogen and sulfur rates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1984, **48**: 100-107.
16. Jędryczka M., Podleśna A., Lewartowska E.: Wpływ nawożenia azotem i siarką na zdrowotność roślin rzepaku ozimego. *Pam. Puł.*, 2002, **130/I**: 329-337.
17. Jones M.B., Rendig V.V., Torell D.T., Inouye T.S.: Forage quality for sheep and chemical composition associated with sulfur fertilization on a sulfur deficient site. *Agron. J.*, 1982, **74**: 775-780.
18. Khurana N., Chiralekha Ch.: Low sulfur alters boron metabolism of mustard. *J. Plant Nutrition*, 2002, **25 (3)**: 679-687.
19. Klikocka H., Haneklaus S., Bloem E., Schnug E.: Ocena potrzeb nawożenia ziemniaka siarką. *Nawozy i Nawożenie*, 2003, **4 (17)**: 143-150.
20. Krauze A., Bowszys T.: Wpływ terminu nawożenia siarką rzepaku jarego Star na plon nasion oraz zawartość siarki i tłuszczu. *Rośl. Oleiste*, 2001, **XXII (1)**: 285-290.
21. Levitt J., Sullivan Ch.Y., Johansson N-O., Pettit R.M.: Sulfhydryls - a new factor in frost resistance. I. Changes in SH content during frost hardening. *Plant Physiol.*, 1961, **36**: 611-616.
22. Losak T., Richter R.: The influence of nitrogen and sulphur on the yield and oils content of winter rape. *Nawozy i Nawożenie*, 2003, **4(17)**: 160-168.
23. Milford G.J.F., Watson D.J.: The effect of nitrogen on the growth and sugar content of sugar beet. *Ann. Bot.*, 1973, **35**: 287-300.
24. Millard P., Sharp G.S., Scott N.M.: The effect of sulphur deficiency on uptake and incorporation of nitrogen in ryegrass. *J. Agric. Sci., Camb.*, 1985, **105**: 501-504.
25. Mondy N.I., Pannampalam R.: Potato quality as affected by source of magnesium fertilizer: nitrogen, minerals and ascorbic acid. *J. Food Sci.*, 1986, **51**: 352-354.
26. Mortensen J., Eriksen J.: Effect of sulphur deficiency on amino acid composition. *Norw. J. Agric. Sci.*, 1994, **15**: 135-142.
27. Moss H.J., Randall P.J., Wrigley C.W.: Alterations to grain, flour and dough quality in three wheat types with variation in soil sulfur supply. *J. Cereal Sci.*, 1983, **1**: 255-264.
28. Pałosz T.: Siarka a problemy fitosanitarne w uprawie rzepaku ozimego. *Ochr. Rośl.*, 1995, **12**: 5-6.
29. Podleśna A.: Air pollution by sulfur dioxide in Poland – impact on agriculture. *Phyton, Ann. Rei Botanicae*, 2002, **42 (3)**: 157-164.
30. Podleśna A.: Reakcja rzepaku ozimego na zróżnicowane nawożenie siarką. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 2002, **481**: 335-339.

31. Podleśna A., Cacak-Pietrzak G., Sowiński M.: Reakcja pszenicy ozimej na nawożenie siarką w doświadczeniu polowym. *Nawozy i Nawożenie*, 2003, **4(17)**: 169-179.
32. Polska Norma (1997): Słód browarniany. PN – A – 79082.
33. Potarzycki J.: Rola siarki z superfosfatu prostego w nawożeniu jęczmienia jarego. I. Plon i jakość ziarna. *Nawozy i Nawożenie*, 2003, **4(17)**: 180-192.
34. Rendig V.V., Oputa C., McComb E.A.: Effects of sulfur deficiency on non-protein nitrogen, soluble sugars, and N/S ratios in young corn (*Zea mays* L.) plants. *Plant Soil*, 1976, **44**: 423-437.
35. Rotkiewicz D., Ojczyk T., Konopka I.: Nawożenie siarką a wartość użytkowa i technologiczna nasion rzepaku ozimego. *Rośl. Oleiste*, 1996, **XVII**: 257-264.
36. Sadowski C., Baturo A., Lenc L., Trzciniński J.: Występowanie mączniaka rzekomego (*Peronospora parasitica* Pers. Ex Fr./Fr.) i mączniaka prawdziwego (*Erysiphe cruciferarum* Opiz ex L. Junell) na rzepaku jarym odmiany Star przy zróżnicowanym nawożeniu azotem i siarką. *Rośl. Oleiste*, 2002, **XXIII**: 391-408.
37. Schnug E., Ceynowa J.: Phytopathological aspects of glucosinolates in oilseed rape. *J. Agron. Crop Sci.*, 1990, **165**: 319-328.
38. Smulikowska S., Nguyen C.V.: Przydatność paszowa nasion i wyłoków rzepakowych w żywieniu drobiu u świń i ich wpływ na jakość produktów zwierzęcych. *Rośl. Oleiste*, 2003, **XXIV**: 11-22.
39. Thomas S., Bilsborrow P., Hocking T., Bennett J.: Sulfur deficiency in sugar beet (*Beta vulgaris*). *Laudbauforschung Völkenrode Sonderheft*, 2000, **218**: 97-100.
40. Tukendorf A.: Białka i peptydy wiążące metale ciężkie. *Post. Biochem.*, 1989, **35**: 141-153.
41. Uziak Z., Szymańska M., Trojanowska-Solecka A.: Wpływ zróżnicowanego żywienia azotowo-siarkowego na produktywność i wartość biologiczną wybranych roślin pastewnych. *Ann. UMCS, Sectio E*, 1982, **XXXVII**, **12**: 125-134.
42. Waligórska D., Krzymańska J.: Aktywność biologiczna glukozynolanów wyizolowanych z liści rzepaku. *Post. Nauk Rol.*, 1993, **5**: 151-156.
43. Wielebski F., Wójtowicz M.: Wpływ wiosennego nawożenia siarką na plon i zawartość glukozynolanów w nasionach odmian mieszańcowych rzepaku ozimego. *Rośl. Oleiste*, 2003, **XXIV**: 108-119.
44. Zaroug M.G., Munns D.N.: Nodulation, nitrogen fixation, leaf area and sugar content in *Lablab purpureus* as affected by sulfur nutrition. *Plant Soil*, 1979, **53**: 319-328.
45. Zhao F.J., Wood A.P., Mc Grath S.P.: Effects of sulphur on growth and nitrogen fixation of pea (*Pisum sativum* L.). *Plant Soil*, 1999, **212**: 209-219.

SULFUR FERTILIZATION AS A FACTOR AFFECTING CROP METABOLISM AND QUALITY OF AGRICULTURAL PRODUCTS

Summary

Fertilization is one of the most important factors of plant cultivation. Competent and balanced using of nutritive elements is conducive to a decreased environment pollution and makes possible to obtain higher and better plant yields. The increasing deficit of sulfur caused by considerable reduction of gaseous air pollution is quite a new problem in the European countries. This situation can lead to a decrease of yield level of many crops and bring about a deterioration of their usability and technological quality. A proper supply of sulfur to the plant at plays an important role in the metabolism so that particular species retain their own quality features. This element is necessary for protein biosynthesis, to chlorophyll formation and normal course of photosynthesis. We know that sulfur can influence flavor, aroma and the appearance of agricultural products as well as their nutritive and technological value. Excess of sulfur nutrition can lead to an increase in glucosinolate content of oilseed rape but as appears from

literature and the author's own research, shortage of sulfur decreases pasture value of legume seeds and grasses. This is connected with inhibition of sulfur amino acid synthesis at these plants. The presence of sulfur beneficially affects yield and quality of rapeseed oil, storage protein accumulation in cereals and increases quality of barley and technological value of wheat grain. Proper sulfur fertilization protects against harmful nitrogen compounds in roots of sugar beet and increases concentration of carotene, starch and vitamin C in the potatoes bulbs. Furthermore, fertilization with this element raises the natural plant resistance against stresses caused by drought, frost, diseases and pests.

Praca wpłynęła do Redakcji 30 VI 2004 r.