

Anna Podleśna

STUDIA NAD ROLĄ SIARKI
W KSZTAŁTOWANIU GOSPODARKI
MINERALNEJ ORAZ WIELKOŚCI
I JAKOŚCI PLONU WYBRANYCH
ROŚLIN UPRAWNYCH

Rozprawa habilitacyjna

MONOGRAFIE
I ROZPRAWY
NAUKOWE

37

INSTYTUT UPRAWY NAWOŻENIA I GLEBOZNAWSTWA
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY
INSTITUTE OF SOIL SCIENCE AND PLANT CULTIVATION
STATE RESEARCH INSTITUTE

Dyrektor: *prof. dr hab. Wiesław Oleszek*

Redaktor: *prof. dr hab. Janusz Podleśny*

Recenzent: *prof. dr hab. Tadeusz Filipek*

Opracowanie redakcyjne i techniczne: *mgr Katarzyna Mikulska*

ISBN 978-83-7562-133-4

Nakład 150 egz., B-5, zam. 35/E/13
Dział Upowszechniania i Wydawnictw IUNG-PIB w Puławach
tel. (81) 8863421 w. 301 i 307; fax (81) 8863421 w. 302
e-mail: duw@pulawy.pl; <http://www.iung.pulawy.pl>

Anna Podleśna

STUDIA NAD ROLĄ SIARKI W KSZTAŁTOWANIU GOSPODARKI
MINERALNEJ ORAZ WIELKOŚCI I JAKOŚCI PLONU WYBRANYCH
ROŚLIN UPRAWNYCH

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP	7
2. PRZEGLĄD LITERATURY	8
2.1. ANTROPOGENICZNE ZASIARCZENIE GLEB W PRZESZŁOŚCI I STAN OBECNY.....	8
2.2. CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA ZAWARTOŚĆ SIARKI W GLEBACH UŻYTKÓW ROLNYCH W POLSCE.....	10
2.3. POBIERANIE SIARKI ZE ŚRODOWISKA I JEJ ROLA W METABOLIZMIE ROŚLIN.....	12
2.4. ZAPOTRZEBOWANIE ROŚLIN UPRAWNYCH NA SIARKĘ.....	18
2.5. ROLA SIARKI W TWORZENIU PLONU ROŚLIN UPRAWNYCH I JEGO JAKOŚCI.....	19
2.6. WSPÓLDZIAŁANIE SIARKI Z AZOTEM.....	23
3. MATERIAŁ I METODY	26
3.1. WPŁYW DOSTĘPNOŚCI SIARKI NA ZAWARTOŚĆ I POBRANIE SKŁADNIKÓW POKARMOWYCH PRZEZ RZEPAK I PSZENICĘ.....	26
3.2. PLONOWANIE RZEPAKU I PSZENICY W ZALEŻNOŚCI OD NAWOŻENIA SIARKĄ	27
3.3. ROLA SIARKI W KSZTAŁTOWANIU CECH JAKOŚCIOWYCH NASION RZEPAKU I ZIARNA PSZENICY	28
3.4. WPŁYW NAWOŻENIA SIARKĄ NA ZDROWOTNOŚĆ RZEPAKU OZIMEGO	28
4. WYNIKI BADAŃ.....	29
4.1. GOSPODARKA MINERALNA ROŚLIN.....	29
4.1.1. Zawartość składników pokarmowych.....	29
4.1.2. Pobranie składników pokarmowych	31
4.2. WZROST, ROZWÓJ I PLONOWANIE ROŚLIN	32
4.3. PARAMETRY JAKOŚCIOWE NASION RZEPAKU I ZIARNA PSZENICY	35
4.4. ZDROWOTNOŚĆ ROŚLIN RZEPAKU OZIMEGO.....	37
5. DYSKUSJA.....	39
5.1. WZROST I ROZWÓJ ROŚLIN W ZALEŻNOŚCI OD ZAOPATRZENIA W SIARKĘ.....	39
5.2. WPŁYW NAWOŻENIA SIARKĄ NA GOSPODARKĘ MINERALNĄ ROŚLIN UPRAWNYCH	43

5.3. ROLA SIARKI W KSZTAŁTOWANIU CECH JAKOŚCIOWYCH ZIARNA PSZENICY	46
5.4. JAKOŚĆ NASION RZEPAKU W ZALEŻNOŚCI OD NAWOŻENIA SIARKĄ	49
5.5. ZDROWOTNOŚĆ RZEPAKU OZIMEGO W ZALEŻNOŚCI OD NAWOŻENIA SIARKĄ	51
6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	54
7. LITERATURA	56
STRESZCZENIE/SUMMARY	67
ANEKS – wykaz prac własnych wchodzących w skład rozprawy habilitacyjnej ..	69

„Sulphur is essential to all life, including all animals, plants and microorganisms”

(McGrath et al. 2002)

1. WSTĘP

Propagowany w ostatnich latach integrowany system produkcji zakłada dostarczanie roślinom uprawnym wszystkich niezbędnych makro- i mikroelementów (Cakmak 2002, White i Brown 2010), a także utrzymanie w glebie zrównoważonego bilansu składników pokarmowych, aby żaden z nich nie występował w ilości deficytowej lub w nadmiarze. Zgodnie z założeniami tego systemu odpowiednia zasobność gleby w składniki pokarmowe stwarza warunki do utrzymania wysokiej aktywności biologicznej i optymalnych właściwości fizycznych gleby, a wymywanie składników zostaje wydatnie zmniejszone. Natomiast rośliny rosnące na tej glebie są w sposób zbilansowany zaopatrzone w składniki pokarmowe i wykazują cechy jakościowe odpowiednie do żywienia ludzi i zwierząt (Wang i in. 2008).

Od końca XX w. w glebach wielu krajów świata, w tym też w niektórych rejonach Polski, pojawia się problem narastającego deficytu siarki, której obecność jest bezwzględnie potrzebna do realizacji pełnego cyklu życiowego roślin. Uważa się wręcz, że deficyt siarki jest najbardziej znaczącym stresem pokarmowym dla roślin, jaki obecnie występuje w uprawach wielu rejonów świata (Grzebisz i Fotyma 1996, Zhao i in. 1996, Filipek 1998, Motowicka-Terelak i Terelak 1998, Podleśna 2002a, Wielebski 2006, Szulc 2008, Kaczor i Zuzańska 2009, Hussain i in. 2011). W tej sytuacji podejmowane są prace w celu poznania zasobności gleb w ten składnik oraz znalezienia sposobu efektywnego uzupełniania jego niedoboru poprzez stosowanie odpowiednich nawozów (McGrath i in. 2002, Cichy i Paszek 2003, Kulczycki 2003, Toboła i Jakubus 2003, Trawczyński 2003). Prowadzi się również poszukiwania metod oznaczania zawartości siarki w glebach i roślinach oraz podejmuje próby ustalenia jej krytycznych zawartości, które pozwolą na rozpoznanie deficytu oraz skuteczną interwencję w celu osiągnięcia plonu o pożądanej jakości (Kalembasa 2004, Szulc i in. 2004b). Przedmiotem licznych badań jest także rola siarki w kształtowaniu wielkości i jakości plonu roślin uprawnych. Działania te, w powiązaniu z zapotrzebowaniem rośliny, oczekiwanym plonem oraz warunkami środowiska, mają być pomocne przy ustalaniu aktualnych zaleceń nawozowych, które powinny w sposób właściwy zabezpieczać roślinę w ten składnik i zapewniać jego efektywne wykorzystanie bez negatywnych oddziaływań zarówno na glebę, jak i wody glebowe.

Celem prowadzonych badań było:

- rozpoznanie wpływu siarki na zawartość głównych składników pokarmowych w roślinach uprawnych oraz ich pobranie w warunkach stosowania nawożenia tym składnikiem (+S) i braku nawożenia (–S),
- wykazanie niezbędności siarki do wzrostu i plonowania rzepaku, który ma najwyższe spośród roślin uprawnych wymagania wobec siarki, oraz pszenicy, która należy do grupy roślin o małym zapotrzebowaniu na ten składnik,
- określenie wpływu siarki na jakość technologiczną nasion rzepaku i ziarna pszenicy,

- rozpoznanie działania siarki na kształtowanie się odporności rzepaku względem chorób grzybowych.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

2.1. ANTROPOGENICZNE ZASIARCZENIE GLEB W PRZESZŁOŚCI I STAN OBECNY

Do lat 90. XX w. siarka była uważana w Europie za składnik występujący w środowisku w nadmiarze, a najważniejszym jej źródłem dla roślin były emisje jej gazowych związków do atmosfery i następnie jej depozycja w glebie (Motowicka-Terelak i Terelak 1998, Kaczor i Zuzanska 2009). Z tego względu siarka nie była rozpatrywana w kategoriach niezbędnego składnika pokarmowego dla roślin i w związku z tym nie była uwzględniana przy ustalaniu potrzeb nawozowych roślin uprawnych. Znaczne ilości tego pierwiastka trafiały do atmosfery ze źródeł naturalnych i antropogennych, najczęściej w postaci tlenków siarki, aerozoli kwasu siarkowego i siarczanów, siarkowodoru, a także szeregu lotnych związków. W zespole różnych zanieczyszczeń powietrza pierwsze miejsce pod względem ilości, zasięgu oddziaływania oraz szkodliwości bezpośredniej i pośredniej zajmuje dwutlenek siarki – SO_2 (Motowicka-Terelak i Terelak 1998). Znaczny wzrost antropogenicznej emisji związków tego pierwiastka nastąpił w wyniku rozwoju przemysłu. Ilość SO_2 dostająca się do atmosfery zaczęła systematycznie rosnąć od roku 1850, ale najwyższe tempo zmian stwierdzono w latach 1940–1970. Ponad dziesięciokrotny wzrost emisji tlenu siarki notowano w okresie powojennym.

W Polsce emisja związków siarki do atmosfery zaczęła dynamicznie wzrastać z końcem lat 60. XX w. (Kiepuł 1999, Podleśna 2002a). Największym źródłem antropogenicznego zasiarczenia gleb było powietrze zanieczyszczone związkami siarki pochodzącymi z procesów energetycznych (ponad 70% całej emisji), technologicznych oraz wszelkiego spalania paliw płynnych i gazowych (Sobolewski 1992, Motowicka-Terelak i Terelak 1998). Najwięcej tlenków siarki emitowała energetyka zawodowa, przemysłowa, sektor komunalno-bytowy oraz źródła mobilne (Motowicka-Terelak i Terelak 1998, Podleśna 2002a). Rosnące potrzeby energetyczne kraju przy używaniu do tego celu najgorszych gatunków węgla zawierających niekiedy do 7% S, a także intensywny rozwój przemysłu wydobywczego, chemicznego oraz eksploatacja bogatych złóż siarki rodzimej i jej przetwórstwo były przyczyną systematycznego wzrostu emisji SO_2 w tym czasie.

Dwutlenek siarki, podobnie jak inne związki tego pierwiastka (H_2S , CS_2) emitowane do atmosfery, są utleniane do kwasu siarkowego. Proces ten polega na tym, że związek siarkowy w kontakcie z mgłą, parą wodną lub uwodnionymi cząstkami pyłów tworzy kwas siarkawy (IV) – H_2SO_3 , który następnie po dysocjacji pod wpływem katalizatorów (mogą to być związki: Fe, Al, Mn i Cu) oraz energii świetlnej utlenia się do kwasu siarkowego (VI) – H_2SO_4 . Jeśli w powietrzu nie ma dostatecz-

nej ilości pary wodnej, SO_2 utrzymuje się w nim od kilku do 30 dni i może być w tym czasie przenoszony na znaczne odległości od źródeł emisji. Związki siarki są usuwane z zanieczyszczonego powietrza przez dyfuzję do podłoża, suchy opad siarczanów oraz wymywanie z opadami atmosferycznymi. Wówczas ich głównym odbiorcą są gleby i rośliny (Motowicka-Terelak i Terelak 1998). Zdaniem Motowickiej-Terelak i Terelaka (1998), zanieczyszczenie gleb emitowanymi do atmosfery związkami siarki odbywa się bezpośrednio, tj. przez ich sorpcję oraz pośrednio poprzez przenoszenie zanieczyszczeń siarkowych z pokrywy roślinnej przez wiatr i opady. Natomiast negatywne skutki antropogenicznego zasiarczenia gleb nie polegają na gromadzeniu się siarki w glebach, lecz na nadmiernym występowaniu tego składnika w formie siarczanowej. Na skutek tego zjawiska następuje degradacja gleb przez zakwaszenie oraz wzrasta pobranie przez rośliny nie tylko siarki, lecz i innych pierwiastków toksycznych, tj. Cd, Pb, Zn i Al, co może pogarszać jakość płodów rolnych (Motowicka-Terelak i Terelak 1998).

Największą emisję SO_2 w Polsce stwierdzono pomiędzy rokiem 1975 a 1985, natomiast rekordowa ilość dwutlenku siarki, przekraczająca 4 mln Mg została wydzielona do środowiska w roku 1980 (Kaczor i Zuzańska 2009). Na 1 hektar gruntów dostało się wówczas 132 kg SO_2 . Po tym czasie nastąpiła wyraźna redukcja emisji związków siarki do atmosfery. W porównaniu z rokiem 1980 emisja i opad tlenu siarki IV (SO_2) w Polsce w 1994 r. uległy wyraźnej redukcji (Filipek 1998). Średnia emisja SO_2 w Polsce w tym roku zmniejszyła się o około 36% w stosunku do wartości odnotowanych w roku 1980. Głównymi powodami zmniejszenia zanieczyszczania środowiska dwutlenkiem siarki w Polsce były: recesja gospodarcza, zmniejszenie zużycia energii oraz uruchomienie procesu odsiarczania spalin. Dużą rolę odegrała również nowa polityka ekologiczna w kraju (Filipek 1998 i 2005), która wynikała z rozpoczęcia współpracy międzynarodowej w zakresie działań nad zmniejszeniem emisji SO_2 oraz zapobieganiem jego rozprzestrzenianiu się poza granice państw i regionów (Sobolewski 1992, Jaworski 2001b). W 1979 r. w Genewie rozpoczęto prace nad konwencją o transgranicznym przenoszeniu zanieczyszczeń, w efekcie których w 1985 r. 21 krajów podpisało Protokół Heliński tej konwencji (tzw. Pierwszy Protokół Siarkowy). W myśl tego porozumienia państwa-sygnariusze dobrowolnie zobowiązały się do roku 1998 ograniczyć emisję SO_2 o 30% w stosunku do emisji z roku 1980. Wprawdzie Polska nie podpisała Protokołu Helińskiego, ale ograniczenie zanieczyszczenia atmosfery przyjęła jako jeden z priorytetów polityki ekologicznej państwa. W roku 1994 w Oslo Polska podpisała protokół w sprawie dalszego ograniczania emisji siarki (tzw. Drugi Protokół Siarkowy). Protokół zobowiązuje Polskę do obniżenia emisji SO_2 , która według limitu na rok 2010 miała wynosić 1397 tys. $\text{Mg} \cdot \text{rok}^{-1}$. Założono w ten sposób, że zmniejszenie emisji w stosunku do roku 1980 wyniesie 66% (Jaworski 2001b).

Od stycznia 2008 r. państwa członkowskie UE obowiązuje dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady nr 2001/80/WE z dnia 23 października 2001 r. w sprawie ograniczenia emisji niektórych zanieczyszczeń do powietrza z dużych obiektów energetycznego spalania paliw (Jaworski 2001a). Zawiera ona regulacje dla

źródeł spalania paliw, których nominalna moc cieplna jest równa lub większa od 50 MW. W traktacie o przystąpieniu zostały określone dla Polski limity emisji SO_2 dla źródeł objętych ww. dyrektywą. Jednocześnie negocjacje akcesyjne prowadzone z Komisją Europejską w sprawie ograniczenia emisji zanieczyszczeń do powietrza z dużych źródeł spalania paliw, w tym emisji SO_2 , związane z wdrożeniem dyrektywy 2001/80/WE, narzuciły na przemysł w Polsce konieczność założenia instalacji, których celem jest redukcja emisji tych gazów do atmosfery. Znaczy to, że w kolejnych latach nastąpi dalsze ograniczenie ilości gazowych związków siarki oraz ich oddziaływania na gleby i rośliny.

2.2. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA ZAWARTOŚĆ SIARKI W GLEBACH UŻYTKÓW ROLNYCH W POLSCE

Znaczne zmniejszenie dopływu siarki z powietrza, trwające wiele lat, przy jednoczesnym ograniczeniu stosowania nawozów mineralnych zawierających ten pierwiastek doprowadziło do wyraźnego pogorszenia zaopatrzenia gleby i roślin w ten składnik. W rezultacie pod koniec lat 90. XX w. pojawiły się sygnały o niedoborach siarki w glebach wielu krajów, w tym także Polski (Grzebisz i Fotyma 1996, Zhao i in. 1996, Wielebski i in. 2000, Kaczor i Zuzańska 2009). Jak wynika z danych literaturowych, problem niedoboru siarki w produkcji roślinnej został odnotowany w 73 krajach świata, w tym w 18 państwach Europy (Kaczor i Kozłowska 2000). W związku z tym deficyt siarki jest obecnie uważany za główny czynnik żywieniowy limitujący produkcję roślinną. Rola siarki we wzroście i rozwoju roślin jest niekwestionowana, zwłaszcza że składnik ten nie może być w swoich funkcjach zastąpiony przez żaden inny pierwiastek.

Rozległe badania prowadzone w Polsce wykazały, że mimo długotrwałego wpływu zanieczyszczeń atmosferycznych w połowie lat 90. około 75% gleb znajdowało się w klasie zawartości naturalnej, czyli wykazywało niską zawartość siarki siarczanowej (Motowicka-Terelak i Terelak 1998). Natomiast zakończone niedawno badania prowadzone w ramach „Monitoringu chemizmu gleb ornych Polski” wykazały, że średnia zawartość siarki siarczanowej oraz jej wartość środkowa zmniejszyły się nieco w ostatnim okresie badań profili glebowych (Siebielec i in. 2012). Obecnie w 90% badanych próbek zawartość siarki przyswajalnej nie przekracza $1,65 \text{ mg S} \cdot \text{kg}^{-1}$ gleby. W roku 2010 aż 94% zbioru profili glebowych zostało zakwalifikowanych do niskiej zawartości siarki siarczanowej, co wiąże się z możliwością wystąpienia w tych glebach niedoboru siarki. Należy zaznaczyć, że udział profili o niskiej zasobności w siarkę zwiększył się wyraźnie w stosunku do poprzednich okresów badawczych. Zdaniem Sibiela i in. (2012), może to skutkować deficytami siarki dla wrażliwych gatunków roślin uprawnych. Przedstawiona sytuacja może mieć związek z wynikami uzyskanymi przez Instytut Badań Leśnictwa, w których wykazano, że w ciągu 4 lat (2000–2003) opad siarki w punktach pomiarowych zmniejszył się o ponad połowę (Szulc 2008). W dalszym ciągu największy opad siarki notowany jest na Śląsku, a najmniejszy w województwach wschodnich. Z badań tych wynika,

że suma opadu mokrego i suchego, średnio dla Polski, zawierała się w przedziale 2,0–12,7 kg S·ha⁻¹.

Oceny stanu zawartości siarki w glebach oraz zaopatrzenia roślin w ten składnik dokonuje się, uwzględniając trzy formy występowania tego pierwiastka: siarkę ogólną, organiczną i siarczanową (Motowicka-Terelak i Terelak 1998). Jednakże ze względu na rozpuszczalność bezpośrednim źródłem siarki dla roślin wyższych są siarczany i z tego powodu mają największe znaczenie w rolnictwie. Siarczany obecne w glebie są produktami tlenowych przemian siarki uwalnianej w procesach wietrzenia skał i mineralizacji materii organicznej, a także stanowią tę część, która dopływa wraz z nawozami, opadami atmosferycznymi oraz suchą i mokrą depozycją SO₂ (Motowicka-Terelak i Terelak 1998). Mogą się one akumulować w podglebiu w wyniku ich wymywania z warstwy ornej, a także w wodzie gruntowej, przez co mają znaczny udział w zaopatrzeniu roślin w siarkę dostępną (McGrath i in. 2003, Igras 2004, Klikocka 2005c). Łatwość wymywania siarczanów z gleb w głąb profilu glebowego lub do zbiorników wodnych powoduje często ich straty dla roślin uprawnych.

Zawartość w glebie siarki ogółem, siarki siarczanowej i siarki organicznej jest modyfikowana przez sposób uprawy gleby, głównie poprzez wpływ na zmianę zawartości materii organicznej (Szulc i in. 2004a). Ograniczenie uprawy działa korzystnie na stan zasobności gleby w siarkę, bowiem powoduje wzrost zawartości substancji organicznej i jednocześnie przyrost ilości wszystkich form siarki. Zdaniem tych autorów, największa zawartość siarki ogółem występuje w warunkach siewu bezpośredniego, a najmniejsza w obiektach z orką wykonywaną każdego roku na głębokość 15 cm.

W warunkach glebowo-klimatycznych Polski podstawowym czynnikiem decydującym o zasobności gleb w siarkę jest zawartość w nich materii organicznej (Motowicka-Terelak i Terelak 1998). Fageria (2012) uważa, że ilość i forma siarki obecnej w glebach są związane z jakością materii organicznej, ponieważ większość S w glebach występuje w formie organicznej. Ponadto istnieje zależność liniowa pomiędzy zawartością glebowej materii organicznej a zawartością siarki całkowitej w powierzchniowej warstwie gleb. Jednakże większość polskich gleb to utwory lekkie i średnie (> 60% użytków rolnych), zawierające około 20 g·kg⁻¹ próchnicy, przez co nie są one zasobne w siarkę. Zdaniem Motowickiej-Terelak i Terelaka (1998) gleby piaskowe, jako utwory gruboziarniste, są z natury uboższe w składniki pokarmowe, również w siarkę, niż gleby wytworzone z glin, pyłów i ilów.

Następnym czynnikiem agrotechnicznym wpływającym na zawartość siarki w glebie jest wapnowanie (Szulc i in. 2004a). Według Szulca i in. (2004b) wapnowanie zwiększa zawartość siarki ogółem, zmniejszając jednocześnie zawartość S-SO₄ w glebie. Natomiast obniżenie pH gleby prowadzi do wzrostu sorpcji jonów siarczanowych przez cząstki fazy stałej gleby i ograniczenia dostępności siarki dla roślin.

W warunkach Polski występują dodatkowe czynniki, które obecnie uważa się za sprzyjające powstawaniu deficytu siarki w glebie (Grzebisz i Gaj 2000). Zalicza się do nich:

- duży udział gleb lekkich, które zawierają niewielkie ilości próchnicy i sprzyjają wymywaniu jonów siarczanowych w głąb profilu glebowego,
- występowanie intensywnych opadów jesienno-zimowych,
- mały udział obornika w nawożeniu,
- brak stosowania mineralnych nawozów siarkowych lub zmiana asortymentu nawozów,
- zmiana składu pestycydów,
- znaczny udział w strukturze zasiewu roślin o dużym zapotrzebowaniu na siarkę (rzepak i inne rośliny z rodziny krzyżowych),
- oddalenie upraw od ośrodków przemysłowych i miejskich.

Zdaniem wielu naukowców, gleby, w których siarka stanowi pierwiastek deficytowy są glebami potencjalnie wadliwymi, ponieważ charakteryzują się małą zawartością materii organicznej i podatnością na wymywanie składników pokarmowych (Kaczor i Zuzańska 2009). Powoduje to nieefektywne wykorzystanie zastosowanych nawozów i redukcję potencjału plonotwórczego uprawianych roślin. W związku z tym siarka powinna być dostarczana do gleby w postaci nawozów naturalnych i mineralnych w celu podniesienia poziomu ich zaopatrzenia w ten składnik oraz zapewnienia warunków do właściwego wzrostu i rozwoju roślin.

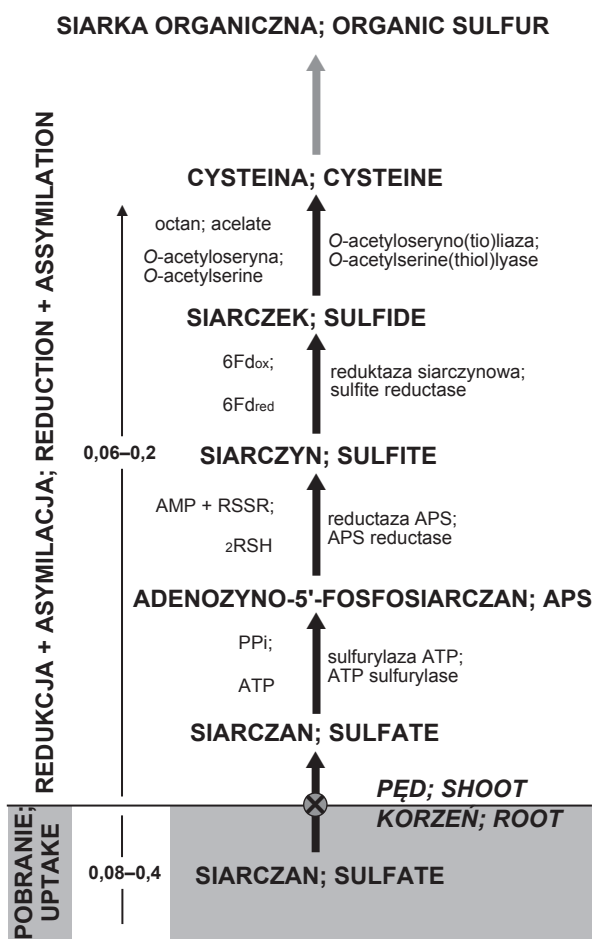
Zmniejszenie dopływu siarki z atmosfery powoduje stałe obniżanie się zawartości siarki siarczanowej w glebach Polski, co wpływa na występowanie ujemnego bilansu tego składnika dla roślin uprawnych na terenie kraju (Szulc 2008). Spośród roślin objętych badaniami największy ujemny bilans siarki stwierdzono dla rzepaku ozimego oraz koniczyny czerwonej. Natomiast w odniesieniu do roślin zbożowych, średnio dla terenu Polski, największy ujemny bilans siarki stwierdzono dla kukurydzy. Bilans siarki wyliczony dla wybranych grup roślin uprawnych jednoznacznie wskazuje, że w Polsce występują obszary niedoborowe pod względem zaopatrzenia roślin w ten pierwiastek. W badaniach Boreczek (2000) bilans siarki w obiektach bez nawożenia tym składnikiem był ujemny, a jego wartość wzrastała wraz ze zwiększaniem dawek nawozów azotowych.

2.3. POBIERANIE SIARKI ZE ŚRODOWISKA I JEJ ROLA W METABOLIZMIE ROŚLIN

Siarka jest wszechobecnym i jednocześnie niezbędnym składnikiem wszystkich żyjących organizmów. W roślinach występuje w dwóch aminokwasach (tj. cysteinie i metioninie, które są niezbędnymi składnikami białek), połączeniach żelazowo-siarkowych, polisacharydach i lipidach oraz w różnorodnych cząsteczkach, takich jak: witaminy (biotyna i tiamina), kofaktory (np. CoA), peptydy (glutation i fitochelaty) i metabolity wtórne (np. glukozynolany). Cząsteczki te są włączone w szereg

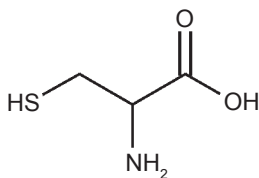
niezbędnych procesów biochemicznych i fizjologicznych, do których należą także: regulacja aktywności enzymów, cykle redoks, detoksyfikacja ksenobiotyków i metali ciężkich. Związki zawierające siarkę spełniają ważną rolę w roślinach, nie tylko w aspekcie wzrostu i plonowania, ale także w procesach ich adaptacji do niekorzystnych warunków środowiska (Leustek i Saito 1999, Droux 2004, Nocito i in. 2007).

Gazowy dwutlenek siarki (SO_2) jest łatwo absorbowany i asymilowany przez liście, ale jego rola jako źródła siarki ma znaczenie tylko na terenach przemysłowych, gdzie stanowi składnik zanieczyszczeń powietrza. Natomiast głównym źródłem siarki dla roślin jest obecna w glebie forma anionowego siarczanu (SO_4^{2-}) (Leustek i Saito 1999). Jest ona aktywnie transportowana do korzeni, a następnie dystrybuowana w roślinie. SO_4^{2-} jest głównym anionowym składnikiem wakuoli w komórce roślinnej. Przed włączeniem w szkielet organiczny siarczan musi przejść reakcje, które składają się na szlak asymilacyjny (rys. 1).



Rys.1. Schemat redukcji i asymilacji siarczanów w roślinie (De Kok i in. 2005, zmodyfikowane)
An overview of sulfate reduction and assimilation in plants (De Kok et al. 2005, modified)

Asymilację siarczanów można bardzo skrótowo podzielić na 4 główne etapy: 1) pobranie siarczanu, 2) aktywacja siarczanu, 3) redukcja siarczanu, 4) synteza cysteiny (rys. 2). Zdaniem Leustek i Saito (1999), redukcja SO_4^{2-} z S^{6+} do S^{2-} jest procesem wymagającym energii, ponieważ do jej całkowitego przebiegu potrzeba 732 kJ mol^{-1} . Natomiast redukcja i asymilacja SO_4^{2-} w cysteinę jest regulowana w roślinach przez szereg mechanizmów, do których należą: dostępność substratu, zmiana aktywności enzymu i ekspresja genu.

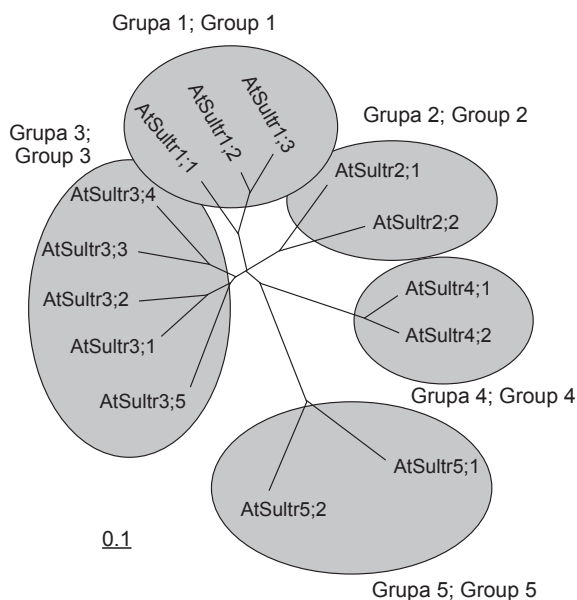


Rys. 2. Wzór strukturalny cysteiny
Structural formula of cysteine

Pobieranie przez rośliny siarczanu z gleby do komórek jest mechanizmem zależnym od energii i prowadzonym przez protonowo-siarczanowe transportery, które są zaklasyfikowane do 5 grup w zależności od ich funkcji (Leustek i Saito 1999, Hesse i in. 2004). Ich funkcjonalne charakterystyki i regulacje, razem z danymi lokalizacji sugerują, że te grupy mają specyficzne role, takie jak: wysokie powinowactwo pobierania w korzeniach, translokacja w tkankach naczyń oraz transport z komórki do komórki w liściach i nasionach. Ze względu na ich zróżnicowaną ekspresję można stwierdzić, że transportery siarczanów biorą udział w kontroli przepływu siarczanów w roślinie w ciągu jej rozwoju. Ekspresja genów kodujących różne transportery siarczanów jest regulowana przez sygnały, które odpowiadają zawartości składnika w roślinie. Ekspresja transporterów siarczanów jest indukowana przez niski wewnątrzkomórkowy stan siarki. W warunkach deficytu siarki obniża się bowiem poziom cysteiny i glutationu, w wyniku czego następuje usunięcie mechanizmu hamującego pobieranie siarczanów, co powoduje zwiększoną aktywność ich transporterów, prowadząc do maksymalnego pobrania tych jonów. W pobieraniu, transporcie i dystrybucji komórkowej siarczanów pośredniczą różne białka transportery (rys. 3) (De Kok i in. 2005, Hawkesford i De Kok 2006). Zgodnie z ich komórkową ekspresją i funkcjonowaniem rodzina genów transporterów siarczanów jest zaklasyfikowana do 5 różnych grup. Początkowo niezbędny jest transport w poprzek membran, po czym transport wewnątrzkomórkowy z korzeni do pędu, który odbywa się wraz z prądem transpiracyjnym naczyniami ksylemu. Następnie przez floem jest prowadzony transport pomiędzy tkankami.

Na ogół przyjmuje się, że pobrane przez korzeń siarczany są transportowane do łodygi, gdzie podlegają redukcji w chloroplastach przed asymilacją w inne organiczne składniki siarkowe. Jednakże już w latach 70. XX w. zostało wykazane, że także korzenie są zdolne do redukcji siarki (Pate 1965), po czym część z niej jako metionina, lub w mniejszym zakresie cysteina i glutation, jest transportowana do

pędu. Stwierdzono ponadto, że skoro wszystkie enzymy uczestniczące w asymilacji siarczanów są obecne w korzeniach (Lee i Leustek 1999), to ich aktywność i ekspresja, jak również redukcja siarczanów, najprawdopodobniej zachodzą w plastydach (Leustek i Saito 1999). Jednakże należy zaznaczyć, że chociaż plastidy korzenia mają wszystkie enzymy szlaku asymilacyjnego siarczanów, to jest oczywiste, że głównym źródłem siarki dla rośliny są chloroplasty pędu. Siarczany pozostałe w tkankach rośliny są transportowane do wakuoli. Uruchamianie (remobilizacja) i redystrybucja (przemieszczanie) siarczanów z wakuoli wydaje się być raczej povolna, więc rośliny deficytowe w siarkę mogą wciąż zawierać małą ilość tego składnika (Bates i in. 1997).



Rys. 3. Drzewo filogenetyczne rodziny genów transporterów siarczanów u *Arabidopsis* (Hawkesford i De Kok 2006, zmodyfikowane)

A phylogenetic tree of the *Arabidopsis* sulphate transporter gene family (Hawkesford and De Kok 2006, modified)

Formowanie cysteiny jest także bezpośrednim połączeniem pomiędzy asymilacją siarki i azotu w roślinie (Brunold i in. 2003). Tiolowe grupy reszt cysteinowych mogą być utleniane, uzyskując dwusiarczkowe połączenia z innymi cysteinowymi łańcuchami i/lub połączenia z polipeptydami. Dwusiarczkowe mostki mają ważny udział w tworzeniu struktury białek. Grupy tiolowe mają także duże znaczenie w tworzeniu np. ferredoksyny (Tabatabai 1986).

Cysteina, jako końcowy produkt szlaku redukcyjnego, jest materiałem wyjściowym do produkcji wielu metabolitów zawierających zredukowaną siarkę. Do najważniejszych z nich należą:

- metionina jako drugi główny aminokwas zawierający siarkę. Donorem siarki dla metioniny (21% S) jest cysteina (27% S). Oba te aminokwasy mają wiel-

kie znaczenie w tworzeniu struktury oraz funkcji białek i enzymów. Wysoki poziom tych aminokwasów może być także obecny w białkach zapasowych nasion (Tabatabai 1986). Metionina jest także podstawowym metabolitem w komórkach roślinnych. Jako prekursor SAM (*S*-adenosylmethionine), który jest pierwszym biologicznym donorem grup metylowych, metionina reguluje podstawowe procesy komórkowe, do których należą: podział komórkowy, synteza ścian komórkowych, chlorofilu i membran (Roje 2006). W roślinach wyższych SAM jest także prekursorem dla hormonu etylenu, który reguluje stadia rozwojowe, włącznie z dojrzewaniem i starzeniem się (Miyazaki i Yang 1987). Oprócz tego SAM jest źródłem grupy propylaminowej w syntezie poliamin, spermidyny i sperminy, które odgrywają kluczową rolę w wielu aspektach wzrostu roślin, włączając m.in. homeostazę, podział komórkowy i ekspresję genów. SAM jest także prekursorem dla nikotynamidu, fitosideroforów oraz biotyny (Droux 2004). Metionina jest donorem siarki dla wielu metabolitów wtórnych, takich jak glukozynolany. Prowadzi również do syntezy SMM (*S*-methylmethionine), którą uważa się za mobilną i magazynową w komórce formę metioniny i prekursora innych metabolitów wtórnych (Mudd i Datko 1990).

- glutation – najbardziej rozpowszechniony i najbardziej liczny niebiałkowy tiol w wielu organizmach; jest obecny w wysokiej koncentracji w komórkach roślinnych (Noctor i in. 2002). Glutation jest związany z metabolizmem siarki, ponieważ bezpośrednim prekursorem dla jego syntezy jest cysteina. Działa on również jako antyoksydant, a przez utrzymywanie bilansu redoks w komórce jest włączony w proces detoksyfikacji. Glutation spełnia też ważną rolę jako forma magazynowania i transportu cysteiny (Noctor i in. 2002). Rozwijające się rośliny są często poddawane działaniu biotycznych i abiotycznych stresów wynikających z tworzenia różnych pochodnych tlenu (ROS), azotu i siarki (Droux 2004). W obecności tych reaktywnych składników komórka ulega uszkodzeniom prowadzącym do destrukcji membran, DNA i białek. Komórki roślinne mają wiele systemów utrzymania homeostazy redoks, a jednym z nich jest glutation, który jest uważany za główny bufor mogący działać jako pierwsza linia obrony w detoksyfikacji komórek (De Kok i in. 2002b). Dlatego homeostaza glutationu definiowana jako bilans pomiędzy jego redukcją, syntezą, degradacją i transportem jest uważana za krytyczną do przetrwania komórki (Noctor i in. 2002). Glutation jest także włączony w detoksyfikację ksenobiotyków, składników niemających bezpośrednio roli żywieniowej lub znaczenia w metabolizmie, ale mogących w zbyt wysokich stężeniach negatywnie oddziaływać na funkcjonowanie roślin. Ksenobiotyki mogą być unieszkodliwiane w reakcjach z glutationem katalizowanych przez *S*-transferazę glutationową. Enzym ten ma duże znaczenie w detoksyfikacji herbicydów i tolerancji w rolnictwie. W normalnych warunkach *S*-transferaza glutationowa ma znaczenie w detoksyfikacji nadtlenu lipidowego w połączeniach wewnętrznych metabolitów, hormonów i produktów rozpadu DNA oraz transportu flawonoidów (Gullner i Kömives 2001). Glutation jest tak-

że prekursorem dla syntezy fitochelatyn $[(\gamma\text{GLU-Cys})_n\text{Gly}]$ (De Kok i in. 2005). Niedawne doniesienia wskazują ponadto, że synteza glutationu może być niezbędna do kiełkowania pyłku *in vitro*, ponieważ obniżenie koncentracji tego związku znacznie redukowało w badaniach wskaźnik kiełkowania pyłku u *Arabidopsis thaliana* (Zechmann i in. 2011).

- glukozyzyny – należą do tzw. metabolitów wtórnych obecnych w niektórych gatunkach roślin. Dla przykładu w pędach i korzeniach roślin z rodzaju *Brassica* udział glukozyzyn wynosi 1–2% całkowitej ilości siarki obecnej w roślinach. Fizjologiczne znaczenie glukozyzyn jest ciągle jeszcze niejasne, chociaż są uważane jako miejsce składowania siarki w warunkach jej nadmiaru (Schnug 1990). Związki te są odpowiedzialne za właściwości zapachowe roślin z rodziny *Brassicaceae*, a obecnie brane są pod uwagę ich właściwości antynowotworowe (El-Bayoumy i in. 2006, Schonhof i in. 2007). Produkty katabolizmu glukozyzyn wykazują znaczną toksyczność w stosunku do szeregu grzybów patogenicznych, bakterii, wirusów, owadów oraz roślin wyższych (Oleszek 1995, Troczyńska 2005). Glukozyzyny występują w roślinach w postaci glikozydowej i połączenia te nie wykazują toksyczności w stosunku do roślin, zwierząt i patogenów. Jednakże wszystkie rośliny posiadające glukozyzyny zawierają także enzym mirozynazę zdolną do degradacji tych związków do form prostszych. Cechą charakterystyczną produktów degradacji jest ich wysoka aktywność biologiczna, dlatego w oddziaływaniach szkodnik – roślina są one prawdopodobnie znacznie ważniejsze niż glukozyzyny (Oleszek 1995, De Kok i in. 2005).
- fitochelatyny – metalotiolowe polipeptydy powszechnie spotykane w komórkach roślinnych, utworzone na bazie powtarzającego się 2–11-krotnie dipeptydu-Glu-Cys. Spośród nich najbardziej rozpowszechnione są fitochelatyny będące pochodnymi glutationu (Baranowska-Morek 2003). Według Nocito i in. (2007), fitochelatyny to jedna z podstawowych klas chelatorów metali ciężkich w roślinach i grzybach. Jest to rodzina małych białek, bogata w cysteinę, która składa się tylko z trzech aminokwasów: Glu, Cys i Gly. Zdaniem tych autorów rośliny wykształciły mechanizm odtruwający oparty na chelatowaniu i wewnątrzkomórkowym rozdzielaniu. Ten ważny mechanizm detoksyfikacji metali ciężkich w roślinie i innych organizmach jest oparty o syntezę chelatorów, które wpływają na koncentrację metalu w cytozolu. Uważa się, że synteza tych związków jest jednym z podstawowych elementów odpowiedzi rośliny w warunkach skażenia metalami (Cobbett 2000). Zadaniem chelatorów jest minimalizowanie działania niekorzystnego wpływu akumulacji metali ciężkich w komórkach roślin. Rola fitochelatyn w detoksykacji metali polega na ich wiązaniu w kompleksy, dzięki czemu grupy tiolowe (SH) oraz histydynowe białek komórkowych są chronione przed działaniem metali. Kompleksy fitochelatyna – metal są następnie transportowane do wakuoli, gdzie metal ulega oddzieleniu od pozostałych organelli komórkowych, dzięki czemu jest unieszkodliwiany. Synteza fitochelatyn jest in-

dukowana w ciągu kilku minut po ekspozycji rośliny na działanie różnych metali. Spośród metali najgroźniejszy jest Cd, podczas gdy Cu, Zn, Pb i Ni są mniej efektywne i wymagają wyższego poziomu ich koncentracji do indukowania syntezy fitochelatyn (Maitani i in. 1996).

2.4. ZAPOTRZEBOWANIE ROŚLIN UPRAWNYCH NA SIARKĘ

Proces pobierania siarczanów przez korzenie i ich redukcja, a następnie asymilacja w pędzie, jest w normalnych warunkach regulowany „na poziomie całej rośliny” i zgodny z aktualnym zapotrzebowaniem na siarkę do produkcji biomasy danego gatunku rośliny. Całkowite zapotrzebowanie rośliny na siarkę ($S_{\text{zapotrzeb.}}$) może być określone za pomocą wzoru (De Kok i in. 2002a):

$$S_{\text{zapotrzeb.}} (\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{roślina} \cdot \text{dzień}^{-1}) = \text{RGR} (\% \cdot \text{dzień}^{-1}) \times S_{\text{zaw.}} (\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{roślina})$$

gdzie: RGR odpowiada względnej szybkości wzrostu (Relative Growth Rate) a $S_{\text{zaw.}}$ – całkowitej zawartości siarki w tkance rośliny.

Natomiast pobranie siarki niezbędne do zabezpieczenia potrzeb wzrostowych rośliny może być określone za pomocą wzoru:

$$\text{Siarczany}_{\text{pob.}} (\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{korzeń} \cdot \text{dzień}^{-1}) = S_{\text{zapotrzeb.}} (\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{roślina} \cdot \text{dzień}^{-1}) \times (S/R + 1)$$

gdzie: S/R odpowiada stosunkowi biomasy pędu (S) do biomasy korzenia (R).

Według De Koka i in. (2002a), zapotrzebowanie roślin na siarkę można zdefiniować jako minimalna dawka siarki pobrana i wykorzystana przez rośliny, która jest wystarczająca do uzyskania właściwej kondycji roślin oraz maksymalnego plonu o pożądanej jakości. W warunkach rolnictwa zapotrzebowanie to wyraża się w kg siarki zakumulowanej w plonie zebranym z jednostki powierzchni uprawy. Natomiast w ujęciu fizjologicznym zapotrzebowanie roślin na siarkę można wyrazić jako ilość jej dopływu potrzebną na wyprodukowanie 1g biomasy w poszczególnych fazach rozwoju rośliny. W optymalnych warunkach wzrostu zapotrzebowanie na siarkę różnych gatunków roślin wynosi od 2 do 10 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ świeżej masy $\cdot \text{dzień}^{-1}$ co odpowiada wartości 0,08–0,4 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ świeżej masy $\cdot \text{h}^{-1}$ (De Kok i in. 2002a). Główna część pobranych siarczanów jest redukowana i włączana do składników organicznych niezbędnych do wzrostu rośliny.

Biorąc pod uwagę wielkość zapotrzebowania na siarkę, wyróżniono 3 grupy roślin (Siuta i Rejman-Czajkowska 1980):

- 1) o bardzo dużym zapotrzebowaniu na siarkę (40–80 kg S $\cdot \text{ha}^{-1}$), do których należą rośliny krzyżowe (rzepak, kapusta, gorczyca, rzodkiew i rzepa) oraz cebula, czosnek i chrzan;

- 2) o dużym zapotrzebowaniu na siarkę ($30\text{--}40 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$), do których zaliczane są głównie rośliny motylkowate oraz burak cukrowy i kukurydza;
- 3) o stosunkowo niewielkim zapotrzebowaniu na siarkę ($12\text{--}25 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$), do których należą zboża, trawy i ziemniak.

Zapotrzebowanie roślin na siarkę jest zróżnicowane nie tylko pomiędzy gatunkami, ale może też znacznie różnić się w zależności od fazy rozwojowej roślin (wzrost wegetatywny, produkcja nasion). W perspektywie całego metabolizmu siarki w roślinie zapotrzebowanie jest nastawione na takie zaopatrzenie w ten składnik, aby w pierwszej kolejności zoptymalizować wzrost wegetatywny rośliny. Natomiast poprzez dostarczenie siarki do tkanek nasion następuje zwiększenie płodności i optymalizacja potencjału produkcyjnego. W roślinach zbożowych dostarczenie odpowiedniej ilości siarki jest konieczne zarówno do uzyskania maksymalnej produkcji ziarna, jak i dla aspektów jakościowych. Zatem, z punktu widzenia całej rośliny pobranie siarczanów oraz ich dystrybucja i asymilacja są koordynowane i bilansowane według aktualnych potrzeb wzrostowych rośliny (Hawkesford i De Kok 2006).

Jak wspomniano wcześniej, zapotrzebowanie na siarkę wynika z jej obecności w wielu specyficznych substancjach roślinnych (białko, glukozytolany, glutation, ferredoksyna, tłuszcz i olejki eteryczne) oraz z poziomu nawożenia innymi składnikami (np. azotem).

Rzepak, który należy do grupy roślin o największych wymaganiach żywieniowych względem siarki potrzebuje około $50\text{--}70 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$, ponieważ do wyprodukowania 1 tony nasion, wraz z odpowiednią masą wegetatywną, musi zgromadzić średnio 16 kg tego składnika (z zakresem $5\text{--}20 \text{ kg}$). Dla porównania rośliny strączkowe potrzebują 8 kg (z zakresem $5\text{--}13 \text{ kg}$), a zboża $3\text{--}4 \text{ kg}$ (z zakresem $1\text{--}6 \text{ kg}$) (Jamal i in. 2010). Zawartość siarki w roślinach jest zróżnicowana i wynosi od 1,0 do $1,5 \text{ g S}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Anjum i in. 2012). Jej koncentracja zależy od wieku rośliny, organu oraz nawożenia.

Zdaniem Grzebisza i Przygockiej-Cyny (2003), pobranie siarki przez rośliny w Polsce jest generalnie małe, co wynika z niższego w porównaniu z krajami Europy Zachodniej poziomu plonów. Nie bez znaczenia jest też pomijanie siarki jako składnika nawozowego w produkcji roślinnej oraz zaprzestanie stosowania nawozów naturalnych. Dlatego też średnie i wysokie pobranie siarki stwierdza się w rejonach Polski charakteryzujących się wyższym poziomem kultury rolnej.

2.5. ROLA SIARKI W TWORZENIU PLONU ROŚLIN UPRAWNYCH I JEGO JAKOŚCI

Siarka jest jednym z 4 głównych makroelementów po azocie, fosforze i potasie, które są uważane za niezbędne do właściwego wzrostu i rozwoju roślin (Tabatabai 1984, Anjum i in. 2012). Wielu autorów potwierdza wpływ nawożenia siarką na wzrost plonu w warunkach stwierdzonego jej niedoboru w środowisku (Goźliński 1970, Jakubus i Toboła 2005, Wielebski 2011), natomiast siarka zastosowana na gle-

bach zasobnych w ten składnik nie wykazuje działania plonotwórczego. Wielebski (2008) stwierdził, że w warunkach optymalnego i bardzo wysokiego zaopatrzenia roślin w siarkę umiarkowane dawki tego składnika nie różnicowały wielkości plonu rzepaku, a po zastosowaniu najwyższej dawki ($80 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$) obserwowano istotny spadek plonu.

Szczególną uwagę na nawożenie siarką zwraca się przy uprawie tzw. roślin siarkolubnych, zwłaszcza często uprawianych po sobie. W warunkach Polski taką rośliną jest rzepak (Siuta i Remjman-Czajkowska 1980). Boreczek (2000) stwierdziła 3–4,5% wzrost plonu rzepaku ozimego nawożonego siarką w warunkach doświadczenia polowego. Malarz i in. (2011b) uzyskali 12% wzrost plonu nasion mieszańcowej odmiany rzepaku ozimego po wiosennej aplikacji $60 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$ w formie siarczanu amonu. Uzyskiwane wyniki badań potwierdzają, że dawki siarki nie muszą być zbyt wysokie, a ich wielkość powinna uwzględniać dawkę zastosowanego azotu. Istotny wzrost plonu nasion rzepaku stwierdzono także w polowej uprawie różnych typów hodowlanych odmian rzepaku po zastosowaniu najniższego w doświadczeniu nawożenia $10\text{--}20 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Wielebski 2008). Również w badaniach Ahmad i in. (1999) najkorzystniejszą plonotwórczo okazała się, średnia w doświadczeniu, dawka 40 i $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, odpowiednio dla siarki i azotu.

Duże znaczenie w krajowej produkcji polowej mają rośliny zbożowe, które zaliczane są do grupy roślin o małym zapotrzebowaniu na siarkę (Siuta i Remjman-Czajkowska 1980). Badania potwierdzają korzystne działanie siarki nawozowej na plony zbóż, aczkolwiek spotykane często duże zróżnicowanie reakcji na S jest spowodowane wpływem typu gleby i zawartości materii organicznej w glebie, potencjałem plonotwórczym roślin oraz udziałem siarki z zanieczyszczeń atmosfery (Reussi Calvo i in. 2008). W wielu badaniach potwierdza się sugestia Zhao i in. (1999), że zboża potrzebują $15\text{--}20 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$, chociaż pozytywną reakcję plonotwórczą stwierdzono również po zastosowaniu $5\text{--}10 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Reussi Calvo i in. 2008) oraz $36 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Lepiarczyk i Filipek-Mazur 2010) w przypadku pszenicy jarej, jak i $50 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$ w uprawie pszenżyta jarego (Klikocka 2004a). Grzebisz i Przygocka-Cyna (2007) stwierdzili, że zarówno dawka 25, jak i $50 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$ powodowała przyrost plonu jęczmienia, ale w poszczególnych latach badań wystąpiły różnice. Wzrost plonu ziarna po zastosowaniu siarki stwierdzili także Barczak i Nowak (2010) w odniesieniu do owsa, jak również Brodowska (2003), Gondek i Gondek (2010) oraz Moss i in. (1981) w uprawie pszenicy jarej.

Nawożenie siarką oddziałuje również na wzrost plonu roślin okopowych, aczkolwiek wyniki badań nie są w tym względzie jednoznaczne (Klikocka i in. 2003, Klikocka 2004b i 2005b). Badania potwierdziły, że na plon bulw ziemniaka najkorzystniej oddziaływało nawożenie siarką siarczanową w ilości $25 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$ oraz siarką elementarną w dawce $50 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Klikocka 2004b). Natomiast burak cukrowy jest uważany za roślinę, która wyróżnia się małym ryzykiem wystąpienia deficytu siarki, ponieważ produkt główny (sacharoza) nie zawiera żadnych składników siarkowych, takich jak glukozynolany czy białka (Hoffmann i in. 2004).

Dlatego też zapotrzebowanie buraka na siarkę nie zależy od poziomu plonowania, jak to jest w przypadku azotu. Pomimo tego określono zakresy zawartości siarki całkowitej w młodych liściach buraka świadczące o deficycie, zawartości optymalnej i nadmiarze tego składnika (Haneklaus i in. 2007). Zakresy te wskazują poziom zawartości siarki, który prowadzi do strat plonu, ale także, który warunkuje uzyskanie plonu maksymalnego. Obniżenie się koncentracji S powoduje wzrost wartości stosunku N:S i wskazuje na nieprawidłowości w metabolizmie N (Hoffmann i in. 2004). Stosowanie siarki w badaniach polowych w Turcji, w warunkach gleb alkalicznych o niskiej zawartości materii organicznej, wpłynęło na wzrost plonu korzeni buraka od 39 do 42% (Zengin i in. 2009). Z kolei badania prowadzone w Niemczech na glebach gliniastych i piaszczystych nie wykazały wpływu siarki na plon buraka (Hoffmann i in. 2004).

Zwiększone zapotrzebowanie na siarkę nawozową wykazują także rośliny motylkowate. Wynika ono z niezbędności tego składnika w procesie wiązania N_2 , przemian azotu oraz produkcji białka (Ruiz i in. 2005, Scherer 2008). Ponadto rośliny te zaopatrzone w siarkę prowadzą sprawną fotosyntezę, dzięki czemu asymilaty dostarczone do brodawek mogą być wykorzystane do ich wzrostu i oddychania oraz uaktywniają proces eksportu z brodawek związanego azotu (Zaroug i Munns 1979, Zhao i in. 1999). Wykazano w doświadczeniu z soją, że pod wpływem nawożenia siarką zwiększa się ilość związanego azotu atmosferycznego (Zhao i in. 1999, Hussain i in. 2011). Właściwe zaopatrzenie w siarkę tej grupy roślin skutkuje więc wzrostem produkcji biomasy i plonu nasion (Zhao i in. 1999 i 2008, Naeve i Shibles 2005, Ruiz i in. 2005).

Warto wspomnieć także o trawach, które wypasa się lub kosi kilka razy w roku. Rośliny te kilkakrotnie odtwarzają masę vegetatywną, co oznacza, że muszą wznowiać fotosyntezę, przemiany azotu i syntezę białka (Millard i in. 1985). Chociaż gatunki roślin łąkowych wykazują zróżnicowane zapotrzebowanie na siarkę (Patorczyk-Pytlik i in. 2008), to wymienione procesy są w wysokim stopniu zależne od dostępności tego składnika. Millard i in. (1985) wykazali, że w roślinach rajgrasu uprawianych w warunkach deficytu siarki nastąpiła znaczna redukcja plonu, obniżeniu uległa koncentracja aminokwasów zawierających siarkę (czyli cysteiny i metioniny) oraz zmniejszyła się zawartość argininy, histydyny, glicyny, lizyny, seryny i treoniny. Świadczy to o obniżeniu jakości białka surowego i pogorszeniu jakości tej trawy jako paszy (Patorczyk-Pytlik i in. 2008). Natomiast Kaczor i Zuzańska (2010) wykazali, że nawożenie siarką elementarną wyraźnie zwiększyło plon suchej masy kupkówki pospolitej oraz spowodowało wzrost pobrania siarki.

Jednym z zadań współczesnego rolnictwa jest zapewnienie opłacalnej produkcji roślinnej. Ma ona zapewnić uzyskiwanie wysokich plonów, które będą dodatkowo spełniać odpowiednie kryteria jakościowe. Wychodząc z tego założenia, korzystne oddziaływanie siarki na plonowanie roślin uprawnych powinno być rozpatrywane razem z jej wpływem na jakość uzyskiwanych płodów rolnych. Znany jest wpływ siarki na cechy nasion rzepaku (Ahmad i in. 1999, Ahmad i Abdin 2000, Jankowski

i in. 2008, Wielebski 2011). Badania tych autorów potwierdzają, że umiarkowane dawki siarki wpływają na wzrost zawartości oraz plonu tłuszczu i białka w nasionach. Umiarkowane nawożenie S zapewnia także utrzymanie w nasionach odpowiedniej zawartości i składu frakcyjnego glukozynolanów (Wielebski 2011). Natomiast zarówno deficyt siarki, jak i jej nadmiar mają niekorzystny wpływ na te cechy. Zdaniem Figas (2009), w warunkach słabego zaopatrzenia w siarkę maleje w roślinach zawartość dostępnej metioniny – prekursora glukozynolanów, co może ograniczyć syntezę tych związków oraz zubożyć białko rzepakowe w cenne aminokwasy siarkowe.

Nawożenie siarką wpływa także na jakość roślin zbożowych zarówno odmian pastewnych, jak i technologicznych, co dotyczy głównie produkcji białka (Goźliński 1970, Barczak i Nowak 2010). Goźliński (1970) stwierdził, że zastosowanie siarki w uprawie owsa i jęczmienia wpływało na wzrost wykorzystania pobranego azotu do tworzenia plonu i syntezy białek. Przy niedoborze siarki pobrany azot gromadził się głównie w słomie i w dużej ilości występował w formie niebiałkowej, co powodowało niewykorzystanie tej części azotu w plonie ziarna. Bardzo ważnym elementem uprawy pszenicy jakościowej jest jej przydatność do celów piekarskich. Järwan i in. (2008) stwierdziła, że zastosowanie siarki w doświadczeniu z pszenicą ozimą nie wpływało jednoznacznie na zawartość białka i glutenu mokrego w ziarnie, ale we wszystkich doświadczeniach zwiększeniu uległ indeks glutenu, a jakość białka poprawiła się. Siarka wpłynęła na wzrost zawartości aminokwasów oraz na poprawę wszystkich jakościowych parametrów wypiekowych, takich jak: liczba jakości i czas stałości ciasta oraz objętość bochenka.

Korzystne oddziaływanie siarki na jakość buraka cukrowego wynika zdaniem Bell i in. (1995) z obniżenia zawartości w korzeniach glutaminy i asparaginy. Aminokwasom tym przypisuje się wpływ na obniżenie klarowności soku, co zmniejsza plon cukru. Jest to szczególnie ważne w przypadku przenawożenia plantacji buraka azotem. Wówczas dodatek nawozu siarkowego może pomóc w redukcji tzw. azotu szkodliwego (czyli α – aminowego) w korzeniach. Klikocka (2004b) wykazała natomiast, że zastosowanie siarki w uprawie ziemniaka spowodowało poprawę jakości plonu bulw poprzez wzrost zawartości oraz plonu skrobi i białka.

Znany jest problem redukcji plonu roślin w warunkach deficytu siarki, który może być spowodowany hamowaniem syntezy białka (Scherer 2008). Siarka jako składnik metioniny i cysteiny jest ważnym elementem do syntezy białek w roślinach (Mortensen i Eriksen 1994). Zatem należy spodziewać się, iż deficyt siarki spowoduje nie tylko niedobór aminokwasów siarkowych, ale spowolni także całą aktywność metaboliczną rośliny, ponieważ siarka jest składnikiem wielu enzymów, koenzymów i grup prostetycznych, takich jak: ferredoksyna, biotyna, koenzym A (Marschner 1995). Zaopatrzenie roślin łubinu w siarkę wpływa na poprawę jakości nasion, które są stosowane w żywieniu zwierząt. Pasze oparte na tych nasionach charakteryzują się jednak niską zawartością metioniny – aminokwasu, który jest niezbędny w żywieniu zwierząt. Aby uzupełnić jego ilość, zwierzętom hodowlanym

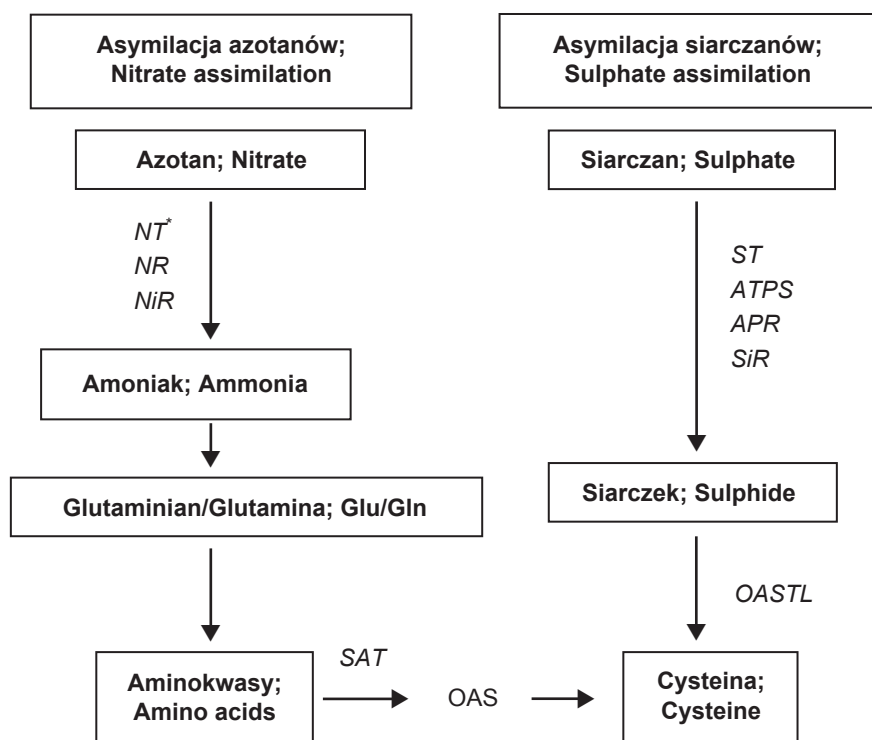
podaje się metioninę syntetyczną. Tabe i Droux (2001) wykazali, że rozwijające się nasiona łubinu zawierają ogromne zapasy utlenionej siarki i są zdolne do jej wykorzystania w syntezie białka. Modyfikacja szlaku asymilacji siarki w rozwijających się nasionach może być pomocna w poprawie zawartości aminokwasów siarkowych i przez to może wpłynąć na poprawę wartości żywieniowej nasion roślin strączkowych.

2.6. WSPÓŁDZIAŁANIE SIARKI Z AZOTEM

Wieloaspektowe działanie siarki na wzrost, rozwój i plonowanie roślin zostało potwierdzone przez licznych autorów (Scherer 2001, Haneklaus i in. 2007, Kaczor i Zuzańska 2009, Till 2010). Jednakże właściwy rozwój roślin wymaga dostępności wszystkich makro- i mikroelementów. Chociaż każdy ze składników pokarmowych ma do spełnienia w roślinie specyficzne funkcje, to jednocześnie składniki te współdziałają ze sobą, wpływając na prawidłowy przebieg różnych procesów. Siarka jako składnik niezbędny w życiu roślin w największym stopniu współdziała z azotem (Stewart i Porter 1969, Ruiz i in. 2005, Jamal i in. 2010). Zależności te zaczynają się już w glebie, ponieważ stwierdzono, że niedobór w niej siarki obniża wykorzystanie dostępnego azotu (Lakkineni i Abrol 1994). Zatem oba składniki powinny znajdować się w glebie w ilościach odpowiednich do zapewnienia największego ich wykorzystania. Janzen i Bettany (1984) wskazują, że optymalny stosunek dostępnego azotu do dostępnej siarki (N:S) powinien wynosić 7:1, ponieważ wartości niższe od 7 skutkują spadkiem plonów. Przy braku nawożenia azotem rzepak wykorzystuje 27–31% podanej siarki, a po zastosowaniu 60 kg N·ha⁻¹ – do 38% (Sachidev i Deb 1990). Fismes i in. (2000) wykazali, że deficyt S może zmniejszać efektywność wykorzystania azotu – NUE (Nitrogen Use Efficiency), a deficyt azotu może także redukować efektywność wykorzystania siarki – SUE (Sulphur Use Efficiency). Potarzycki (2003) stwierdził współdziałanie azotu i siarki w kształtowaniu plonu jęczmienia jarego, które polegało na lepszej redystrybucji azotu z organów wegetatywnych do ziarniaków.

Badania potwierdzają także istnienie licznych zależności pomiędzy siarką i azotem na poziomie rośliny (rys. 4) (De Kok i in. 2002b). Istotna rola azotu w biologii roślin wynika z faktu, że pierwiastek ten wchodzi w skład białek oraz wielu innych biologicznie ważnych związków, m.in. kwasów nukleinowych, hormonów roślinnych, metabolitów wtórnych, a także nośników energii (np. ATP) (Adamczyk i Godlewski 2010). Zatem ze względu na niezbędność obu tych składników w przebiegu ważnych procesów w roślinie ich obecność oraz działanie jest wzajemnie zależne. Jednym z takich procesów jest redukcja azotanów (V) – NO³⁻ do azotanów (III) – NO²⁻, która jest pierwszym etapem procesu niezbędnego do tego, aby jony azotanowe mogły być wbudowywane w aminokwasy (Adamczyk i Godlewski 2010). Ten pierwszy etap redukcji azotanów do NH₄⁺ jest katalizowany przez enzym reduktazę azotanową (NR) (Gabryś 2002). Pozytywną rolę siarczanów w regulowa-

niu reduktazy azotanowej stwierdzili Ahmad i in. (1999) oraz Prosser i in. (2001). Natomiast Ruiz i in. (2005) wykazali, że także drugi etap redukcji azotanów (V), katalizowany przez reduktazę azotanową (III) (NiR), jest wysoce uzależniony od obecności/braku siarki. Autorzy ci stwierdzili, że najwyższa aktywność NR i NiR wystąpiła w optymalnych warunkach (1,875 mM SO_4^{2-}), a najniższa – przy braku siarki (0S) oraz toksycznej koncentracji siarczanów w pożywce (18,75 mM SO_4^{2-}).



**NT* – transporter azotanu; nitrate transporter, *NR* – reduktaza azotanowa; nitrate reductase, *NiR* – reduktaza azotynowa; nitrite reductase, *ST* – transporter siarczanu; sulphate transporter, *ATPS* – sulfurylaza *ATP*; *ATP* sulphurylase, *APR* – reduktaza *APS*; *APS* reductase, *SiR* – reduktaza siarczynowa; sulphite reductase, *OASTL* – O-acetyloseryno(tiol)liaza; O-acetylserine (thiol)lyase, *SAT* – acetylotransferaza serynowa; serine acetyltransferase

Rys. 4. Prawdopodobne połączenie asymilacji azotanu i siarczanu przez O-acetyloserynę (OAS) (Hesse i in. 2004, zmodyfikowane)

The putative connection of nitrate and sulphate assimilation via O-acetylserine (OAS) (Hesse et al. 2004, modified)

Niezbędność siarki i azotu oraz ich wzajemną zależność stwierdzono także w procesie syntezy białka (Moss i in. 1981). Potwierdzają to badania, w których obserwowano wpływ azotu na regulowanie asymilacji siarczanów przez ATP-sulfurylazę (Smith 1975, Ahmad i in. 1999). Należy dodać, iż ATP-sulfurylaza jest

enzymem, który katalizuje pierwszy etap szlaku asymilacji siarczanów, w efekcie którego powstaje cysteina, a następnie metionina (Brunold i in. 2003). Oba te aminokwasy siarkowe są niezbędne do biosyntezy białka w roślinach, tak jak pozostałe aminokwasy, w których głównym składnikiem jest azot. Zatem deficyt siarki powoduje wysoką akumulację aminokwasów związaną z obniżeniem syntezy białka, wywołaną brakiem aminokwasów siarkowych. Ostatecznie, przy braku siarki, jak i przy jej toksycznej koncentracji w pożywce, w roślinach fasoli stwierdzono niską zawartość białka w porównaniu z roślinami zasilonymi optymalną dawką S, które charakteryzowały się wysoką zawartością białka (Ruiz i in. 2005). Badania prowadzone w warunkach hali wegetacyjnej wykazały, że w warunkach deficytu siarki dodatkowe nawożenie azotem nie wpływa ani na plon, ani na poziom białka w roślinach, wzrasta natomiast ilość związków niebiałkowych, takich jak: amidy, azotany (V) i azotany (III) oraz aminokwasy (Stewart i Porter 1969). Prowadzone prace potwierdziły, że aby osiągnąć maksymalną produkcję biomasy i białka, na 1 cząsteczkę siarki niezbędne jest 12–15 cząsteczek azotu. Wyniki te wskazują na bliską zależność pomiędzy ilością N i S biorących udział w metabolizmie.

Zarówno azot, jak i siarka są niezbędne do przebiegu procesu fotosyntezy, bowiem azot jest składnikiem chlorofilu – głównego barwnika w fotosyntezie, a siarka, poprzez aminokwas metioninę, wpływa na syntezę chlorofilu w roślinach (Zhao i in. 1999, Roje 2006, Varin i in. 2010). Ahmad i in. (1999) stwierdzili wzrost intensywności fotosyntezy oraz przedłużenie jej aktywności w czasie wzrostu i rozwoju roślin z rodzaju *Brassica* w obiektach nawożonych umiarkowanym dawkami siarki i azotu.

Wielokrotnie stwierdzono także, że siarka jest specyficznie włączona w wiązanie azotu atmosferycznego przez rośliny motylkowate (Zhao i in. 1999). Badania prowadzone z koniczyną białą wykazały, że w roślinach deficytowych w S wiązanie N_2 było drastycznie zredukowane w konsekwencji słabego rozwoju brodawek, małej produkcji leghemoglobiny i niskiej aktywności nitrogenazy (Varin i in. 2010). Zastosowanie w uprawie soi $30 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$ skutkowało wzrostem plonu oraz wzrostem ilości związanego azotu z 83 do $143 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Hussain i in. 2011). Natomiast Zhao i in. (1999) stwierdzili podwojenie ilości związanego azotu po włączeniu siarki do nawożenia grochu. Wspomniani autorzy stwierdzili, że korzenie i brodawki grochu mają wysokie zapotrzebowanie na siarkę, a sam proces wiązania N_2 jest bardzo wrażliwy na deficyt siarki.

Siarka i azot oddziałują także wzajemnie na ich koncentrację w roślinach i całkowite pobranie w plonach. Stwierdzono, że zawartość siarki w ziarnie pszenicy zależała nie tylko od jej dawki, ale także od dostępności azotu, przy czym wzrost dawki N powodował zwiększenie zawartości siarki w ziarnie (Reussi i in. 2011). To współdziałanie azotu i siarki na poziomie wielu procesów metabolicznych ma swoje odbicie we wzroście i rozwoju roślin, przez co ostatecznie wpływa na poziom plonowania roślin uprawnych i jego jakość.

3. MATERIAŁ I METODY

Publikacje stanowiące część składową niniejszej monografii zawierają szczegółowy opis stosowanych metod badawczych. W rozdziale „Materiał i metody” zamieszczono jedynie skrócony opis prowadzonych badań odnoszący się do omawianego zagadnienia.

3.1. WPŁYW DOSTĘPNOŚCI SIARKI NA ZAWARTOŚĆ I POBRANIE SKŁADNIKÓW POKARMOWYCH PRZEZ RZEPAK I PSZENICĘ

Doświadczenia, których wyniki przedstawiono w pracach I–III, prowadzone były w warunkach hali vegetacyjnej, w wazonach Mitscherlicha, wypełnionych glebą, która charakteryzowała się lekko kwaśnym odczynem pH_{KCl} w granicach 5,53–6,5 i zawartością siarki klasyfikowaną jako niską (Motowicka-Terelak i in. 1993).

W pracy II i III pierwszy czynnik doświadczenia stanowił rodzaj nawozu azotowego: saletra amonowa (bez siarki) oraz zawierający siarkę czteromocznikan siarczanu wapnia (CMSW), a czynnik drugi – dawki azotu (g N-wazon^{-1}): 1,6 i 2,4 – w pracy II oraz 0,8; 1,6 i 2,4 – w pracy III. Zarówno saletra amonowa, jak i CMSW miały postać drobnych granul. Wraz z CMSW wprowadzono do gleby dawki siarki (g-wazon^{-1}): 0,50 i 0,75 oraz 0,25; 0,50 i 0,75, odpowiednio dla metodyki pracy II i III. Rośliny nawożono pozostałymi składnikami pokarmowymi w ilościach odpowiednich dla gatunku i uprawy w wazonie. Do podlewania roślin używano wody zdemineralizowanej, a wilgotność gleby utrzymywana była na poziomie 40–60% ppw, w zależności od fazy rozwojowej rzepaku i pszenicy. W czasie wegetacji dokonywano zbiorów trzech wazonów z roślinami z danego obiektu nawozowego. Rośliny rzepaku zbierano w fazie tworzenia pąków kwiatowych (BBCH 50) i dojrzałości pełnej (BBCH 89), natomiast pszenicę zbierano w trzech terminach: strzelanie w źdźbło (BBCH 30), pełnia kwitnienia (BBCH 65) i dojrzałość pełna (BBCH 92). Zebrany materiał roślinny dzielono na część wegetatywną (liście, łodygi i łuszczyzny w przypadku rzepaku oraz słoma – w uprawie pszenicy) i generatywną (nasiona, ziarno). Następnie materiał roślinny został wysuszony, zważony i zmielony, po czym odpowiednie próbki poddano analizom chemicznym na zawartość azotu, siarki, fosforu i potasu – w przypadku pszenicy, a w rzepaku oznaczono dodatkowo wapń i magnez. Oznaczenie zawartości podanych składników pokarmowych wykonano w Głównym Laboratorium Analiz Chemicznych IUNG-PIB w Puławach, przy zastosowaniu następujących metod: N i P – spektrometrii przepływowowej, K – emisyjnej spektrometrii płomieniowej, S – metody kolometrycznej benzydynowej, a Ca i Mg oznaczono metodą ASA. Prezentowane wyniki są średnimi z obiektów i lat badań.

W pracy I pierwszym czynnikiem doświadczenia było nawożenie siarką, które zróżnicowano na obiekty: 1 – nawożenia doglebowe, 2 – dokarmianie dolistne S w postaci roztworu $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, zastosowane w fazie pąków kwiatowych, 3 – brak nawożenia siarką. W obiekcie 1 podano siarkę doglebowo w dawce $1,2 \text{ g S-wazon}^{-1}$, w obiekcie 2 dostarczono dolistnie S i Mg, odpowiednio w dawkach: 0,8 i 0,6

$\text{g} \cdot \text{wazon}^{-1}$. Pozostałe składniki pokarmowe podano w dawkach jednakowych dla całego doświadczenia. Drugim czynnikiem doświadczenia była odmiana rzepaku ozimego: Górczański – odmiana tradycyjna 00 (wysokoerukowa i wysokoglukozynolowa) i Marita – odmiana populacyjna. Każdy obiekt nawozowy miał 5 powtórzeń (wazonów). Zbiór roślin dokonano w fazie dojrzałości pełnej rzepaku (89 BBCH). Zebrane rośliny podzielono na: liście + łodygi, nasiona, łuszczyzny i korzenie. W materiale roślinnym oznaczono zawartość głównych składników pokarmowych z zastosowaniem następujących metod: N ogólny i P – metoda spektrofotometryczna, K – spektrometria emisyjna, Ca i Mg – ASA oraz S – rentgenowska fluorescencja spektroskopowa. Przedstawione wyniki stanowią średnie z obiektów i lat badań.

Wyniki zamieszczone w pracach zostały opracowane statystycznie metodą analizy wariancji przy zastosowaniu programu Statgraphics Plus 5.1.

3.2. PLONOWANIE RZEPAKU I PSZENICY W ZALEŻNOŚCI OD NAWOŻENIA SIARKĄ

Doświadczenie będące źródłem pracy IV przeprowadzono w wazonach Mitscherlicha, które wypełniono $6,5 \text{ kg}$ gleby o pH_{KCl} 5,25 i zawartości siarki siarczanowej $1,42 \text{ mg S-SO}_4 \cdot \text{kg}^{-1}$. W każdym wazonie uprawiano 5 roślin rzepaku ozimego odmiany Kana. W doświadczeniu zastosowano zróżnicowane dawki siarki ($\text{g} \cdot \text{wazon}^{-1}$): 0,0 (kontrola), 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 i 1,0 oraz dwie dawki azotu: 1,4 (N1) i 2,8 (N2) $\text{g} \cdot \text{wazon}^{-1}$. Każdy obiekt doświadczenia składał się z 5 wazonów. Rośliny podlewano wodą zdemineralizowaną w ilości uzależnionej od ich fazy wzrostu (40–60% ppw). W fazie pełni kwitnienia wykonano pomiar aktywności fotosyntetycznej liści rzepaku aparatem LI-COR 6400. Rośliny zebrano w pełni dojrzałości i podzielono na liście, łodygi, nasiona, łuszczyzny oraz korzenie. Po wysuszeniu i zważeniu pobrano próbki nasion do analiz. W powietrznie suchych nasionach oznaczono azot metodą Kjeldahla, który przeliczono na zawartość białka. Zawartość oleju w nasionach oznaczono metodą Soxhleta. Przedstawione dane są średnią obiektową z dwóch lat badań.

Metodyka prowadzenia doświadczenia, którego wyniki przedstawiono w pracy V została opisana przy omawianiu metodyki pracy III.

Eksperyment przedstawiony w pracy VI był prowadzony w latach 1999–2000 w Rolniczym Zakładzie Doświadczalnym w Grabowie (woj. mazowieckie) i Stacji Doświadczalnej w Baborówku (woj. wielkopolskie), w oparciu o wieloletnie doświadczenie polowe. W obu miejscowościach doświadczenie prowadzono w dwóch równoległych powtórzeniach, w zmianowaniu czteropolowym obejmującym: rzepak ozimy, pszenicę ozimą, kukurydzę i pszenicę jarą. Obiektem doświadczalnym był rzepak ozimy odmiany Kana uprawiany na glebie o zawartości siarki siarczanowej poniżej $10,0 \text{ mg S-SO}_4 \cdot \text{kg}^{-1}$. Doświadczenie założono metodą split-blok. Pierwszy czynnik doświadczenia stanowiło nawożenie siarką: 0 (kontrola) i $80 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$ (rok 1999 – obie miejscowości) oraz 94 i $100 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$ (rok 2000), odpowiednio dla Grabowa i Baborówka. Drugim czynnikiem doświadczalnym było nawożenie

azotem ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$): 0 (kontrola), 40, 80, 120, 160 i 200. W początku kwitnienia zebrano rozwinięte liście z 1/3 długości pędu, natomiast zbioru całych roślin dokonano w fazie dojrzałości pełnej. Zebrane próbki roślinne wysuszono i poddano analizie na zawartość siarki ogólnej metodą fluorescencji rentgenowskiej. Przetawione dane są średnimi obiektowymi z lat badań.

3.3. ROLA SIARKI W KSZTAŁTOWANIU CECH JAKOŚCIOWYCH NASION RZEPAKU I ZIARNA PSZENICY

Praca VII opiera się na wynikach doświadczenia prowadzonego w Stacji Doświadczalnej IUNG w Baborówku w latach 2000–2002. Doświadczenie prowadzono w zmianowaniu czteropolowym, opisanym wcześniej w pracy VI. W roku 2000 uprawiano rzepak ozimy odmiany Kana, a w latach 2001–2002 odmianę Lisek. Na połowie poletek doświadczenia zastosowano średnio $80 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$, a druga część nie była nawożona siarką, stanowiąc obiekt kontrolny. Na tle nawożenia siarką (i kontroli) wprowadzono w poprzecznych pasach zróżnicowane nawożenie azotem: 0, 40, 80, 120, 160 i $200 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$. Rzepak zebrano w dojrzałości pełnej. Oznaczenie zawartości tłuszczu surowego i białka ogólnego w nasionach przeprowadzono w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie przy użyciu spektrometru bliskiej podczerwieni Oxford QN 1000.

Wyniki przedstawione w pracy VIII pochodzą z doświadczenia polowego prowadzonego w zmianowaniu czteropolowym w Zakładzie Doświadczalnym IUNG zlokalizowanym w Grabowie (woj. mazowieckie). Pszenicę ozimą odmiany Kobra uprawiano na glebie kompleksu żynnego bardzo dobrego. Pierwszym czynnikiem doświadczenia było nawożenie siarką: kontrola bez siarki (–S) i $50 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$ (+S), a czynnikiem drugim – nawożenie azotem: 0, 30, 60, 90, 120 i $150 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$. Gleba charakteryzowała się niską zawartością siarki ($1,8 \text{ mg S-SO}_4 \cdot \text{kg}^{-1}$). Zawartość azotu w ziarnie pszenicy określono metodą spektrofotometrii przepływowej, a zawartość siarki – metodą fluorescencji rentgenowskiej. Analizę wymiałowych i wypiekowych właściwości ziarna pszenicy wykonano w Zakładzie Technologii Żywności SGGW w Warszawie. Ziarno pszenicy mielono młynem laboratoryjnym Quadrumat Senior. Zawartość białka określono pośrednio, oznaczając zawartość N metodą Kiejdahla i mnożąc wynik przez współczynnik 5,83. Zawartość i jakość glutenu mokrego w mące określono przy użyciu aparatu Glutomatic. Jakość ciasta oznaczono za pomocą Farinografu Brabendera. Wypieku laboratoryjnego dokonano według metody bezpośredniej.

3.4. WPŁYW NAWOŻENIA SIARKĄ NA ZDROWOTNOŚĆ RZEPAKU OZIMEGO

Praca IX przedstawia dalsze badania prowadzone w warunkach doświadczenia polowego, w którym uprawiano rzepak ozimy. Więcej informacji podano wcześniej przy omawianiu pracy VI i VII. W obu obiektach (+S i –S) stosowano zaprawia-

nie nasion preparatem Super Homai 70 DS. W obiektach kontrolnych, pozbawionych siarki nawozowej, stosowano nawozy NPK niezawierające siarki oraz trzykrotny oprysk roślin przeciwko szkodnikom, a w okresie wiosny dwukrotny oprysk fungicydem Horizon 250 EW. Natomiast w obiektach, w których stosowano nawozy siarkowe wykonano trzykrotną aplikację insektycydu (tj. $2 \times$ Bancol 50 WP i $1 \times$ preparat Bulldock 25 EC lub Fury 100 EW). Ponadto w pierwszym roku stosowano fungicyd Rovral Flo 255 SC lub Ronilan 500 SC, odpowiednio dla miejscowości Grabów i Baborówko, a w dwóch następnych jednokrotnie użyto preparatu Siarkol K 85 WP. Ocenę porażenia roślin przez grzyby chorobotwórcze prowadzono na obu wariantach nawożenia siarką. Wyniki przedstawiają stan zdrowotności 100 losowo wybranych roślin z każdego obiektu nawozowego. Obserwacje wykonywane były tuż przed zbiorem rzepaku, przez te same osoby wyspecjalizowane w ocenie stopnia porażenia roślin przez grzyby chorobotwórcze. Wyjątek stanowiła jesień 2000 roku, kiedy to rośliny zostały zaatakowane przez grzyb *Peronospora parasitica* i wtedy też wykonano ocenę porażenia rzepaku przez tego patogena.

4. WYNIKI BADAŃ

4.1. GOSPODARKA MINERALNA ROŚLIN

4.1.1 Zawartość składników pokarmowych

Analiza chemiczna roślin uprawianych w kontrolowanych warunkach doświadczenia wazonowego, w którym wprowadzono deficyt siarki wykazała zaburzenia ich gospodarki mineralnej w porównaniu z wynikami uzyskanymi dla roślin odpowiednio zaopatrzonych w ten składnik. Od wczesnych faz rozwojowych obserwowano znacznie wyższą zawartość azotu w liściach i łodygach pszenicy oraz rzepaku nienawożonych siarką w stosunku do wartości uzyskanych w obiektach, gdzie siarka była stosowana (tab. 1). Rośliny te charakteryzowały się ponadto zwiększoną koncentracją fosforu, potasu oraz wapnia i magnezu, a także bardzo niską zawartością siarki. Pomimo że wraz z rozwojem roślin zawartości tych składników ulegały zmniejszeniu, to jednak w każdej fazie były wyższe niż stwierdzane w roślinach prawidłowo zaopatrzonych w siarkę. Natomiast zastosowanie dolistnej aplikacji roztworu siarczanu magnezu w fazie tworzenia pąków kwiatowych istotnie obniżyło wielkość koncentracji omawianych makroelementów w organach rzepaku (tab. 2). Wprawdzie zawartość azotu, fosforu, potasu, wapnia i magnezu była nadal wyższa od zawartości tych składników w roślinach nawożonych siarką doglebowo, ale były to na ogół różnice nieistotne. Zastosowanie oprysku wpłynęło także na zwiększenie zawartości siarki w liściach, łodygach i korzeniach rzepaku, ale nie stwierdzono istotnych różnic w stosunku do organów roślin nawożonych siarką doglebowo. Natomiast mniej siarki, w porównaniu z nasionami rzepaku rosnącego w obiekcie kontrolnym, zawierały nasiona roślin, które dokarmiano dolistnie tym składnikiem.

Tabela 1

Zawartość składników pokarmowych w roślinach pszenicy (g S·kg⁻¹)
Concentration of nutrients in spring wheat plants (g S·kg⁻¹)

Wyszczególnienie; Description	Azot; Nitrogen		Fosfor; Phosphorus		Potas; Potassium		Siarka; Sulfur	
	ziarno; grain	słoma; straw	ziarno; grain	słoma; straw	ziarno; grain	słoma; straw	ziarno; grain	słoma; straw
Nawóz; Fertilizer:	33 BBA – strzelanie w źdźbło; shooting							
NH ₄ NO ₃ ¹⁾	- ²⁾	30,9b ³⁾	-	6,2b	-	25,2b	-	0,2a
CMSW	-	18,1a	-	4,5a	-	19,3a	-	2,1b
	65 BBA – kwitnienie; flowering							
NH ₄ NO ₃	-	22,3b	-	5,4b	-	19,7b	-	0,1a
CMSW	-	13,6a	-	3,3a	-	12,3a	-	1,3b
	92 BBA – dojrzałość pełna; full maturity							
NH ₄ NO ₃	26,3b	24,0b	4,4a	5,7b	5,9a	19,1b	0,3a	0,1a
CMSW	17,7a	4,1a	3,8a	1,9a	5,3a	12,0a	3,0b	1,3b

¹⁾ NH₄NO₃ – saletra amonowa; ammonium nitrate,

CMSW – czteromocznik siarczany wapnia; tetra urea calcium sulfate,

²⁾ “-” oznacza brak ziarna w tej fazie rozwoju; means lack of grain at that developmental phase,

³⁾ liczby w kolumnach oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie; numbers in columns marked with the same letters do not differ significantly

Tabela 2

Zawartość (g·kg⁻¹) i akumulacja (g·wazon⁻¹) składników pokarmowych w rzepaku ozimym
Concentration (g·kg⁻¹) and accumulation (g·pot⁻¹) of nutrients in oilseed rape

Nawożenie S; S fertilization	Liście + łodygi; Leaves + stems	Nasiona; Seeds	Łuszczyzny; Siliques	Korzenie; Roots	Łączne pobranie; Total uptake
azot; nitrogen – N					
Doglebowo; Soil	5,9a ¹⁾ /0,328 ²⁾ a	28,0a/1,251b	4,2a/0,165a	6,7a/0,152b	1,896c
Bez S; Without S	40,1c/0,892c	- ³⁾	-	30,3b/0,149b	1,041a
Dolistnie; Foliar	11,4b/0,431b	28,7a/0,937a	4,0a/0,126b	7,2a/0,084a	1,578b
siarka; sulfur – S					
Doglebowo; Soil	5,5b/0,306c	12,4b/0,546b	3,5a/0,133a	2,9b/0,066c	1,051c
Bez S; Without S	1,3a/0,028a	-	-	1,8a/0,006a	0,034a
Dolistnie; Foliar	6,0b/0,228b	8,1a/0,263a	4,3a/0,211b	3,2b/0,038b	0,740b
fosfor; phosphorus – P					
Doglebowo; Soil	0,7a/0,037a	6,5a/0,290a	1,0a/0,038a	1,3a/0,030a	0,395b
Bez S; Without S	6,4b/0,141c	-	-	7,7b/0,038b	0,179a
Dolistnie; Foliar	1,5a/0,057b	7,9a/0,257a	1,7b/0,053b	2,1a/0,024a	0,391b
potas; potassium – K					
Doglebowo; Soil	12,3a/0,689b	7,8a/0,350a	24,6a/0,952a	6,1a/0,138b	2,129b
Bez S; Without S	23,9b/0,529a	-	-	10,9b/0,056a	0,585a
Dolistnie; Foliar	20,4b/0,776b	9,3a/0,304a	30,6b/0,978a	11,0b/0,126b	2,184b

cd. tab. 2

Nawożenie S; S fertilization	Liście + łodygi; Leaves + stems	Nasiona; Seeds	Łuszczyzny; Siliques	Korzenie; Roots	Łączne pobranie; Total uptake
wapń; calcium – Ca					
Doglebowo; Soil	16,5a/0,924b	3,9a/0,175b	11,6a/0,449b	6,2a/0,140b	1,688c
Bez S; Without S	29,1b/0,646a	-	-	9,6b/0,051a	0,697a
Dolistnie; Foliar	18,1a/0,689a	4,1a/0,134a	11,4a/0,362a	6,6a/0,077a	1,262b
magnez; magnesium – Mg					
Doglebowo; Soil	0,8a/0,044a	2,6a/0,117a	0,3a/0,012a	1,1a/0,024b	0,197b
Bez S; Without S	6,6c/0,146b	-	-	2,5b/0,013a	0,159a
Dolistnie; Foliar	3,3b/0,124b	3,5a/0,113a	0,8b/0,024b	1,0a/0,012a	0,273c

¹⁾ liczby w kolumnach oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie; numbers in columns marked with the same letters do not differ significantly

²⁾ zawartość/akumulacja; concentration/accumulation

³⁾ “-” oznacza brak łuszczyzn z nasionami; means lack of siliques with seeds

Rzepak ozimy uprawiany w warunkach pola produkcyjnego również wykazywał reakcję na zastosowane nawożenie siarką poprzez zmianę zawartości siarki i azotu. Uprawa rzepaku na glebie deficytowej w siarkę prowadziła do znacznego wzrostu wartości stosunku N:S, natomiast zastosowanie siarki w nawożeniu tych roślin wpłynęło na znaczące obniżenie tego stosunku do wartości < 10.

4.1.2. Pobranie składników pokarmowych

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że zaopatrzenie roślin w siarkę wpływa na wielkość akumulacji składników pokarmowych w poszczególnych organach i w efekcie – w całych roślinach. Uwzględnienie siarki w nawożeniu roślin powodowało wzrost pobrania większości składników (tab. 2). Brak siarki w pożywce powodował większą akumulację azotu i fosforu w liściach oraz łodygach dojrzałych roślin w porównaniu z akumulacją w roślinach nawożonych siarką. Natomiast całkowite pobranie azotu i fosforu zawsze było większe w przypadku roślin nawożonych siarką, na co znaczny wpływ miała pula obu składników zgromadzona w nasionach. Zastosowanie aplikacji dolistnej na rośliny rzepaku w fazie pąkowania spowodowało wzrost akumulacji siarki i potasu oraz obniżenie akumulacji azotu i fosforu w liściach i łodygach w stosunku do wartości ich akumulacji w roślinach pozbawionych siarki nawozowej. W rezultacie rośliny dożywione siarką w trakcie wegetacji pobierały znacznie więcej badanych składników niż rośliny deficytowe w siarkę oraz zbliżone lub nieznacznie mniejsze ilości w porównaniu z roślinami nawożonymi siarką doglebowo.

Stosowanie siarki nawozowej w uprawie roślin zawsze powodowało wzrost koncentracji tego składnika w roślinach i zwiększenie jego pobrania w wytworzonym plonie. W przypadku doświadczeń polowych zawartość siarki w nasionach i słomie rzepaku nienawożonego tym składnikiem była daleka od wartości deficytowych, aczkolwiek była ona niższa od zawartości oznaczonej w roślinach nawożonych siar-

ką. W efekcie całkowita akumulacja siarki w roślinach pochodzących z obiektów nawożonych siarką była istotnie wyższa w porównaniu z wielkością pobrania S przez rośliny nienawożone tym składnikiem (tab. 2). Zarówno wartości koncentracji, jak też pobrania siarki wykazywały niewielkie różnice w miejscowościach i latach badań. Stwierdzono także wzrost akumulacji azotu, wapnia i potasu (zwłaszcza w roślinach dojrzałych). Pod wpływem stosowania siarki nie stwierdzono zmian w gospodarce magnezem oraz fosforem, za wyjątkiem nieco większego gromadzenia Mg w roślinach dojrzałych.

4.2. WZROST, ROZWÓJ I PLONOWANIE ROŚLIN

Objawy niedoboru siarki w uprawie rzepaku ozimego, rosnącego w wazonach, były obserwowane wiosną po zastosowaniu pierwszej dawki azotu, natomiast w przypadku rzepaku jarego – w fazie wykształcania trzeciej pary liści właściwych. Rośliny z deficytem siarki charakteryzowały się jasnozielonym zabarwieniem młodych i sztywnych liści oraz mniejszym tempem wzrostu i rozwoju roślin. Nawożenie azotem nasilało objawy niedoboru siarki, takie jak: skrócenie łodygi, antocyjanowe zabarwienie liści oraz wykształcanie krótkich kwiatostanów z nielicznymi pąkami kwiatowymi (fot. 1). W tym czasie rośliny nawożone siarką miały wykształcone wysokie łodygi, z licznymi, zielonymi liśćmi oraz licznymi pąkami kwiatowymi (fot. 2). Rośliny rzepaku nienawożone nawozami siarkowymi wyróżniały się słabo wybarwionymi i wykształconymi kwiatami, z których znaczna część opadała po kwitnieniu. Pozostałe kwiaty przekształcały się w krótkie i wygięte łuszczyzny, które nie zawiązywały nasion lub opadały przed okresem dojrzewania. W związku z tym w doświadczeniach wazonowych z rzepakiem nie uzyskano nasion w obiektach, w których nie stosowano nawozów siarkowych. Natomiast zastosowanie dolistnego oprysku siarczanem magnezu spowodowało w okresie 2 tygodni wyraźne zmiany w wyglądzie roślin rzepaku. Obserwowano wówczas zazielenienie się liści i zwiększenie ich elastyczności oraz wzrost wydłużeniowy łodygi i tworzenie pędów bocznych z licznymi pąkami kwiatowymi. W efekcie rośliny te zakwitły i zawiązały liczne łuszczyzny z nasionami, dzięki czemu wytworzyły około 73% plonu nasion w porównaniu z plonem rzepaku doglebowo nawożonego siarką. Bardzo ważnym skutkiem niedoboru siarki było zahamowanie wzrostu i rozwoju systemu korzeniowego rzepaku, który spełnia podstawową funkcję w zaopatrywaniu rośliny w wodę i składniki pokarmowe oraz zapobiega jej wyleganiu. Dolistna aplikacja siarki spowodowała uruchomienie procesów wzrostowych korzeni, dzięki czemu ich masa znacznie wzrosła.

Ścisłe doświadczenia wazonowe z rzepakiem ozimym wykazały, że dawka siarki nie musi być duża do zabezpieczenia prawidłowego wzrostu i rozwoju roślin oraz ich wysokiego plonowania. Okazuje się, że najniższa dawka 0,2 g S·wazon⁻¹ powodowała uzyskanie zadawalającego plonu nasion. Natomiast dawką optymalną było nawożenie w zakresie 0,4–0,6 g S·wazon⁻¹.



Fot. 1. Objawy niedoboru siarki na roślinach rzepaku ozimego (fot. A. Podleśna)
Symptoms of sulfur deficiency on winter oilseed rape plants (photo A. Podleśna)



Fot. 2. Zróżnicowanie wzrostu i rozwoju rzepaku ozimego w zależności od zaopatrzenia w siarkę
(fot. A. Podleśna)

Differentiation of growth and development of oilseed rape in dependence on sulfur supply
(photo A. Podleśna)

Objawy deficytu siarki w pszenicy ozimej uprawianej w wazonach Mitscherlicha wystąpiły w fazie drugiego kolanka i wyróżniały się jasnozielonym zabarwieniem liści oraz zahamowaniem wzrostu części nadziemnej roślin (fot. 3). Pszenica pozba-

wiona siarki pochodzącej z nawozów mineralnych słabiej plonowała, co wynikało przede wszystkim z mniejszej liczby pędów kłosowych oraz ziaren z rośliny. Należy podkreślić, że rośliny pozbawione siarki mineralnej wykazały znaczne zmniejszenie plonu ziarna z pędu głównego, a zwłaszcza z pędów bocznych, które w przypadku pszenicy nawożonej siarką miały decydujący wpływ na wysokość plonu. Przy niedoborze siarki w glebie ziarno pszenicy było słabiej wykształcone i charakteryzowało się mniejszą masą tysiąca ziaren.



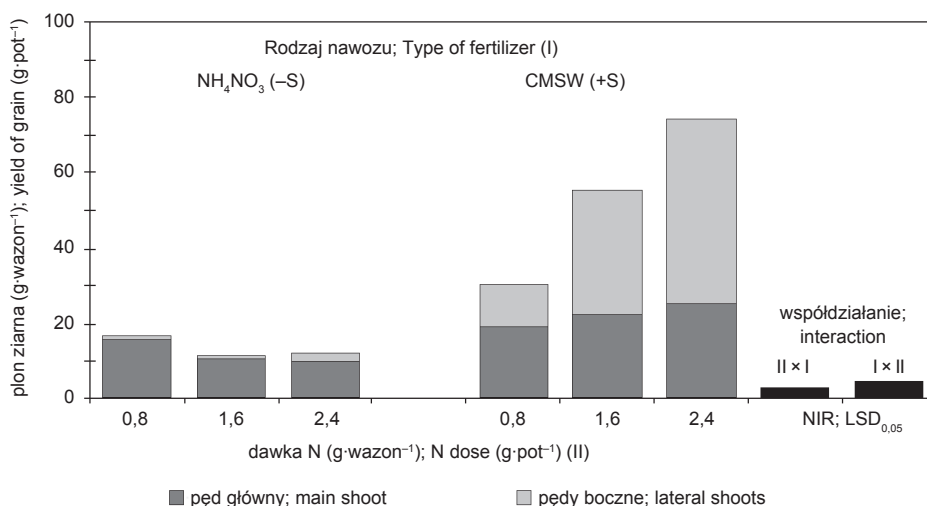
Fot. 3. Zróżnicowanie wzrostu i rozwoju pszenicy w zależności od zaopatrzenia w siarkę
(fot. A. Podleśna)

Differentiation of growth and development of wheat in dependence on sulfur supply
(photo A. Podleśna)

Doświadczenia polowe nie wykazały tak wyraźnego wpływu siarki na wzrost i rozwój roślin, jaki obserwowano w kontrolowanych warunkach doświadczeń wazonowych. Zastosowany w początku kwitnienia rzepaku test roślinny określający stan zaopatrzenia roślin w siarkę wskazał, że w obiektach, w których nie stosowano nawożenia siarką rośliny były niedostatecznie zaopatrzone w ten składnik (0,48–0,54% S), a w roślinach z pozostałych obiektów stwierdzono optymalną zawartość siarki (0,56–0,63% S). Natomiast rośliny z obiektów nawożonych siarką miały wysoką zawartość siarki w liściach (> 0,63% S). Stwierdzono, że zastosowany test wykazał duże zróżnicowanie w obrębie miejscowości i lat.

Efekt plonotwórczy siarki w warunkach doświadczenia polowego był mniejszy w porównaniu z doświadczeniami wazonowymi, ale w większości badań potwierdzony statystycznie. Dla przykładu średni przyrost plonów rzepaku uzyskany w RZD Grabów po zastosowaniu siarki wahał się od 0,15 do 0,81 t·ha⁻¹. Największe przyrosty plonu na ogół stwierdzano w obiektach nawożonych siarką i najwyższą dawką azotu. Wykazano także wpływ siarki nawozowej na masę tysiąca nasion rzepaku. Analiza plonu suchej masy rzepaku uprawianego w dwóch sezonach wegetacyjnych w SD Baborówko wykazała, że zastosowana siarka nawozowa miała mały wpływ na plon nasion. Nieznaczny przyrost suchej masy roślin nawożonych S stwierdzono od fazy końca kwitnienia i tendencja ta utrzymała się do końca wegetacji. Ostatecznie przyrost plonu nasion pod wpływem tego czynnika wyniósł 0,2 t·ha⁻¹.

Przeprowadzone doświadczenia polowe wykazały także pozytywny wpływ siarki nawozowej na plonowanie pszenicy ozimej (rys. 5). Przyrost plonu ziarna pszenicy ozimej po zastosowaniu tego składnika wyniósł od 0,13 do 0,27 t·ha⁻¹. Uzyskany wzrost plonu w obiektach, gdzie stosowano nawozy siarkowe wynikał na ogół z większej liczby ziaren w kłosie w porównaniu z obiektami bez siarki.



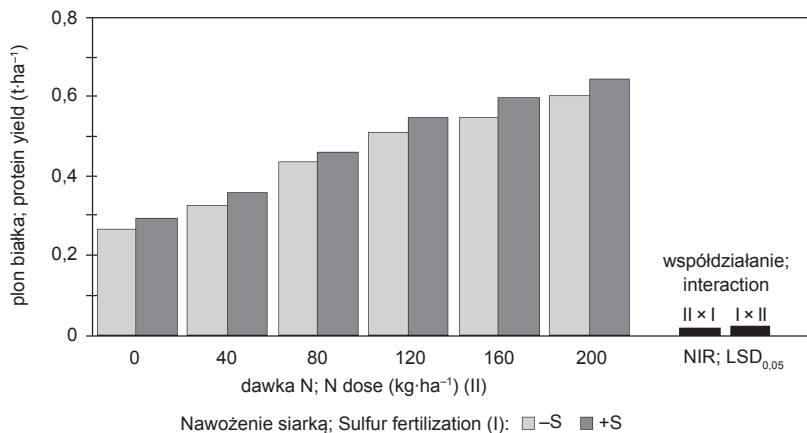
Rys. 5. Plon ziarna pszenicy ozimej w zależności od nawożenia azotem i siarką
Seed yield of winter wheat in dependence on fertilization with nitrogen and sulfur

4.3. PARAMETRY JAKOŚCIOWE NASION RZEPAKU I ZIARNA PSZENICY

Badania obejmowały dwie cechy jakościowe nasion rzepaku: zawartość tłuszczu i zawartość białka. Analiza nasion z trzyletnich zbiorów wykazała, że zastosowane nawożenie siarką miało niewielki wpływ na zawartość tłuszczu w nasionach populacyjnych odmian rzepaku ozimego (Kana i Lisek). Stwierdzona w niektórych latach wyższa zawartość oleju w nasionach roślin nawożonych siarką w porówna-

niu z roślinami nienawożonymi nie była istotna, podobnie jak w badaniach wazonowych z odmianą Kana. Wyraźniejsze różnice wystąpiły w doświadczeniu wazonowym z rzepakiem ozimym odmiany Bor i Liropa, w którym zwiększenie dawki siarki spowodowało znaczny wzrost koncentracji tłuszczu w nasionach. Wówczas przy najniższej dawce siarki ($0,21 \text{ g S} \cdot \text{wazon}^{-1}$) zawartość tłuszczu wynosiła 26,4 i 30,0%, a przy wyższych dawkach S ($0,42\text{--}1,05 \text{ g S} \cdot \text{wazon}^{-1}$) nawet 41,7–43,2% i 37,3–43,9%, odpowiednio dla odmiany Bor oraz Liropa. Stwierdzono, że plon tłuszczu wzrastał w obiektach nawożonych siarką, przy czym największy wpływ na tę cechę miało współdziałanie nawożenia siarki z azotem. Nawożenie azotem w dawce $160 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ stanowiło, na ogół, górną jego granicę, ponieważ dawka $200 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ już nie powodowała istotnego wzrostu plonu tłuszczu w nasionach rzepaku, bez względu na nawożenie siarką.

Przeprowadzone badania wazonowe i polowe potwierdziły niewielki wpływ siarki nawozowej na zawartość białka ogólnego w nasionach rzepaku. W nasionach uzyskanych z trzech kolejnych zbiorów roślin nawożonych siarką obserwowano wyższe wartości tej cechy w porównaniu z nasionami z roślin rosnących na obiekcie kontrolnym, jednakże tylko w roku 2001 były to różnice istotne. Zawartość białka wzrastała na ogół wraz ze wzrostem dawek azotu i obniżaniem się zawartości tłuszczu. Stwierdzono także niewielki ($\leq 10\%$) wzrost plonu białka w nasionach rzepaku, w stosunku do plonu uzyskanego z roślin, które nie były nawożone siarką (rys. 6).



Rys. 6. Plon białka rzepaku ozimego w zależności od nawożenia azotem i siarką
Protein yield of winter oilseed rape in dependence on fertilization with nitrogen and sulfur

Oprócz oceny plonowania oraz struktury plonu ziarno pszenicy jarej i ozimej poddano dodatkowo analizie jakościowej. Celem tych badań była ocena wpływu zastosowanego nawożenia siarką nawozową na parametry jakościowe ziarna, mąki a także wytworzonego ciasta i pieczywa. Nawożenie siarką wpływało na wzrost zawartości białka ogółem i glutenu w ziarnie pszenicy. Zastosowana siarka nawozowa nie miała wpływu na wyciąg mąki oraz na zawartość otrąb grubych i drobnych,

ale w obiektach +S zaobserwowano tendencję do redukcji popiołu w mące (tab. 3). Stwierdzono także wzrost współczynnika efektywności przemiału K.

Tabela 3

Wyniki przemiału laboratoryjnego w zależności od nawożenia siarką
Results of laboratory milling in dependence on sulfur fertilization

Nawożenie S; S fertilization	Wyciąg mąki; Yield of flour (%)	Otręby grube; Bran (%)	Otręby drobne; Shorts (%)	Współczynnik efektywności przemiału; Milling efficiency factor	Liczba popiołowa; Ash number
–S	78,7a*	15,4a	5,2a	138a	732a
+S	78,3a	15,6a	5,5a	153b	654b

* liczby w kolumnach oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie; numbers in columns marked with the same letters do not differ significantly

Nawożenie siarką nie wpływało na wodochłonność mąki uzyskanej z pszenicy ozimej, natomiast wydłużało nieznacznie czas rozwoju i stałości ciasta (tab. 4). Ciasto wytworzone z mąki ziarna pszenicy z obiektów +S wykazywało także istotny wzrost liczby jakości.

Pieczywo uzyskane z wypieku laboratoryjnego charakteryzowało się prawidłowym kształtem, smakiem i zapachem. Siarka zastosowana w nawozach mineralnych korzystnie wpływała na wzrost objętości pieczywa i porowatości mięksiszu. Nie miała natomiast wpływu na masę właściwą mięksiszu i wydajność pieczywa.

Tabela 4

Reologiczne cechy ciasta w zależności od nawożenia siarką
Rheological features of dough in dependence on S fertilization

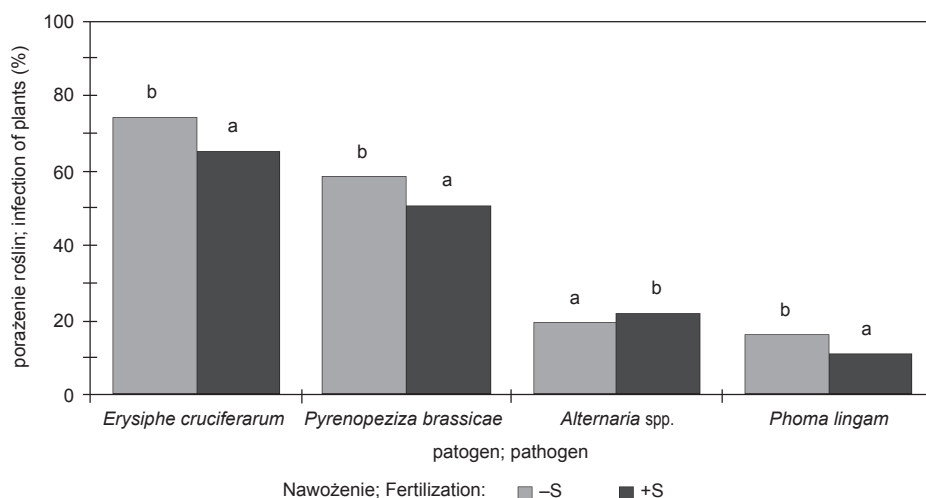
Nawożenie S; S fertilization	Wodochłonność mąki; Water absorption (%)	Rozwój ciasta; Dough development (min)	Staość ciasta; Dough stability (min)	Rozmięczenie ciasta po 10 min; Dough softening after 10 min	Liczba jakości; Quality number
–S	52,8a*	2,2a	2,6a	90b	37a
+S	51,9a	2,5b	2,9b	84a	45b

* liczby w kolumnach oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie; numbers in columns marked with the same letters do not differ significantly

4.4. ZDROWOTNOŚĆ ROŚLIN RZEPAKU OZIMEGO

W latach i miejscowościach objętych badaniami wystąpiły znaczne różnice w nasileniu chorób grzybowych rzepaku. Trzyletnie obserwacje potwierdziły, że w okresie wegetacji występuje zróżnicowane oddziaływanie nawożenia siarką na zdrowotność roślin. Jesienią 2000 r. stwierdzono, że w obiektach z siarką wystąpił

mniejszy udział procentowy roślin porażonych przez mącznika rzekomego wywołanego przez grzyb *Peronospora parasitica* niż w obiektach nienawożonych siarką. Obserwowano także mniejszy procent roślin porażonych przez suchą zgniliznę kapustnych powodowaną przez grzyb *Phoma lingam*, mączniaka prawdziwego powodowanego przez *Erysiphe cruciferarum* oraz zmniejszenie liczby roślin porażonych przez czerń krzyżowych wywołowaną przez *Alternaria* spp. (rys. 7). W pierwszym roku badań pojawiła się także jasna plamistość liści wywołwana przez grzyb *Pyrenopeziza brassicae*, której nasilenie było istotnie niższe na roślinach nawożonych siarką. W prowadzonych badaniach oceniono także stopień porażenia chorych roślin. W przypadku większości występujących chorób był on istotnie mniejszy w obiektach, w których stosowano siarkę w porównaniu ze stopniem porażenia chorych roślin w obiektach bez siarki.



Rys. 7. Porażenie roślin rzepaku przez patogeny grzybowe – Baborówko (2000)
Infection of oilseed rape plants by fungal pathogens – Baborówko (2000)

Jednakże prowadzone badania dały niejednoznaczne rezultaty. Wyniki trzyletnich obserwacji wskazują bowiem, że w obiektach z zastosowaniem siarki nawozowej stwierdzono przypadki wzrostu procentowej liczby oraz stopnia porażenia roślin. Dotyczy to głównie sezonu 1999/2000 w RZD Grabów, gdzie w obiektach z siarką obserwowano większy udział roślin porażonych przez suchą zgniliznę kapustnych i zgniliznę łodyg (tzw. verticilioza) oraz sezonu 2001/2002 w SD Baborówko, w którym na poletkach nawożonych siarką stwierdzono więcej roślin porażonych, a także większy stopień ich porażenia przez patogeny powodujące suchą zgniliznę kapustnych, czerń krzyżowych i szarą pleśń.

5. DYSKUSJA

5.1. WZROST I ROZWÓJ ROŚLIN W ZALEŻNOŚCI OD ZAOPATRZENIA W SIARKĘ

Jednym z głównych czynników limitującym w ostatnich latach produkcję roślinną wielu krajów świata jest narastający deficyt siarki. Wielu autorów donosi o negatywnym wpływie tego stresu żywieniowego na plonowanie roślin uprawnych (Janzen i Bettany 1984, Landry i in. 1991, Zhao i in. 1996, Schnug i in. 2003, Wielebski 2011). Doświadczenia własne autorki prowadzone w warunkach hali vegetacyjnej wykazały istotny wpływ tego składnika na wzrost, rozwój oraz plonowanie rzepaku ozimego i jarego oraz pszenicy ozimej. Rośliny uprawiane w wazonach zawierających glebę o niskiej zawartości siarki oraz nienawożone tym składnikiem wykazywały objawy niedoboru S już od wczesnych faz rozwojowych. Przede wszystkim u tych roślin obserwowano symptomy zmniejszonej zawartości chlorofilu, a także zmiany w budowie liści, zahamowanie wzrostu łodyg i wytwarzania pędów bocznych oraz mniejszy przyrost masy systemu korzeniowego. Lopes-Bucio i in. (2003) stwierdzili, że w warunkach deficytu siarczanych rośliny rzodkiewnika wytwarzały dużo krótkich korzeni bocznych usytuowanych blisko końca korzenia głównego. Natomiast u roślin dobrze zaopatrzonych w siarczany korzenie boczne były długie i rozmieszczone w pewnej odległości od końca korzenia głównego. Rośliny rzepaku z serii –S wytwarzały zmienione kwiatostany i w efekcie większość kwiatów oraz zawiązanych łuszczyń opadało przed dojrzewaniem. W rezultacie tych zmian rośliny nie wykształciły nasion i dały bardzo niski plon słomy. Rozszerzenie badań o wariant z uzupełniającym nawożeniem siarką w formie oprysku dolistnego wykazało bardzo sprawne pobieranie tego składnika przez liście, co miało decydujący wpływ na dalszy rozwój rzepaku i jego plonowanie. Z kolei pszenica jara uprawiana w wazonach pozbawionych siarki nawozowej nie wytwarzała praktycznie pędów bocznych kłosowych, a liczba ziarniaków była znacząco niższa oraz były one słabiej wypełnione w porównaniu z ziarniakami roślin z serii +S. W efekcie większy plon masy vegetatywnej i ziarna uzyskano z obiektu, gdzie stosowano małą dawkę N wraz z siarką niż w obiekcie z dużą dawką N, ale bez dodatku siarki nawozowej. Przedstawiony opis zmian we wzroście i rozwoju roślin deficytowych w siarkę znajduje potwierdzenie w pracach wielu innych autorów (Janzen i Bettany 1984, Landry i in. 1991, Zhao i in. 1996, Schnug i in. 2003). Odpowiada on trzeciej fazie reakcji roślin poddanych stresowi głodu siarkowego opisanej przez Hawkesforda i De Koka (2006). Objawia się ona jako zmiany procesów rozwojowych, czyli zmiana stosunku masy korzenia do masy pędu, indukcja starzenia się rośliny, a w końcu zahamowanie wzrostu pędu i systemu korzeniowego oraz przyspieszenie wytwarzania organów generatywnych w celu zabezpieczenia źródła siarki do wytworzenia żywotnych nasion. Jednym z wizualnych objawów niedoboru siarki jest chloroza pojawiająca się na młodych liściach, które produkują niewystarczającą ilość chlorofilu i lipidów,

w efekcie czego następuje obniżenie aktywności fotosyntetycznej roślin i ich metabolizmu. Dokładny opis symptomów deficytu siarki w roślinach uprawnych przedstawia Klikocka (2005a). Według Blake-Kalff i in. (1998), rozwijające się liście pierwsze uwiadcniają symptomy niedoboru S, a spadek zawartości lipidów w roślinach deficytowych w siarkę potwierdzają badania Nikiforovej i in. (2005). Zmniejszenie zawartości chlorofilu jest wynikiem jego rozpadu w młodych liściach roślin nawożonych wysoką dawką N, ale pozbawionych siarki (Blake-Kalff i in. 1998) lub zmniejszonej produkcji tego barwnika w chloroplastach (Baszynski i in. 1972, Lencioni i in. 1997). Dzieje się tak w roślinach deficytowych w siarkę, w których nie tworzą się aminokwasy siarkowe. Przypuszcza się, że jest to spowodowane brakiem metioniny i jej pochodnej *S*-adenosulmetioniny (SAM), która jest kluczowym substratem dla wielu związków, w tym do produkcji chlorofilu (Roje 2006). Jak podaje Nikiforova i in. (2005), lipidy i chlorofile są grupą metabolitów, których koncentracja obniża się w warunkach deficytu siarki. Lipidy roślinne (galaktolipidy, sulfolipidy) spełniają znaczącą rolę w metabolizmie roślin (Nikiforova i in. 2005, Hölzl i in. 2009), ponieważ nie tylko tworzą warstwę lipidową, na której są osadzone kompleksy fotosyntetyczne, ale także stwierdza się je w strukturach PS I i PS II, kompleksie II (LHC II) i w cytochromie b_6 (Holzl i in. 2009). Lipidy te odgrywają decydującą rolę w reakcjach świetlnych fotosyntezy. Z przedstawionych zależności wynika, że deficyt siarki oddziałuje na znaczne zmniejszenie aktywności fotosyntetycznej roślin, co potwierdzają badania Herath i Ormrod (1973) oraz Podleśnej i Kocoń (2006). Zdaniem Lencioniego i in. (1997), rośliny pozostające przez długi okres w warunkach niedoboru siarki obniżają aktywność fotosyntetyczną i dostosowują metabolizm S, aby utrzymać syntezę białka i glutationu, dzięki czemu roślina utrzymuje wzrost i rozwój. Związki te są niezbędne do funkcjonowania rośliny, ale ich zawartość znacząco maleje w roślinach deficytowych w siarkę (Zhao i in. 1996). W oparciu o badania własne można stwierdzić, że niewielka dostępność siarki dla roślin (mała zawartość w powietrzu i gleba uboga w siarkę) prowadzi do spadku plonowania roślin (warunki polowe), a w warunkach drastycznego ograniczenia dochodzi do całkowitego braku nasion (doświadczenia wazonowe). Autorka zastosowała w trakcie wegetacji rzepaku deficytowego w siarkę oprysk roztworem siarczanu magnezu, co spowodowało zmiany we wzroście i rozwoju roślin. Panak i Szafranek (1967) oraz Zhao i in. (2001) przeprowadzili doświadczenia z zastosowaniem siarki znakowanej izotopami ^{35}S i ^{34}S , w których stwierdzili, że przy dolistnym systemie odżywiania roślin siarką składnik ten przemieszczał się sprawnie do łodyg, korzeni i młodych liści. Natomiast jego obecność w starych liściach została tylko zaznaczona. W miarę wydłużania czasu ekspozycji koncentracja siarki we wszystkich częściach roślin wzrastała. Z kolei Janzen i Bettany (1984) wykazali, że większość siarki pobranej przez rośliny w późniejszym czasie wegetacji akumulowało się w liściach. Również Landry i in. (1991) potwierdzają w badaniach, że dolistna aplikacja siarki roślinom z deficytem tego składnika zwiększyła wielkość i czas trwania jej pobierania, a także spowodowała zmiany w metabolizmie siarki i azotu. W wyniku tego zabiegu nieko-

rzystny przebieg tych procesów wywołany deficytem S został znacząco złagodzony. Od dostępności siarki zależy bowiem efektywność wykorzystania azotu, ponieważ fotosynteza, wzrost i akumulacja suchej masy w roślinie są regulowane zarówno przez azot, jak i siarkę (Kopriva i in. 2002). Dodatkowo po zastosowaniu dolistnego oprysku siarką elementarną stwierdzono w roślinach m.in. wzrost zawartości $S-SO_4^{2-}$, aminokwasów siarkowych i glutationu. Działanie glutationu jest w roślinach szerokie, ale w tym miejscu warto wspomnieć, że jego niedobór hamuje transport auksyn, co powoduje redukcję wzrostu korzeni (Koprivova i in. 2010). Zatem w sytuacji zwiększenia zawartości tego metabolitu następuje uruchomienie wzrostu korzeni, co wykazano pośrednio w doświadczeniu autorki, a co wpływa na sprawne zaopatrzenie roślin w wodę i składniki pokarmowe. Następną ważną rolą glutationu jest jego udział w tworzeniu plonu, co pozostaje zawsze głównym celem wzrostu i rozwoju rośliny. Zechmann i in. (2011) stwierdzili, że synteza glutationu jest niezbędna do kiełkowania pyłku *in vitro*. Natomiast niski jego poziom w roślinie obniża zdolność do kiełkowania, na skutek zakłóceń w czasie rozwoju pyłku, które mogą być skorelowane z zaburzeniami w metabolizmie auksyn. Dodatkowo stwierdzono, że liście roślin wykazujących niedobór siarki zawierają mniej białka i kwasów nukleinowych, które są aktywnie syntezowane po przemieszczeniu roślin do pożywki zawierającej siarkę (Dietz 1989). Tak więc, dzięki dostarczeniu roślinom siarki, następuje uruchomienie właściwych szlaków metabolicznych, co obserwuje się jako zmianę zabarwienia liści, przywrócenie ich elastyczności, uruchomienie wzrostu łodygi i pędów bocznych, a także wytworzenie przez rośliny pąków kwiatowych, prawidłowych kwiatów i w etapie końcowym wegetacji – zawiązanie łuszczyń z nasionami. Zabieg dolistnego nawożenia rzepaku siarką pozwolił na uzyskanie ponad 70% plonu nasion w stosunku do roślin nawożonych S doglebowo, podczas gdy rośliny utrzymane do końca wegetacji w warunkach deficytu siarki wykazały całkowity brak wykształconych nasion. Janzen i Bettany (1984) uważają, że zastosowanie S po fazie rozety, w warunkach poważnego deficytu tego składnika, nie pozwala na uzyskanie maksymalnego plonu nasion ze względu na ogromne ilości siarki nawozowej unieruchomionej w liściach. Jak wykazały badania autorki, silny deficyt siarki często prowadzi do opadania kwiatów i zawiązanych łuszczyń, co wpływa na znaczną obniżkę plonu roślin, o czym informują także Fismes i in. (2000) oraz McGrath i Zhao (1996). Wymienieni autorzy uważają, że nietypowo zbudowane kwiaty oraz aborcja lub brak łuszczyń u rzepaku z deficytem siarki są spowodowane przez zaburzony w tych warunkach metabolizm azotu, a szczególnie przez niebilansowany stosunek N:S. Przy braku siarki wartości stosunku N:S stają się niespotykane duże w porównaniu z roślinami nawożonymi siarką.

W warunkach doświadczenia wazonowego rośliny rzepaku wykazujące deficyt siarki nie wykształciły nasion, a u pszenicy stwierdzono znaczną redukcję plonu ziarna. Natomiast w warunkach pola nie spotyka się tak drastycznych sytuacji i bez względu na skalę pojawiających się niedoborów S rośliny wydają plon. Uprawiane rośliny także różnie reagują na nawożenie siarką. W doświadczeniu autorki pro-

wadzonym w RZD Grabów stwierdzono istotny przyrost plonu rzepaku w obiektach +S w dwóch latach badań (1999 i 2000 r.), natomiast w SD Baborówko tylko w roku 2000. Reakcja rzepaku na nawożenie siarką mogła zależeć od zasobności gleby w ten składnik, ponieważ w roślinach uprawianych w SD Baborówko stwierdzono bardzo wysoką zawartość siarki, znacznie wyższą niż w roślinach z obiektu +S uprawianych w RZD Grabów. Wielebski (2008) także zaobserwował istotny wzrost plonu nasion pod wpływem nawożenia siarką w warunkach niedostatecznego zaopatrzenia roślin w ten składnik. W takich warunkach najkorzystniejsze okazało się zastosowanie 10–20 kg S·ha⁻¹. W 8 doświadczeniach tego autora uzyskano istotny przyrost, a w 3 doświadczeniach otrzymano niewielki spadek plonu nasion rzepaku. Z kolei Jakubus i Toboła (2005) stwierdzili, że nawozy zawierające siarkę nie spowodowały istotnego przyrostu plonu nasion rzepaku ozimego. W doświadczeniu Malarza i in. (2011a i 2011b) zaobserwowano natomiast, że nawozy siarkowe, bez względu na ich rodzaj, powodowały, w porównaniu z kontrolą, zwiększenie plonu wynikające z istotnego wzrostu wartości elementów jego struktury, czyli liczby łuszczyń na roślinie i nasion w łuszczyńce oraz masy nasion w łuszczyńce. Istotny wzrost plonu rzepaku jarego po zastosowaniu nawożenia siarką stwierdziła także Figas (2009). Wielebski (2011) podjął badania nad nawożeniem siarką rzepaku ozimego w warunkach pojawiających się niedoborów siarki wczesną wiosną i stwierdził, że nawożenie to istotnie zwiększyło plon nasion. Wówczas najbardziej efektywne plonotwórczo było zastosowanie 15 kg S·ha⁻¹.

Doświadczenia z pszenicą przeprowadzone przez autorkę wykazały wzrost plonu ziarna pod wpływem nawożenia siarką podobnie jak w badaniach Lepiarczyka i Filipek-Mazur (2010). Autorzy ci stwierdzili, że dawka 36 kg S·ha⁻¹ powodowała korzystniejsze efekty produkcyjne w uprawie pszenicy ozimej niż dawka 27 kg S·ha⁻¹. Również Gondek i Gondek (2010) stwierdzili przyrost plonu ziarna pszenicy jarej w wyniku nawożenia siarką. Korzystne plonotwórczo działanie siarki nawozowej zaobserwowano w przypadku wszystkich rodzajów stosowanych nawozów. Pozytywne oddziaływanie siarki nawozowej na wzrost plonu ziarna pszenicy w warunkach doświadczenia wazonowego i polowego wykazali także Inal i in. (2003).

Objawy deficytu siarki na roślinach rosnących w warunkach pola nie są tak silne jak obserwowane w doświadczeniach wazonowych, ze względu na większe możliwości wzrostu korzeni, które znajdują siarkę w głębszych warstwach gleby oraz wodach glebowych (Janzen i Bettany 1984, McGrath i in. 2003, Igras 2004, Klikocka 2005c). Czasem w płodozmianie są uwzględniane nawozy naturalne (obornik) lub pozostawiana jest słoma, co także wzbogaca glebę w siarkę dostępną dla roślin (Siuta 1999, Rutkowska i in. 2009).

Należy dodać, iż rośliny rzepaku wykazywały znacznie większe negatywne zmiany, wynikające z deficytu siarki, w porównaniu z pszenicą jarą. Jest to związane z dużą wrażliwością roślin krzyżowych na poziom dostępności siarki i większymi potrzebami tej grupy roślin względem nawożenia tym pierwiastkiem. McGrath i Zhao (1996) uważają nawet, że rzepak jest rośliną nieefektywną względem siarki, bowiem wskaźnik wykorzystania siarki (SUE) wynosi 8%, co klasyfikowane jest

jako wykorzystanie niskie (Fismes i in. 2000). Świadczy o tym mała ilość S w glukozynolanach organów wegetatywnych w warunkach obfitego zaopatrzenia w ten składnik. Dodatkowo stwierdzono nieefektywne przenoszenie jonów SO_4^{2-} z ksylemu do floemu ze względu na wysoką ich akumulację w wakuolach dojrzałych liści w porównaniu z liśćmi młodszymi (Blake-Kalff i in. 1998). Zdaniem tych autorów rzepak jest rośliną o „wrodzonym” (sobie właściwym) nieefektywnym wykorzystaniu wewnętrznym azotu i siarki.

5.2. WPLYW NAWOŻENIA SIARKĄ NA GOSPODARKE MINERALNĄ ROŚLIN UPRAWNYCH

Składniki pokarmowe pobierane z gleby zostają wbudowane w różne związki, które spełniają ważne funkcje strukturalne i fizjologiczne w roślinie. Spośród tych składników podstawową rolę spełniają makroelementy (N, P, K, S, Mg i Ca). Ich zawartość w tkankach roślin jest zróżnicowana i zależy między innymi od gatunku i wieku rośliny, przebiegu warunków meteorologicznych, zasobności gleby oraz poziomu zaopatrzenia w inne składniki. Jednakże zarówno niedobór, jak i nadmiar któregoś z tych składników powoduje zaburzenia homeostazy, co prowadzi do zmian w metabolizmie rośliny. W ostatnich latach pojawiają się informacje o niedoborach siarki w glebach uprawnych wielu krajów świata, w tym także Polski, które negatywnie wpływają na plony roślin uprawnych i ich jakość (Podleśna 2005). Podjęta próba wyjaśnienia tego zjawiska w warunkach doświadczenia wazonowego wskazuje, że rośliny rzepaku i pszenicy pochodzące z obiektów deficytowych w siarkę (–S) wykazywały w części wegetatywnej zawyżoną w stosunku do roślin nawożonych siarką (+S) koncentrację fosforu, potasu, wapnia i magnezu oraz szczególnie wysoką zawartość azotu. W roślinach tych stwierdzono także wyjątkowo niską koncentrację siarki. Wyniki uzyskane przez autorkę świadczą o zaburzonej gospodarce mineralnej tych roślin spowodowanej niedoborem siarki w środowisku wzrostu roślin (w glebie). Musiały zaistnieć procesy, które spowodowały transport jonów azotu, fosforu, potasu, wapnia i magnezu z gleby, prowadząc do wysokiej ich koncentracji w tkankach roślin. Należy zaznaczyć, iż zawartość badanych składników wyszczególnionych w pracach autorki różniła się znacznie od wartości średnich przyjętych dla faz rozwojowych pszenicy i rzepaku (Chojnacki i Boguszewski 1971, Lityński i Jurkowska 1982, Nowak i Zbroszczyk 2003). Podobny wzrost zawartości tych makroelementów w rzepaku uzyskali Hřivna i in. (2002), zwłaszcza w obiektach z wysoką dawką azotu i brakiem nawożenia siarką. Uprawa kapusty polnej w warunkach deficytu siarki także powodowała wzrost koncentracji azotu, fosforu, potasu i magnezu w pędach tych roślin (Hu i in. 2011). Natomiast poziom nawożenia siarką nie zmieniał zawartości siarki i wapnia w badanych roślinach, co jest sprzeczne z wynikami Podleśnej (2004), która w doświadczeniu polowym z rzepakiem ozimym wykazała wzrost zawartości N, S, Ca i Mg w roślinach po zastosowaniu nawozów siarkowych. Wang i in. (2001) wykazali, że żywienie roślin

N, P i K jest powiązane, a obniżenie zawartości P lub K po ich zabraniu z pożywki jest sygnałem do potrojenia wzrostu ekspresji genów transporterów. To wskazuje, że rośliny reagują bardzo szybko na brak składnika w pożywce. Ponadto wzrasta prawdopodobieństwo, że, dzięki obecnie niewyjaśnionemu mechanizmowi, korzenie mogą być zdolne do „czucia” zmian w dostępności składników mineralnych w podłożu.

Abdallah i in. (2010) wykazali, że deficyt siarki nie wpłynął na szybkość i wielkość pobrania azotu oraz nie spowodował spadku masy całej rośliny rzepaku. Natomiast Prosser i in. (2001) stwierdzili, że w roślinach pozbawionych siarczanów następuje zaburzenie metabolizmu azotowego i zmiana transportu azotanów. W młodych liściach następuje wówczas gwałtowny wzrost akumulacji NO_3^- i w tym samym czasie zaczyna się produkcja argininy oraz glutaminy, co zdaniem tych autorów świadczy o zaburzonej syntezie i wykorzystaniu aminokwasów. Wyniki wielu innych badaczy potwierdzają, że po zastosowaniu pożywki pozbawionej siarki w roślinach następuje zwiększona produkcja innych związków azotowych, jak: amidy, azotany (III), aminokwasy (Steward i Porter 1969) oraz arginina (Dietz 1989), puryna, pirymidyna i putrescyna (Ohkama-Ohtsu i Wasaki 2010). Ruiz i in. (2005) stwierdzili w liściach fasoli z deficytem siarki znaczną akumulację NO_3^- , co tłumaczone jest hamowaniem w tych warunkach aktywności reduktazy azotanowej. Przedstawione dane wskazują na zaburzone wykorzystanie azotu w tworzeniu aminokwasów, które są niezbędne do syntezy białka, ponieważ aminokwasy i białka zawierają podstawowe związki azotowe powstające w procesie asymilacji NO_3^- .

Badania Klikockiej (2011) wskazały, że w bulwach ziemniaka nienawożonych siarką oznaczono najwyższe wartości koncentracji oraz pobrania Zn i Mn. Z kolei Shinmachi i in. (2010) obserwowali, że zawartość S w młodych liściach i pędach roślin pszenicy z serii +S była nieco wyższa niż z serii –S aż do 4 tygodni po kwitnieniu, a w dojrzewających roślinach z serii nawożonej S jej zawartość uległa znacznemu obniżeniu. Korzenie młodych roślin miały początkowo podobną zawartość siarki bez względu na nawożenie, ale po fazie strzelania w źdźbło jej zawartość wzrosła w roślinach nawożonych siarką, a w roślinach nienawożonych uległa zmniejszeniu. Natomiast wyższą zawartość selenu w organach wegetatywnych i ziarnie pszenicy stwierdzono w obiektach –S w porównaniu z koncentracją w roślinach nawożonych siarką, a w korzeniach zawartość Se nie różniła się w zależności od dostępu siarki. Rośliny nienawożone siarką (–S) wykazywały także wyższą zawartość Mo w kłosach i ziarnie pszenicy w porównaniu z roślinami z obiektu +S. Autorzy uważają, że w warunkach zmniejszonego dopływu siarki (brak nawożenia S) można spodziewać się zwiększonego pobrania Se i Mo, ponieważ niska zawartość siarczanów w glebie sprzyja pobieraniu innych anionów. Dodatkowo jest dobrze udokumentowane, że ekspresja wielu transporterów siarczanów zwiększa się w wyniku ograniczenia dostępności S, zwłaszcza gdy jest to zbieżne z redukcją zapasów siarczanów w tkance. Obniżenie zawartości siarczanów w tkankach powoduje w nich indukcję transporterów siarczanów. Zda-

niem Shinmachi i in. (2010), jest prawdopodobne, że konkurencja między jonami o transportery skutkuje obserwowanym wzrostem pobrania Se i Mo w roślinach z obiektu –S w porównaniu z obiektem +S. Zwiększona ekspresja genów (Sultr 1;1 i Sultr 4;1) odpowiedzialnych za transport siarczanów w roślinach z obiektów –S wyjaśnia znaczną akumulację Se i Mo w porównaniu z akumulacją w roślinach z obiektów +S. Zwłaszcza że dowiedziono, iż zarówno seleniany, jak i molibdeniany są przenoszone przez transportery siarczanowe (Shibagaki i in. 2002). Zdaniem Clarksona i Hawkesforda (1993), wiele roślin precyzyjnie reguluje szybkość pobierania składnika pokarmowego, przez co proces ten jest zharmonizowany ze wzrostem rośliny. Jednakże, jeśli roślina zaczyna rosnąć szybciej lub doświadcza zewnętrznego deficytu jakiegoś składnika, zapotrzebowanie na niego wzrasta. Wówczas ekspresja i aktywność transporterów membranowych może się zwiększać lub zmniejszać w zależności od równowagi pomiędzy zaopatrzeniem a zapotrzebowaniem rośliny na dany składnik. Jednakże, kiedy rośliny są odpowiednio zaopatrzone w główne składniki pokarmowe, proces ich transportu jest osłabiany do tego stopnia, że ekspresji podlega tylko mała frakcja potencjału transportowego.

Autorka nie spotkała w literaturze przedmiotu prac omawiających inicjowanie i przebieg transportu innych składników pokarmowych w warunkach niedoboru siarki w glebie.

W badaniach własnych wykazano, że dodanie siarki w oprysku dolistnym roślinom uprawianym bez nawożenia tym składnikiem miało decydujący wpływ na zmianę ich gospodarki mineralnej. Zaobserwowano wówczas istotne obniżenie zawartości azotu, fosforu, wapnia i magnezu, a wzrost koncentracji siarki w porównaniu z zawartością tych składników w słomie roślin pozbawionych siarki nawozowej. W rezultacie wartości te nie różniły się istotnie od średnich zawartości stwierdzonych w roślinach nawożonych siarką dogłębowo. Wcześniej wspomniane uruchomienie wzrostu i rozwoju roślin przez dolistną aplikację siarczanu magnezu pobudziło ich zapotrzebowanie na składniki pokarmowe zgromadzone w nadmiarze w tkankach oraz zaktywizowało ich pobieranie z gleby. W efekcie tych zmian zawartość większości składników w roślinach uległa zmniejszeniu, wzrosła natomiast koncentracja siarki. Ostatecznie w roślinach rzepaku stwierdzono istotny wzrost akumulacji badanych składników, w czym zdecydowany udział miały wytworzone nasiona. Ta tendencja jest zgodna z wynikami badań Skwierawskiej i in. (2008), którzy wykazali, że optymalna dawka S wpływa na obniżenie zawartości oraz wzrost akumulacji w roślinach N, P, K i S. Wyniki uzyskane przez autorkę monografii potwierdzają skuteczne pobieranie przez rośliny siarki aplikowanej dolistnie i włączanie jej w procesy metaboliczne, co wcześniej ustalono w badaniach z siarką znaczoną izotopem ³⁵S (Panak i Szafrank 1967).

Rośliny nawożone siarką miały także właściwy stosunek N:S, który w fazie pąkowania rzepaku jarego zebranego z obiektu +S wynosił 5,8, a w roślinach pozbawionych siarki miał wartość 124. W doświadczeniu z pszenicą ozimą zaobserwowano, że w części wegetatywnej (słomie) roślin z serii –S stosunek N:S ulegał

rozszerzeniu wraz z postępem wegetacji i wynosił 154:1, 223:1 oraz 240:1, odpowiednio dla faz: strzelanie w źdźbło, kwitnienie i dojrzałość pełna. Prawdopodobnie wynikało to z dysproporcji pomiędzy utrzymującą się bardzo wysoką zawartością azotu (dostępnego w glebie) a zmniejszającą się zawartością siarki w roślinach (brak w glebie), które jednak nieco zwiększały swoją masę. Natomiast w ziarnie pszenicy stosunek ten wynosił 87,8 oraz 5,9, odpowiednio dla roślin pozbawionych siarki i nawożonych tym składnikiem. Podobny wpływ siarki na stosunek N:S stwierdzili także Hřivná i in. (2002). Zdaniem Goodroad i in. (1989), wartość stosunku N:S większa od 22 w roślinach pszenicy ozimej zawsze jest związana z redukcją ich wzrostu. Z kolei Dietz (1989) uważa, że kiedy warunki żywieniowe powodują brak zbilansowania pomiędzy N i S, a wartość stosunku N:S jest większa niż 30, synteza białka jest dostosowana do zaopatrzenia w siarkę i następuje akumulacja rozpuszczalnych związków azotowych (azotyny, asparagina i arginina), a rozpuszczalne związki siarkowe nie są akumulowane w roślinie.

5.3. ROLA SIARKI W KSZTAŁTOWANIU CECH JAKOŚCIOWYCH ZIARNA PSZENICY

W skupie zbóż konsumpcyjnych stosuje się dwie grupy wyróżników jakościowych: pierwszy z nich informuje o trwałości przechowalniczej ziarna, jego zdrowotności oraz przydatności do wykorzystania w przetwórstwie, a drugi charakteryzuje wartość technologiczną ziarna. Na wartość wyróżników pierwszej grupy można wpływać poprzez stosowanie odpowiednich zabiegów konserwujących (suszenie, czyszczenie ziarna), natomiast druga grupa wyróżników jakościowych jest związana z cechami genetycznymi odmiany oraz warunkami klimatyczno-uprawowymi podczas wegetacji roślin. W związku z tym możliwość polepszenia tych cech ziarna poprzez stosowanie odpowiednich zabiegów technologicznych wydaje się być stosunkowo niewielka (Cacak-Pietrzak i in. 1999, Markowski 2006). Jednakże znany jest pozytywny wpływ nawożenia azotem na cechy jakościowe zbóż (Achremowicz i in. 1995, Cacak-Pietrzak i in. 1999, Podolska i Sułek 2002). Z kolei niedobory siarki, które pojawiły się w końcu ubiegłego wieku w krajach europejskich spowodowały niekorzystne zmiany w jakości technologicznej pszenicy (Castle i Randall 1987, Zhao i in. 1999). Stało się jasne, że aby utrzymać wymaganą jakość ziarna pszenicy, potrzebne jest stosowanie siarki w jej uprawie. Badania podjęte przez autorkę wykazały zróżnicowany wpływ nawożenia siarką na cechy jakościowe ziarna pszenicy jarej i ozimej uprawianych w warunkach pola doświadczalnego (Podleśna i in. 2003, Podleśna i Cacak-Pietrzak 2006). W pracy VIII załączonej do monografii (Podleśna i Cacak-Pietrzak 2008) wykazano, że nawożenie siarką spowodowało wzrost zawartości białka w ziarnie. W doświadczeniu Thomason i in. (2007) samo nawożenie siarką nie wpłynęło na istotną zmianę zawartości białka w ziarnie pszenicy, ale udało się to osiągnąć w wariancie z siarką i późną aplikacją azotu. W doświadczeniu własnym ziarno pszenicy nawożonej siarką miało wyższą zawar-

tość glutenu w porównaniu z obiektem –S. Järvan i in. (2008) wykazali, że działanie siarki nawozowej na zawartość glutenu w ziarnie pszenicy nie było jednokierunkowe (tzn. nie zawsze powodowało wzrost glutenu), ale we wszystkich doświadczeniach stwierdzili korzystny, z jakościowego punktu widzenia, wzrost indeksu glutenu.

Mąka jest głównym składnikiem pieczywa, co powoduje, że jej jakość ma decydujący wpływ na uzyskany produkt (Sobczyk i in. 2010). Wyciąg mąki z ziarna pszenicy ozimej nie zależał od nawożenia siarką. Również zawartość otrąb grubych i drobnych nie zmieniła się pod wpływem zastosowanej siarki podobnie jak w przypadku mąki uzyskanej z pszenicy jarej (Podleśna i Cacak-Pietrzak 2006). Nawożenie S wpłynęło na istoty wzrost współczynnika efektywności przemiału, natomiast w przypadku cytowanej wcześniej pszenicy jarej siarka nawozowa nie wpłynęła na wielkość tego współczynnika. Sitkowski (1994) uważa, że wysoka wartość współczynnika efektywności przemiału i niska liczby popiołowej wskazują na możliwość uzyskania dużego wyciągu mąki jasnej, ale w doświadczeniu własnym autorki taka zależność nie wystąpiła.

Zastosowane nawożenie siarką nie miało wpływu na wodochłonność mąki, ale korzystnie oddziaływało na cechy ciasta, takie jak: wydłużenie czasu rozwoju i stałości oraz obniżenie wartości rozmięczenia i wzrost liczby jakości. Natomiast Järvan i in. (2008) stwierdzili obniżenie wodochłonności mąki z pszenicy nawożonej siarką, a Thomason i in. (2007) uzyskali wzrost tej cechy tylko w niektórych latach i u niektórych odmian. Wodochłonność określana jako zdolność mąki do wiązania wody (przez gluten), przy zachowaniu optymalnej konsystencji ciasta, jest bardzo istotna przy tworzeniu struktury ciasta. Jest to jedna z najważniejszych cech ciasta, szczególnie z punktu widzenia opłacalności produkcji (Sobczyk i in. 2010). Zależy ona przede wszystkim od ilości i jakości substancji białkowych odpowiedzialnych za tworzenie siatki glutenowej, skrobi i granulacji mąki (Piesiewicz i in. 1998). Gluten formuje się głównie z połączenia dwóch białek –gliadyny i gluteniny, które w zetknięciu z wodą silnie ją chłoną i pęcznieją (Biller i Wierzbicka 2003). Gluten mocny chłonie wielokrotnie więcej wody niż słaby. Im więcej w glutenie jest gluteniny, tym ma on większe możliwości wodochłonne – jest bardziej elastyczny i wykazuje większy opór przy rozciąganiu. Jakubauskiene i Juodeikiene (2005) stwierdziły, że pomiędzy zawartością glutenu a objętością pochłoniętej wody występuje silna pozytywna korelacja ($r = 0,87$). Różyło i Laskowski (2007) wykazali, że wodochłonność była liniowo zależna od zawartości glutenu i białka, liczby opadania i wskaźnika sedymentacyjnego Zeleny'ego. Wodochłonność mąki uzyskanej z pszenicy ozimej można określić jako wodochłonność średnią, co mogło mieć związek ze średnią zawartością i jakością białka (Sobczyk i in. 2007). Zastosowanie siarki wpłynęło na wydłużenie czasu rozwoju i stałości ciasta z mąki pszenicy ozimej, ale nadal były to wartości średnie, które świadczą o przeciętnej tolerancji na mieszenie. Natomiast w przypadku pszenicy jarej suma tych czasów wynosiła 11,4, co wskazuje na dużą tolerancję mąki na mieszenie i świadczy o dobrych właściwościach lepko-sprężystych ciasta (Podleśna i Cacak-

-Pietrzak 2006). W efekcie z mąki pszenicy jarej uzyskano pieczywo o większej objętości w porównaniu z pieczywem z mąki pszenicy ozimej. Nawożenie pszenicy siarką spowodowało istotny wzrost objętości pieczywa, co uzyskali także Järvan i in. (2008), stosując dodatek $10 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Z badań własnych oraz literatury wynika, że jakość technologiczna ziarna, mąki a następnie ciasta i pieczywa pszennego zależy w dużej mierze od zaopatrzenia roślin w siarkę. Składnik ten wpływa na tworzenie aminokwasów siarkowych, które są wykorzystywane do biosyntezy białka. Białka pszenicy dzieli się na rodzaje, które różnią się między sobą budową, rozpuszczalnością i właściwościami (Kączkowski 2002, Miś 2005, Podleśna 2010). Bo chociaż biała mąka składa się głównie ze skrobi (70–80% s.m.), a białka (10–15% s.m.), tłuszcze (1–2% s.m.) i inne nie skrobiowe polisacharydy stanowią znacznie mniejszą jej część, to jednak białka mają największe znaczenie w określaniu właściwości funkcjonalnych mąki, co w szczególności odnosi się to do glutenu (Shewry i in. 1997). Białka glutenu pszennego zaliczane są do rozpuszczalnych w alkoholu białek zapasowych – prolamin. Gluten składa się z ponad 50 składników, które są tradycyjnie klasyfikowane w 2 grupy białek: gliadyny i gluteniny. Białka te podczas wyrabiania ciasta z mąki zmieszanej z wodą formują gluten – lepko-sprężystą substancję, która spaja ziarna skrobi i pozostałe składniki mąki w jedną całość (Miś 2005). Na poziomie cząsteczkowym gluten stanowi przestrzennie ciągłą sieć zbudowaną z łańcuchów polipeptydowych zespolonych ze sobą poprzez poprzeczne wiązania międzycząsteczkowe, z których najważniejsze to wiązania dwusiarczkowe i wodorowe. Od koncentracji i wytrzymałości tych wiązań zależą bezpośrednio właściwości fizyczne glutenu, od których z kolei zależy w dużej mierze jakość ciasta i chleba. Przyjmuje się, że gluten o wysokiej jakości odznacza się dużą wodochłonnością, elastycznością i zwięzłością, a w interakcji z pozostałymi składnikami mąki daje ciasto o długim czasie rozwoju i stałości oraz chleb o dużej objętości z porowatym i elastycznym miększem. Gliadyny i gluteniny odgrywają odmienne role w kształtowaniu właściwości reologicznych glutenu. Gliadyny nadają glutenowi właściwości lepkiej cieczy i przyczyniają się do zwiększenia jego rozciągliwości. Gluteniny są natomiast odpowiedzialne za sprężystość i wytrzymałość glutenu. Wzrost udziału glutenin przyczynia się do zwiększenia oporności ciasta na rozciąganie, wydłużanie czasu rozwoju ciasta i wzrostu objętości chleba. Obie grupy białek glutenowych zawierają białka bogate (S+) i ubogie w siarkę (S–). Wspomniane, cenne z technologicznego punktu widzenia, właściwości białek glutenowych wynikają w dużej mierze z obecności i właściwości białek bogatych w siarkę. Do białek tych należą α , β i γ -gliadyny, w których cysteina tworzy wiązania disulfidowe -S-S- wewnątrz- i międzycząsteczkowe oraz LMW – prolamin (gluteniny małowcząsteczkowe), w których cysteina tworzy oba rodzaje wiązań -S-S- (Kączkowski 2002). Jednakże w warunkach deficytu siarki stwierdzono gwałtowny wzrost białek ubogich w siarkę przy równoczesnym spadku zawartości białek bogatych w siarkę, co powoduje znaczne, niekorzystne zmiany w proporcjach białek w ziarnie pszenicy (Moss i in. 1981, Wieser

i in. 2004). Zatem piekarnicze wykorzystanie pszenicy jest możliwe przede wszystkim dzięki specyficznym właściwościom białek znajdujących się w bielmie ziarniaków i ich odpowiednim proporcjom (Miś 2005).

5.4. JAKOŚĆ NASION RZEPAKU W ZALEŻNOŚCI OD NAWOŻENIA SIARKĄ

Rzepak jest jedną z najważniejszych roślin oleisto-białkowych w świecie. Wzrastająca wartość użytkowa nasion wpłynęła na atrakcyjność uprawy rzepaku w kilku ostatnich dziesięcioleciach (Bartkowiak-Broda i in. 2005). Od 40 lat prowadzona w Polsce i w świecie intensywna hodowla jakościowa rzepaku zaowocowała odmianami, których nasiona są źródłem wysokiej jakości oleju i białka pastewnego. Jest to bardzo ważny postęp, ponieważ składnikami nasion rzepaku, mającymi główne znaczenie gospodarcze, są właśnie olej i białko. Odmiany podwójnie ulepszone, w których wyeliminowano szkodliwy kwas erukowy i dziesięciokrotnie zmniejszono zawartość glukozynolanów w śrucie, dają nasiona, z których uzyskuje się olej uniwersalny. Może on być wykorzystany zarówno na cele spożywcze, jak i do produkcji biopaliw oraz w innych zastosowaniach technicznych (Bartkowiak-Broda i in. 2005). Po ekstrakcji oleju z nasion powstaje śruta lub wytloki, które mają wysoką zawartość białka i dzięki temu mogą być stosowane w żywieniu wszystkich gatunków zwierząt hodowlanych. Białko rzepakowe charakteryzuje się większą niż śruta sojowa zawartością aminokwasów, takich jak cystyna i metionina, ale niższą zawartością pożądanej lizyny. Zawartość białka i oleju w nasionach rzepaku jest w dużym stopniu uwarunkowana genetycznie, jednakże ich zawartość, a zwłaszcza wydajność z powierzchni uprawy (plon) zależą także od warunków pogodowych i zastosowanej agrotechniki, w tym także od nawożenia. Spośród składników pokarmowych azot najsilniej oddziałuje na produktywność oraz jakość nasion rzepaku. Lepszemu wykorzystaniu dużych dawek azotu sprzyja odpowiedni poziom nawożenia siarką (Fotyma 2003). Autorka niniejszej monografii wykazała, że w warunkach gleb ubogich w siarkę nasiona charakteryzowały się zmniejszoną w stosunku do kontroli zawartością tłuszczu. Natomiast badania prowadzone w wazonach Mitscherlicha oraz w polu wykazały wzrost koncentracji tłuszczu pod wpływem siarki, ale wraz ze wzrostem plonów wartości te ulegały zmniejszeniu (Podleśna 2002b). Jednakże zbyt wysokie dawki siarki (powyżej $0,6 \text{ g} \cdot \text{wazon}^{-1}$) okazały się niekorzystne, ponieważ powodowały obniżenie plonu nasion, jak i zawartości oleju. Natomiast doświadczenia polowe poddane były wpływowi większej liczby źródeł siarki oraz zmiennych w latach warunków pogody, w związku z czym uzyskane wyniki zawartości tłuszczu w nasionach rzepaku różnią się w poszczególnych latach, podobnie jak w badaniach McGrath i Zhao (1996). Można jednak podsumować, iż zastosowane nawożenie siarką miało niewielki i na ogół nieistotny wpływ na tę cechę nasion, podobnie jak w doświadczeniach Rotkiewicz i in. (1996). Ahmad i Abdin (2000) wykazali wzrost zawartości tłuszczu w nasionach rzepaku nawożonego siarką w po-

równaniu z nasionami roślin pozbawionych tego składnika nawozowego. Autorzy ci obserwowali ponadto, że koncentracja tłuszczu w nasionach wzrasta bardzo szybko pomiędzy 7 a 35 dniem po kwitnieniu i w ciągu tego okresu wyższą zawartością tłuszczu wyróżniały się nasiona rzepaku nawożonego siarką. Z kolei Jankowski i in. (2008) nie stwierdzili istotnego wpływu siarki na zawartość tłuszczu w nasionach rzepaku, a w pierwszym roku badań zaobserwowali nawet obniżenie wartości tej cechy pod wpływem nawożenia S, podobnie jak autorka monografii, Hassan i in. (2007) oraz McGrath i Zhao (1996). Także termin aplikacji siarki nawozowej (jesień + wiosna, wiosna) nie spowodował istotnego zróżnicowania zawartości tłuszczu w nasionach. Natomiast badania własne autorki wykazały, że w rzepaku uprawianym w obiektach nawożonych S plon tłuszczu wzrastał od 0,8 do 20,5%. Należy dodać iż, bezwzględny wpływ na wielkość plonu tłuszczu miało nawożenie azotem. Jednakże w wielu badaniach stwierdzono także korzystny wpływ siarki na tę cechę. Malarz i in. (2011b) uzyskali wzrost plonu tłuszczu w stosunku do kontroli o 9,9 oraz 8,6%, odpowiednio dla nawożenia siarczanem amonu i gipsem. W badaniach Jankowskiego i in. (2008) po zastosowaniu siarki nawozowej stwierdzono wzrost plonu tłuszczu o około 11% w pierwszym roku i około 4% w dwóch następnych latach badań. Zdaniem Ahmada i in. (1999), umiarkowane nawożenie S i N oddziałuje na wzrost plonu tłuszczu podobnie jak na plon nasion, ze względu na optymalne wartości wskaźnika fotosyntezy, która utrzymuje produkcję asymilatów niezbędnych do wzrostu nasion.

Doświadczenie wazonowe autorki potwierdziło, że nawożenie siarką może zwiększać zawartość białka ogólnego w nasionach rzepaku, ale dawki zbyt wysokie działają niekorzystnie na tę cechę. W niektórych latach badań polowych wystąpił istotny wzrost zawartości białka w nasionach rzepaku nawożonego siarką podobnie jak w badaniach Jankowskiego i in. (2008) oraz Wielebskiego (2006). Z kolei doświadczenia Hassan i in. (2007), Horodyskiego i Krzywińskiej (1979) oraz Malarza i in. (2011b) wykazały brak wpływu nawożenia siarką na zawartość białka w nasionach rzepaku. Rotkiewicz i in. (1996) stwierdziły, że zastosowanie dawki 20 i 40 kg S·ha⁻¹, niezależnie od terminu, nie wpływało na zawartość białka w nasionach rzepaku odmiany Bolko, natomiast dawka 80 kg S·ha⁻¹ powodowała zmniejszenie zawartości białka o 0,2–0,8%.

Autorka niniejszej monografii stwierdziła wzrost plonów białka w nasionach roślin nawożonych siarką i zróżnicowanymi dawkami azotu. Niewielkie zmiany w wydajności białka, pod wpływem stosowania różnych nawozów siarkowych, stwierdzili Malarz i in. (2011b). Natomiast w doświadczeniu Jankowskiego i in. (2008) wykazano, że nawożenie siarką zwiększyło plon białka od 10 do 190 kg·ha⁻¹, w zależności od roku badań, a siarka już w dawce 30 kg S·ha⁻¹ spowodowała istotny wzrost plonu białka.

Zawartość tłuszczu i białka w nasionach rzepaku zależy w ogromnym stopniu od dawki azotu, co wynika bezpośrednio z oddziaływania azotu na plon nasion. W doświadczeniu własnym wykazano, że nasiona uzyskane z roślin nawożonych niższą

awką N wyróżniały się wyższą zawartością tłuszczu i niższą zawartością białka niż nasiona roślin nawożonych wysokimi dawkami tego składnika. Obie te cechy nasion są wzajemnie uzależnione od siebie, co oznacza, że gdy rośnie zawartość tłuszczu, to maleje zawartość białka. Zdaniem Mengela i Kirkby (1983), u roślin oleistych występuje wyraźne współzawodnictwo o asymilaty pomiędzy różnymi akceptorami. Jednakże wysokie nawożenie azotem, uzupełnione przez siarkę, sprzyja syntezie białka poprzez tworzenie aminokwasów zawierających siarkę (metionina i cysteina), co potwierdzają badania Horodyskiego i Krzywińskiej (1979) oraz Mortensena i Eriksena (1994).

Należy podkreślić, iż w warunkach pola produkcyjnego przebieg pogody ma często większy wpływ na wzrost i rozwój roślin niż elementy agrotechniki wprowadzone przez rolnika. W tym aspekcie także zawartość oraz wydajność tłuszczu i białka są wyraźnie uzależnione od warunków pogody (Wielebski 2006, Hassan i in. 2007). Zdaniem Bartkowiak-Brody i in. (2005), niedobory wody powodują ogólne zmniejszenie produktywności roślin i zawartości tłuszczu w nasionach rzepaku, ale nasiona zawierają wówczas więcej białka. Temperatura wyższa od optymalnej, dla danego regionu uprawy, wpływa ograniczająco na zawartość tłuszczu w nasionach. Według Vasaka i in. (1997), większa zawartość tłuszczu w nasionach (średnio o 1,3%) występuje w latach chłodnych, o większej ilości opadów, natomiast mniejsza – w latach ciepłych.

5.5. ZDROWOTNOŚĆ RZEPAKU OZIMEGO W ZALEŻNOŚCI OD NAWOŻENIA SIARKĄ

O tym, że oprócz funkcji żywieniowej siarka spełnia w roślinie funkcję ochronną przed patogenami świat naukowy dowiedział się w końcu lat 80. XX w. (Wickenhäuser i in. 2005). Jednakże wykorzystanie siarki elementarnej w zwalczaniu chorób i szkodników zostało wprowadzone na przełomie XVIII i XIX w. przez Williama Forsytha i było szeroko stosowane w praktyce rolniczej do końca XIX w. (Gaj i Klikocka 2011). Począwszy od roku 1986 w Kalifornii (USA) stosowano roztwory palonego wapna i siarki, zwane cieczą kalifornijską, do oprysku drzew cytrusowych przeciwko czerwom. Wcześniejsze obserwacje dotyczyły działania roztworów siarki podawanych dolistnie.

W ostatnich latach stwierdzono niedobory siarki w glebach wielu krajów, co spowodowało, że pierwiastek ten włączono do planu nawożenia doglebowego roślin. Te działania były impulsem do poszukiwania zależności pomiędzy stanem zaopatrzenia roślin w siarkę a ich odpornością na występujące powszechnie choroby grzybowe. Autorka wykazała zróżnicowane działanie siarki podawanej doglebowo na stan zdrowotności rzepaku ozimego podobnie jak Sadowski i in. (2002) w doświadczeniu z rzepakiem jarym. W większości lat i w obu miejscowościach (Grabów – woj. mazowieckie i Baborówko – woj. wielkopolskie) mniejszy procent roślin porażonych przez patogena powodującego suchą zgniliznę kapustnych

stwierdzono na poletkach nawożonych siarką (+S) w porównaniu z poletkami kontrolnymi (–S). W roku 2000 stwierdzono pojawienie się w dużym nasileniu mączniaka prawdziwego (*Erysiphe cruciferarum*), który w mniejszym stopniu atakował rośliny nawożone siarką, co potwierdzono statystycznie dla wyników uzyskanych w RZD Grabów. Stwierdzono także zmniejszenie ilości roślin porażonych przez czern krzyżowych (*Alternaria* spp.) oraz jasną plamistość liści (*Pyrenopeziza brassicae*). Dłużniewska i in. (2011) oraz Kurowski i in. (2010) prowadzili kilkuletnie doświadczenia polowe, w których wykazali, że nawożenie siarką wpłynęło korzystnie na zdrowotność roślin kapustnych, zmniejszając nasilenie chorób: czerni krzyżowych, szarej pleśni, zgnilizny twardzikowej oraz suchej plamistości i werticiliozy. Wykazano też wpływ siarki na rozwój mączniaka prawdziwego, chociaż nie był on jednoznaczny i zależał w dużej mierze od przebiegu pogody. Autorka monografii, podobnie jak wielu innych badaczy (Dłużniewska i in. 2011, Sadowski i in. 2002, Salac i in. 2006), obserwowała wpływ siarki na zmniejszenie nasilenia mączniaka rzekomego. Z kolei Pusz i in. (2012) stwierdzili mniejsze porażenie przez *Alternaria alternata* nieodkaszonych powierzchniowo nasion gorczycy białej przy zastosowaniu przedsiewnego nawożenia roślin siarką.

Autorka wykazała również, że w niektórych latach badań nie ma udowodnionego oddziaływania siarki na wskaźnik infekcji chorobowej lub też oddziaływanie to jest zróżnicowane w zależności od lokalizacji doświadczenia. Ponadto w poszczególnych latach obserwuje się także różny poziom porażenia przez tego samego patogena, co potwierdzają inni autorzy (Salac i in. 2006, Kurowski i in. 2010). Duży wpływ na nasilenie chorób grzybowych, bez względu na zastosowane nawożenie siarką, ma przebieg pogody. Z obserwacji autorki niniejszej monografii, a także Kurowskiego i Budzyńskiego (2003) wynika, że ciepła jesień sprzyja rozwojowi chorób rzepaku w związku z nadmiernym rozwojem roślin i przedłużającą się wegetacją. Z kolei duża ilość opadów wiosną powoduje utrzymywanie się znacznej wilgotności w łanie, co również jest czynnikiem zwiększającym nasilenie infekcji. Z obserwacji autorki wynika natomiast, że mniejsze opady i niższa temperatura w okresie zimy i wczesnej wiosny zmniejszają stopień porażenia roślin przez grzyby chorobotwórcze. Zdaniem Wałkowskiego i Korbasa (2000), bardzo niekorzystny wpływ na nasiona w okresie ich dojrzwania mają: wysoka temperatura i duża wilgotność powietrza oraz występujące jednocześnie nadmierne opady. Warunki te powodują wyleganie łanu, zamakanie nasion w łuszczynach, czy nawet ich porastanie oraz sprzyjają rozwojowi chorób grzybowych, z których najgroźniejszą w tym czasie jest czern krzyżowych (*Alternaria* spp.) powodująca niedorozwój nasion oraz przedwczesne pęknięcie łuszczyn i osypywanie nasion. Przedstawione wyniki badań potwierdzają, że nawożenie roślin siarką na ogół wpływa na mniejsze ich porażenie przez patogeny chorobotwórcze. Obecnie nie ma wątpliwości, że siarka pobrana z gleby przez korzenie jest wbudowywana w aminokwas cysteinę, który jest pierwszym i podstawowym związkiem siarkowym w roślinie oraz aminokwasem wyjściowym do produkcji wielu innych związków/metabolitów niezbędnych do funkcjonowania rośliny

w środowisku. Wśród tych związków są metabolity (glutation, glukozynolany, fitoaleksyny, białka bogate w S, gazowa postać siarki – H_2S oraz siarka elementarna), które, jak się przypuszcza, są włączone w mechanizm odporności roślin na patogeny (Bloem i in. 2005).

Badania wskazują, że rośliny z deficytem siarki mają bardzo niską zawartość glutationu, która wzrasta po zastosowaniu nawozów siarkowych (Salac i in. 2006). Zmiana zasobu glutationu (GSH) stanowi informację o stanie redoks komórki, który może wpływać na ekspresję genów ważnych w obronie przeciwko stresom środowiskowym (Lewandowska i Sirko 2008). Wzrost zasobów GSH był obserwowany także w odpowiedzi na atak patogenów, więc rośliny o obniżonej zawartości GSH były bardziej wrażliwe na tego typu zagrożenia. Istotny wzrost zawartości glutationu stwierdzono po zastosowaniu siarki w drugim roku badań Salac i in. (2006), co autorzy wiążą z poważną infekcją suchej zgnilizny kapustnych na plantacji rzepaku. Gullner i Kömives (2001) dowodzą, że z metabolizmem GSH jest związany enzym *S*-transferaza glutationowa, który ma istotną i dobrze określoną rolę w reakcjach odtruwania roślin. Zdaniem tych autorów, GSH wspomaga obronę roślin przed patogenami poprzez wzmożoną produkcję lignin w ścianach komórkowych i produkcję fitoaleksyn. Jednakże bardzo ważnym działaniem glutationu w roślinach zaatakowanych przez patogena jest wpływ na pierwotny metabolizm rośliny, który dostarcza energii do biosyntezy związków obronnych – metabolitów wtórnych (Gullner i Kömives 2001). Wprawdzie wysoka zawartość tych metabolitów może wpływać na większą odporność rośliny, ale ich synteza jest uważana za bardzo kosztowną, co w konsekwencji powoduje redukcję wzrostu i reprodukcji roślin (Bloem i in. 2005). Przypuszcza się, że z tego powodu rośliny wykształciły indukowaną obronę, w której zawartość tych związków wzrasta tylko po pojawieniu się stresu (Siemens i in. 2002).

Następnym metabolitem wtórnym są glukozynolany (GSL) produkowane przez rośliny wyższe w celu zwiększenia ich odporności na niekorzystne wpływy osobników konkurencyjnych i patogenów przez wykazywanie toksycznych i zniechęcających efektów (Bloem i in. 2005). Potwierdzeniem ich działania antygrzybowego jest wzrost infekcji grzybowych na plantacjach rzepaku populacyjnego (00) w porównaniu z odmianami tradycyjnymi (0), czyli wysokoglukozynolanowymi. Same glukozynolany mają ograniczoną aktywność biologiczną, ale ich potencjał wzrasta wraz z zakresem uszkodzeń tkanek rośliny, w wyniku czego zaczyna działać enzym mirozynaza powodujący degradację glukozynolanów i powstawanie toksycznych produktów (Oleszek 1995, Bloem i in. 2005, Troczyńska 2005). Podczas gdy toksyczność produktów rozpadu GSL jest dobrze udokumentowana, to ich działanie nie jest jeszcze wyjaśnione. Zdaniem Schnuga i Ceynowej (1990), istnieje bliska zależność pomiędzy zawartością GSL w częściach wegetatywnych a zaopatrzeniem roślin w siarkę, przez co wydaje się możliwe zwiększenie naturalnej odporności roślin rzepaku w wyniku nawożenia siarką. Figas i in. (2008) stwierdzili ujemną korelację pomiędzy poziomem glukozynolanów alkenowych w nasionach a ich porażeniem

przez *Alternaria brassicae*. Zdaniem tych autorów, siarka stosowana dogłębowo, podnosząc całkowitą zawartość glukozytynolanów, obniżała o 11,6% porażenie nasion przez tego patogena. Jednakże badania Booth i Walker (1997) wykazały, że podwyższony poziom GSL w liściach i łodygach rzepaku w wyniku stosowania siarki nie może w pełni zastąpić działania fungicydów.

Fitoaleksyny są związkami o szerokim spektrum działania antybiotycznego. Nie są one spotykane w zdrowych tkankach roślin, ale są syntezowane w komórkach położonych blisko miejsca infekcji wywołanej przez patogena (Płażek 1999). Fitoaleksyny spotykane w roślinach krzyżowych mają co najmniej jeden atom siarki i wykazują różne rodzaje aktywności przeciwko grzybom chorobotwórczym. Kolejną grupą związków siarkowych związanych z działaniami obronnymi roślin są tak zwane białka bogate w siarkę, do których zaliczane są tioniny, defensyny i wiele innych polipeptydów (Kruse i in. 2005). Stwierdzono udział tych związków we wzroście odporności na liczne ważne patogeny spotykane w rolnictwie, jak *Alternaria* spp. i *Fusarium* spp. Bent (1996) uważa jednak, że te metabolity mogą ograniczyć kolonizację patogena, ale nie blokują całkowicie rozwoju choroby, co potwierdzałyby obserwacje poczynione przez autorkę monografii.

Nieco innym działaniem siarki w tworzeniu odporności na choroby jest jej wpływ na kondycję roślin uprawnych. Jak przedstawiono w rozdziale 4. tego opracowania, rośliny optymalnie zaopatrzone w siarkę sprawnie pobierają i efektywnie wykorzystują składniki pokarmowe, co sprzyja ich dobrej kondycji obserwowanej jako prawidłowy wzrost i rozwój. Dzięki temu w sytuacji inwazji patogenów są zdolne uruchomić reakcje obronne i podjąć naprawę szkód. W badaniach własnych, a także w pracach innych autorów wykazano wzrost zawartości i pobrania potasu, wapnia i magnezu przez rośliny nawożone siarką (Skwierawska i in. 2006, Brodowska i Kaczor 2009). Działanie tych składników w komórkach roślinnych jest wielostronne, ale ich ważną rolą w roślinie jest także obrona przeciwko patogenom chorobotwórczym (Blume i in. 2000, Grzebisz i in. 2010, Wang i in. 2013).

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

1. Uprawa rzepaku i pszenicy w ścisłym doświadczeniu wazonowym, w warunkach deficytu siarki prowadziła do zahamowania wzrostu i rozwoju roślin, a także do zmiany składu chemicznego organów wegetatywnych oraz nasion. Uprawa tych roślin w warunkach pola doświadczalnego, na glebie o niskiej zawartości S-SO₄ nie powodowała tak drastycznych zmian w ich wzroście i rozwoju, chociaż stwierdzono zmiany w koncentracji składników pokarmowych w ich organach.
2. Pszenica i rzepak uprawiane w warunkach deficytu siarki (–S) wykazywały wyższą zawartość N, P, K, Ca i Mg oraz obniżoną zawartość S w stosunku do roślin kontrolnych (+S) i wartości przyjętych za średnie w testowanych fazach wzrostu obu roślin. Natomiast w rzepaku uprawianym bez nawożenia siarką, w wa-

runkach pola doświadczalnego stwierdzono nieco niższą zawartość niektórych składników pokarmowych w porównaniu z roślinami z obiektu +S, ale różnice te nie były istotne.

3. Rośliny uprawiane bez nawożenia siarką mineralną pobierały mniejsze ilości wszystkich badanych składników pokarmowych w porównaniu z roślinami z obiektów, gdzie stosowano ten składnik pokarmowy. Większe różnice wystąpiły w doświadczeniu wazonowym, w którym rośliny rzepaku nie wytworzyły nasion lub uzyskano mniejsze plony ziarna pszenicy niż w doświadczeniu polowym.
4. W warunkach doświadczenia wazonowego nawożenie siarką okazało się konieczne do prawidłowego rozwoju wegetatywnych organów rzepaku oraz do zawiązania łuszczyń i wykształcenia nasion.
5. W pszenicy ozimej uprawianej w wazonach, w których nie stosowano nawożenia siarką stwierdzono silne zahamowanie wytwarzania bocznych pędów kłosowych oraz zmniejszenie liczby ziarniaków z kłosa i MTZ, co wpłynęło na redukcję potencjału plonotwórczego roślin i istotne zmniejszenie plonu ziarna.
6. Dolistne zastosowanie siarki w fazie pąkowania rzepaku spowodowało zmianę metabolizmu oraz uruchomienie jego wzrostu i rozwoju, w wyniku czego rośliny zakwitły, zawiązały łuszczyzny i wydały nasiona. W organach tych roślin stwierdzono również wzrost zawartości S oraz obniżenie koncentracji i wzrost pobrania pozostałych składników pokarmowych.
7. Wykazano, że najkorzystniejsze dla roślin są umiarkowane dawki siarki, przy których rośliny wykazują największą aktywność fotosyntetyczną, dają największy plon nasion oraz wysoki plon białka i tłuszczu. Natomiast zarówno brak siarki, jak też jej nadmiar wykazują niekorzystny wpływ na rozwój roślin i ich plonowanie.
8. Stosowanie nawozów siarkowych wpływało na wzrost plonu badanych roślin poprzez oddziaływanie na prawidłową zawartość siarki, azotu oraz innych składników pokarmowych w organach roślin, właściwy rozwój części nadziemnej oraz systemu korzeniowego, a także wzrost liczby nasion z rośliny i MTN.
9. Efektywność nawożenia siarką była uzależniona od nawożenia azotem. Zrównoważone nawożenie azotowo-siarkowe korzystnie oddziaływało na wzrost i rozwój roślin oraz plon i jego jakość.
10. Niedobór siarki w doświadczeniu wazonowym spowodował zmniejszenie zawartości tłuszczu w nasionach rzepaku w porównaniu z zawartością oznaczoną w nasionach roślin nawożonych wyższą dawką tego składnika. Natomiast pod wpływem nawożenia siarką stwierdzono wzrost wydajności tłuszczu w nasionach rzepaku uprawianego zarówno w doświadczeniu polowym, jak i wazonowym.
11. Nawożenie siarką wpłynęło w niewielkim stopniu na wzrost zawartości białka w nasionach rzepaku. Jednakże czynnik ten spowodował wzrost plonu białka.

12. Zastosowane nawożenie siarką spowodowało korzystny wzrost zawartości białka i glutenu w ziarnie pszenicy, ale nie oddziaływało na wyciąg mąki, jej wodochłonność oraz zawartość otrąb w mące. Stwierdzono także wydłużenie czasu rozwoju i stałości ciasta oraz zmniejszenie rozmiękczenia ciasta i wzrost liczby jakości. Pieczywo uzyskane z nasion pszenicy nawożonej siarką miało istotnie większą objętość w stosunku do pieczywa uzyskanego z pszenicy nienawożonej tym składnikiem.
13. Zastosowanie siarki w uprawie rzepaku ozimego nie zabezpieczało plantacji przed chorobami grzybowymi, ale istotnie zmniejszało nasilenie ich występowania. Wykazano, że nawożenie siarką wpływa na zmniejszenie infekcji powodowanej przez patogeny: *Phoma lingam*, *Erysiphe cruciferarum*, *Alternaria* spp. i *Peronospora parasitica*.
14. Studia nad rolą siarki w kształtowaniu gospodarki mineralnej oraz wielkości i jakości plonu wybranych roślin uprawnych dokonane w oparciu o wieloletnie badania własne i literaturę dowodzą, że siarka powinna być traktowana jako niezbędny składnik pokarmowy stosowany w optymalnym terminie i optymalnych dawkach nawozowych uzależnionych od gatunku rośliny, zasobności gleby uprawnej, nawożenia innymi składnikami oraz przebiegu warunków pogody.

7. LITERATURA

1. Abdallah M., Dubousset L., Meuriot F., Etienne P., Avise J.C., Ourry A.: Effect of mineral sulphur availability on nitrogen and sulphur uptake and remobilization during the vegetative growth of *Brassica napus* L., 2010, **61(10)**: 2635-2646, DOI:10/1093/jxb/erg096.
2. Achremowicz B., Borkowska H., Styk B., Grundas S.: Wpływ nawożenia azotowego na jakość glutenu pszenicy jarej. Biul. IHAR, 1995, **195**: 29-34.
3. Adamczyk B., Godlewski M.: Różnorodność strategii pozyskiwania azotu przez rośliny. Kosmos, 2010, **59(1-2)**: 211-222.
4. Ahmad A., Abraham G., Abdin M.Z.: Physiological investigation of the impact of nitrogen and sulphur application on seed and oil yield of rapeseed (*Brassica campestris* L.) and mustard (*Brassica juncea* L. Czern. and Coss.) genotypes. J. Agron. Crop Sci., 1999, **183**: 19-25.
5. Ahmad A., Abdin M.Z.: Effect of sulphur application on lipid, RNA and fatty acid content in developing seeds of rapeseed (*Brassica campestris* L.). Plant Sci., 2000, **150**: 71-76.
6. Anjum N.A., Gill S.S., Umar S., Ahmad I., Duarte A.C., Pereira E.: Improving growth and productivity of oleiferous brassicas under changing environment: significance of nitrogen and sulphur nutrition, and underlying mechanisms. Scientific World Journal, 2012, p. 1-12, DOI: 10.1100/2012/657808.
7. Baranowska-Morek A.: Roślinne mechanizmy tolerancji na toksyczne działanie metali ciężkich. Kosmos, 2003, **52(2-3)**: 283-298.
8. Barczak B., Nowak K.: Oddziaływanie dawki i formy siarki na plonowanie oraz zawartość i plon białka ziarna owsa odmiany Komes. Fragm. Agron., 2010, **27(1)**: 14-20.
9. Bartkowiak-Broda I., Wałkowski T., Ogrodowczyk M.: Przyrodnicze i agrotechniczne możliwości kształtowania jakości nasion rzepaku. Pam. Puł., 2005, **139**: 7-25.

10. Baszynski T., Brand J., Barr R., Krogmann D.W., Crane F.L.: Some biochemical characteristics of chloroplasts from mineral-deficient maize. *Plant Physiol.* 1972, **50**: 410-411.
11. Bates N.J., Cram W.J., Tomos A.D.: Sulphate concentrations in wheat epidermis at single-cell resolution. Influence of N and S supply. In: *Sulphur metabolism in higher plants: molecular, ecophysiological and nutritional aspects*, W.J. Cram, L.J. De Kok, I. Stulen, H. Rennenberg and C. Brunold (eds), Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, 1997, pp. 315-317.
12. Bell Ch., Jones J., Franklin J., Milford G., Leigh R.: Sulphate supply and its effects on sap quality during growth in sugar beet storage roots. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 1995, **158**: 93-95.
13. Bent A.F.: Plant disease resistance genes: function and structure. *Plant Cell*, 1996, **8**: 1757-1771.
14. Biller E., Wierzbicka A.: Ocena przydatności technologicznej mąki. Cz. I. Badanie przydatności technologicznej glutenu. W: *Wybrane procesy w technologii żywności*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 2003, ss. 64-70.
15. Blake-Kalff M.M.A., Harrison K.R., Hawkesford M.J., Zhao F.J., McGrath S.P.: Distribution of sulfur within oilseed rape leaves in response to sulfur deficiency during vegetative growth. *Plant Physiol.*, 1998, **118**: 1337-1344.
16. Bloem E., Haneklaus S., Schnug E.: Significance of sulfur compounds in the protection of plants against pests and diseases. *J. Plant Nutr.*, 2005, **28**: 763-784, DOI: 10.1081/PLN-200055532.
17. Blume B., Nurnberger T., Nass N., Scheel D.: Receptor-mediated increase in cytoplasmic free calcium required for activation of pathogen defense in parsley. *Plant Cell*, 2000, **12**: 1425-1440.
18. Booth E., Walker K.: The effectiveness of foliar glucosinolate content raised by sulphur application on disease control in oilseed rape. In: *Sulphur metabolism in higher plants: molecular, ecophysiological and nutritional aspects*, W.J. Cram, L.J. De Kok, I. Stulen, H. Rennenberg and C. Brunold (eds). Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, 1997, pp. 327-329.
19. Boreczek B.: Bilans siarki w zmianowaniu czteropolowym. *Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization*, 2000, **4(5)**: 173-184.
20. Brodowska M.S.: Wpływ wapnowania i nawożenia siarką na wzrost, rozwój i plonowanie jarych form pszenicy i rzepaku. Cz. I. Pszenica jara. *Acta Agroph.*, 2003, **1(4)**: 617-622.
21. Brodowska M.S., Kaczor A.: The effect of various forms of sulphur and nitrogen on calcium and magnesium content and uptake in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) and cocksfoot (*Dactylis glomerata* L.). *J. Elem.*, 2009, **14(4)**: 641-647.
22. Brunold K., Von Ballmoos P., Hesse H., Fell D., Kopriva S.: Interactions between sulfur, nitrogen and carbon metabolism. In: *Sulfur transport and assimilation in plants*, J.C. Davidian, D. Grill, L.J. De Kok, I. Stulen, M.J. Hawkesford, E. Schnug and H. Rennenberg (eds). Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, 2003, pp. 45-56.
23. Cacak-Pietrzak G., Ceglińska A., Haber T.: Wartość technologiczna wybranych odmian pszenicy ozimej w zależności od zróżnicowanego nawożenia azotowego. *Pam. Puł.*, 1999, **118**: 45-56.
24. Cakmak I.: Plant nutrition researches: Priorities to meet human needs for food in sustainable ways. *Plant Soil*, 2002, **247**: 3-24.
25. Castle S.L., Randall P.J.: Effects of sulfur deficiency on the synthesis and accumulation of proteins in the developing wheat seed. *Aust. J. Plant Physiol.*, 1987, **14**: 503-516.
26. Chojnacki A., Boguszewski W.: Zawartość azotu, fosforu i potasu w głównych roślinach uprawnych w Polsce. *Pam. Puł.*, 1971, **50**: 5-28.

27. Cichy B., Paszek A.: Nawozy ciekłe o wysokiej zawartości siarki. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2003, **4(17)**: 31-39.
28. Clarkson D.T., Hawkesford M.J.: Molecular biological approaches to plant nutrition. Plant Soil, 1993, **155/156**: 21-31.
29. Cobbet C.S.: Phytochelatins and their roles in heavy metal detoxification. Plant Physiol., 2000, **123**: 825-832.
30. 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, 2002a, pp. 1-26.
31. De Kok L.J., Castro A., Durenkamp M., Koralewska A., Posthumus F.S., Stuiver C.E.E., Yang L., Stulen I.: Pathways of plant sulfur uptake and metabolism – an overview. Landbauforschung Völkenrode, Special Issue, 2005, **283**: 5-13.
32. De Kok L.J., Westerman S., Stuiver C.E.E., Weidner W., Stulen I., Grill D.: Interaction between atmospheric hydrogen sulfide deposition and pedospheric sulfate nutrition in *Brassica oleracea* L. Phytol., Special issue “Global change”, 2002b, **42(3)**: 35-44.
33. Dietz K.J.: Recovery of spinach leaves from sulfate and phosphate deficiency. J. Plant Physiol., 1989, **134**: 551-557.
34. Dłużniewska J., Nadolnik M., Kulig B.: Choroby rzepaku ozimego w zależności od poziomu zaopatrzenia roślin w azot i siarkę. Prog. Plant Prot./Post. Ochr. Roślin, 2011, **51(4)**: 1811-1815.
35. Droux M.: Sulfur assimilation and the role of sulfur in plant metabolism: a survey. Photosynth. Res., 2004, **79**: 331-348.
36. El-Bayoumy K., Sinha R., Pinto J., Rivlin R.S.: Cancer chemoprevention by garlic and garlic-containing sulfur and selenium compounds. Am. Soc. Nutr., 2006, (**suppl.**): 864-869.
37. Fageria N.K.: Role of soil organic matter in maintaining sustainability of cropping systems. Commun. Soil Sci. Plant, 2012, **43**: 2063-2113.
38. Figas A.: Wpływ sposobu nawożenia siarką i dolistnej aplikacji magnezu i boru na plonowanie rzepaku jarego oraz zawartość glukozynolanów w nasionach. Fragm. Agron., 2009, **26(1)**: 25-33.
39. Figas A., Drozdowska L., Sadowski Cz.: Zależność między nawożeniem siarką a zawartością glukozynolanów i zasiedleniem nasion rzepaku jarego „Margo” przez *Alternaria brassicae*. Acta Sci. Pol., Agricultura, 2008, **7(3)**: 43-52.
40. Filipiek T.: Dynamika antropogenicznych przyczyn oraz skutków zakwaszania gleb w Polsce. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1998, **456**: 7-12.
41. Filipiek T.: Dynamika antropogenicznych przyczyn zakwaszenia gleb w Polsce w ostatnich 30 latach. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2005, **2(23)**: 67-77.
42. Fismes J., Vong P.C., Guckert A., Frossard E.: Influence of sulfur on apparent N-use efficiency, yield and quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown on a calcareous soil. Eur. J. Agron., 2000, **12**: 127-141.
43. Fotyma E.: Wpływ nawożenia siarką na wykorzystanie azotu z nawozów mineralnych przez rośliny uprawy polowej. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2003, **4(17)**: 117-136.
44. Gabryś H.: Gospodarka azotowa. W: Podstawy fizjologii roślin, J. Kopcewicz i S. Lewak (red.). PWN Warszawa, 2002, ss. 206-215.
45. Gaj R., Kłikocka H.: Wielofunkcyjne działanie siarki w roślinie – od żywienia do ochrony. Prog. Plant Prot./Post. Ochr. Roślin, 2011, **51(1)**: 33-44.
46. Gondek K., Gondek A.: The influence of mineral fertilization on the yield and content of selected macro and microelements in spring wheat. J. Res. Appl. Agric. Eng., 2010, **55(1)**: 30-36.

47. Goodroad L.L., Ohki K., Wilson D.O.: Influence of sulfur on growth and nutrient composition of red winter wheat. J. Plant Nutr., 1989, **12**(8): 1029-1039.
48. Goźliński H.: Działanie nawozowe siarki (SO_4^{2-}) przy różnych poziomach nawożenia roślin azotem. Cz. I. Badania z owsem i jęczmieniem. Rocz. Nauk Rol., Seria A, 1970, **96**(4): 133-149.
49. Grzebisz W., Fotyma E.: Ocena odżywienia siarką rzepaku uprawianego w północno-zachodniej Polsce. Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, 1996, **XVII**: 275-280.
50. Grzebisz W., Gaj R.: Zbilansowane nawożenie rzepaku ozimego. W: Zbilansowane nawożenie rzepaku. Aktualne problemy, W. Grzebisz (red.). Wyd. AR w Poznaniu, 2000, ss. 83-98.
51. Grzebisz W., Gaj R., Przygocka-Cyna K.: Rola składników pokarmowych w budowaniu mechanizmów odporności roślin uprawnych na presje patogenów. Prog. Plant Prot./Post. Ochr. Roślin, 2010, **50**(2): 517-532.
52. Grzebisz W., Przygocka-Cyna K.: Aktualne problemy gospodarowania siarką w rolnictwie polskim. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2003, **4**(17): 64-77.
53. Grzebisz W., Przygocka-Cyna K.: Spring malt barley response to elemental sulphur – the prognostic value of N and S concentrations in malt barley leaves. Plant Soil Environ., 2007, **53**(9): 388-394.
54. Gullner G., Kömives T.: The role of glutathione and glutathione – related enzymes in plant-pathogen interactions. In: Significance of glutathione to plant adaptation to the environment. D. Grill, M.M. Tausz and L.J. De Kok (eds). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001, pp. 207-239.
55. Haneklaus S., Bloem E., Schnug E.: Sulfur interactions in crop ecosystems. In: Sulfur in plants. An ecological perspective, M. Hawkesford and L.J. De Kok (eds), Springer-Verlag, 2007, pp. 17-39.
56. Hassan F.U., Manaf A., Qadir G., Basra S.M.A.: Effects of sulphur on seed yield, oil, protein and glucosinolates of canola cultivars. Int. J. Agric. Biol. 2007, **9**(3): 504-508.
57. Hesse H., Nikiforova V., Gakiere B., Hoefgen R.: Molecular analysis and control of cysteine biosynthesis: integration of nitrogen and sulphur metabolism. J. Exp. Bot., 2004, **55**(401): 1283-1292.
58. Hawkesford M.J., De Kok L.J.: Managing sulphur metabolism in plants. Plant Cell Environ., 2006, **29**: 382-395.
59. Herath H.M.W., Ormrod D.P.: Temperature and sulphur nutrition effects on the CO_2 assimilation rates of barley, peas and rape. Plant Soil, 1973, **38**: 525-530.
60. 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.
61. Horodyski A., Krzywińska F.: Wpływ nawożenia siarką na plon i jakość nasion rzepaku ozimego. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1979, **229**: 101-109.
62. Hölzl G., Witt S., Gaude N., Metzner M., Schöttler A., Dörmann P.: The role of diglycosyl lipids in photosynthesis and membrane lipid homeostasis in *Arabidopsis*. Plant Physiol., 2009, **150**: 1147-1159.
63. Hřivná L., Richter R., Lošák T., Hlušek J.: Effect of increasing doses of nitrogen and sulfur on chemical composition of plants, yields and seed quality in winter rape. Rostlinná Vyroba, 2002, **48**(1): 1-6.
64. Hu K., Zhu Z., Zang Y., Hussain S.A.: Accumulation of glucosinolates and nutrients in pakchoi (*Brassica campestris* L. ssp. *Chinensis* var. *communis*) two cultivar plants exposed to sulfur deficiency. Hort. Environ. Biotechnol., 2011, **52**(2): 121-127, DOI: 10.1007/s13580-011-0097-5.

65. Hussain K., Islam M., Siddique M.T., Hayat R., Mohsan S.: Soybean growth and nitrogen fixation as affected by sulfur fertilization and inoculation under rainfed conditions in Pakistan. *Int. J. Agric. Biol.*, 2011, **13**: 951-955.
66. Igras J.: Zawartość składników mineralnych w wodach drenarskich z użytków rolnych w Polsce. Monografie i Rozprawy Naukowe, IUNG Puławy, 2004, **13**: 123.
67. Inal A., Gunes A., Alpaslan M., Sait Adak M., Taban S., Eraslan F.: Diagnosis of sulfur deficiency and effects of sulfur on yield, and yield components of wheat grown in central Anatolia, Turkey. *J. Plant Nutr.*, 2003, **26**(7): 1483-1498.
68. Jakubauskiene L., Juodeikiene G.: The relationship between protein fractions of wheat gluten and the quality of ring-shaped rolls evaluated by the echolocation method. *Food Technol. Biotech.*, 2005, **43**(3): 247-253.
69. Jakubus M., Toboła P.: Zawartość siarki ogólnej i siarczanowej w rzepaku ozimym w zależności od nawożenia. *Rośliny Oleiste – Oilseed Crops*, 2005, **XXVI**: 149-161.
70. Jamal A., Moon Y.S., Abidin M.Z.: Sulphur – a general overview and interaction with nitrogen. *Aust. J. Crop Sci.*, 2010, **4**(7): 523-529.
71. Jankowski K., Budzyński W., Szymanowski A.: Effect of sulphur on the quality of winter rape seeds. *J. Elem.*, 2008, **13**(4): 521-534.
72. Janzen H.H., Bettany J.R.: Sulfur nutrition of rapeseed. II. Effect of time of sulfur application. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1984, **48**: 107-112.
73. Järvan M., Edesi L., Adamson A., Lukme L., Akk A.: The effect of sulphur fertilization on yield, quality of protein and baking properties of winter wheat. *Agr. Res.*, 2008, **6**(2): 459-469.
74. Jaworski W.: Koncepcja realizacji wymagań Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady nr 2001/80/WE w sprawie ograniczeń emisji niektórych zanieczyszczeń do powietrza. 2001a. Protokół dostępu: http://www.rc.com.pl/pdf/Wojciech_Jaworski.pdf [21.03.2013]
75. Jaworski W.: Konwencje i umowy międzynarodowe jako źródło wymagań ekologicznych dla energetyki. W: *Ekologiczne aspekty wytwarzania energii elektrycznej (EAE'2001)*, Mat. Międzynarodowej Konf. Warszawa, 14–16 listopada 2001b. Protokół dostępu: http://manhaz.cyf.gov.pl/portal/cykle-paliwowe/strona_konferencja_EAE-2001/4.pdf [23.03.2013]
76. Kaczor A., Kozłowska J.: Wpływ kwaśnych opadów na agroekosystemy. *Fol. Univ. Agric. Stetin.*, 2000, **204**(81): 55-68.
77. Kaczor A., Zuzańska J.: Znaczenie siarki w rolnictwie. *Chemia-Dydaktyka-Ekologia-Metrologia*, 2009, **14**(1-2): 69-78.
78. Kaczor A., Zuzańska J.: Efektywność nawożenia siarką kupkówki pospolitej w warunkach zróżnicowanego zaopatrzenia roślin w azot. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 2010, **556**: 135-142.
79. Kałembasa S.: Metody oznaczania siarki w próbkach gleby, materiału roślinnego i nawozów. *Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization*, 2004, **1**(18): 106-113.
80. Kąckowski J.: Nowe poglądy na strukturę i funkcje białek zapasowych zbóż na przykładzie pszenicy (*Triticum aestivum* L.). *Biul. IHAR*, 2002, **223/224**: 3-31.
81. Kiepuł J.: Działanie następcze symulowanej emisji siarki oraz wapnowania na bilans siarki w glebie. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 1999, **467**: 539-545.
82. Kłkocka H., Haneklaus S., Bloem E., Schnug E.: Ocena potrzeb nawożenia ziemniaka siarką. *Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization*, 2003, **4**(17): 143-150.
83. Kłkocka H.: Wpływ nawożenia siarką na plon i skład chemiczny ziarna pszenżyta jarego oraz właściwości gleby. *Fragm. Agron.*, 2004a, **3**: 70-78.
84. Kłkocka H.: Nawożenie ziemniaka siarką. *Fragm. Agron.* 2004b, **3**(83): 80-94.

85. Klikocka H.: Sulphur status in environment. J. Elem., 2005a, **10(3)**: 625-643.
86. Klikocka H.: Wpływ nawożenia siarką na wielkość plonu i stopień porażenia bulw ziemniaka przez *Streptomyces scabies* i *Rhizoctonia solani*. Fragn. Agron., 2005b, **4(88)**: 38-50.
87. Klikocka H.: Prognoza potencjalnych niedoborów siarki w glebach uprawnych Zamojszczyzny – przydatność modelu MOPS. Fragn. Agron., 2005c, **4(88)**: 51-70.
88. Klikocka H.: The effect of sulphur kind and dose on content and uptake of micro-nutrients by potato tubers (*Solanum tuberosum* L.). Acta Sci. Pol., Hortorum Cultus, 2011, **10(2)**: 137-151.
89. Kopriva S., Suter M., Ballmoos P.V., Hesse H., Krahenbuhl U., Rennenberg H., Brunold C.: Interaction of sulphate assimilation with carbon and nitrogen metabolism in lemma minor. Plant Physiol., 2002, **130**: 1406-1413.
90. Koprivova A., Mugford S.T., Kopriva S.: Arabidopsis root growth dependence on glutathione is linked to auxin transport. Plant Cell Rep., 2010, **29**: 1157-1167.
91. Kruse C., Jost R., Hillebrand H., Hell R.: Sulfur-rich proteins and their agrobiotechnological potential for resistance to plant pathogens. Landbauforschung Völkenrode, 2005, Special Issue, **283**: 73-79.
92. Kulczycki G.: Wpływ nawożenia siarką elementarną na plon i skład chemiczny roślin oraz właściwości chemiczne gleby. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2003, **4(17)**: 151-159.
93. Kurowski T.P., Budzyński W.: Wpływ zróżnicowanego nawożenia azotem i ochrony przed szkodnikami na zdrowotność rzepaku jarego. Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, 2003, **XXIV(2)**: 465-473.
94. Kurowski T.P., Majchrzak B., Jankowski K.: Effect of sulfur fertilization on the sanitary state of plants of the family *Brassicaceae*. Acta Agrobot., 2010, **63(1)**: 171-176.
95. Lakkieneni K.C., Abrol Y.P.: Sulfur requirement of crop plants: Physiological Analysis. Fert. News, 1994, **39**: 11-18.
96. Landry J., Lergis-Delaporte S., Ferron F.: Foliar application of elemental sulphur on metabolism of sulphur and nitrogen compounds in leaves of sulphur-deficient wheat. Phytochemistry, 1991, **30(3)**: 729-732.
97. Lee S., Leustek T.: The effect of cadmium on sulfate assimilation enzymes in *Brassica juncea*. Plant Sci., 1999, **141**: 201-207.
98. Lencioni L., Ranieri A., Fergola S., Soldatini G.F.: Photosynthesis and metabolic changes in leaves of rapeseed grown under long-term sulfate deprivation. J. Plant Nutr., 1997, **20(2-3)**: 405-415.
99. Lepiarczyk A., Filipek-Mazur B.: Wpływ nawożenia siarką na plonowanie i skład elementarny ziarna pszenicy ozimej. Cz. I. Wielkość i komponenty plonu ziarna pszenicy ozimej. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 2010, **556**: 167-163.
100. Leustek T., Saito K.: Sulfate transport and assimilation in plants. Plant Physiol., 1999, **120**: 637-643.
101. Lewandowska M., Sirko A.: Recent advances in understanding plant response to sulfur-deficiency stress. Acta Biochim. Pol., 2008, **55(3)**: 457-471.
102. Lityński T., Jurkowska H.: Żyzność gleby i odżywianie się roślin. PWN Warszawa, 1982, ss. 643.
103. Lopez-Bucio J., Cruz-Ramirez A., Herrera-Estrella L.: The role of nutrient availability in regulating root architecture. Curr. Opin. Plant Biol., 2003, **6**: 280-287.
104. Maitani T., Kubota H., Sato K., Yamada T.: The composition of metals bound to class III metallothionein (phytochelatin and its desglycyl peptide) induced by various metals in root cultures of *Rubia tinctorum*. Plant Physiol., 1996, **110**: 1145-1150.

105. Malarz W., Kozak M., Kotecki A.: Wpływ wiosennego nawożenia różnymi nawozami siarkowymi na rozwój i cechy morfologiczne rzepaku ozimego odmiany ES Saphir. Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, 2011a, **XXXII**: 97-106.
106. Malarz W., Kozak M., Kotecki A.: Wpływ wiosennego nawożenia różnymi nawozami siarkowymi na wysokość i jakość plonu nasion rzepaku ozimego odmiany ES Saphir. Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, 2011b, **XXXII**: 107-115.
107. Markowski J.: Wyróżniki jakościowe stosowane w skupie zbóż konsumpcyjnych oraz metody ich oznaczania. 2006. Protokół dostępu: <http://64.233.179.104/search?q=cache:RUj46xtlsHIJ:www.wir.org.pl/raporty/jakosczbz.htm> [23.03.2013]
108. Marschner H.: Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, 1995, pp. 889.
109. McGrath S.P., Zhao F.J.: Sulphur uptake, yield responses and the interactions between nitrogen and sulphur in winter oilseed rape (*Brassica napus*). J. Agr. Sci., 1996, **126**: 53-62.
110. McGrath S.P., Zhao F.J., Blake-Kalff M.M.A.: Sulphur in soils: processes behavior and measurement. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2003, **4(17)**: 28-54.
111. McGrath S.P., Zhao F.J., Blake-Kalff M.M.A.: History and outlook for sulphur fertilisers on Europe. International Fertiliser Society, Proceedings No 497, York, UK, 2002, pp. 23.
112. Mengel K., Kirkby E.A.: Podstawy żywienia roślin. PWRiL, 1983, ss. 527.
113. Millard P., Sharp G.S., Scott N.M.: The effect of sulphur deficiency on the uptake and incorporation of nitrogen in ryegrass. J. Agr. Sci. Camb., 1985, **105**: 510-504.
114. Miś A.: Wpływ wybranych czynników na wodochłonność i właściwości reologiczne glutenu pszenicy zwyczajnej (*Triticum aestivum* L.). Acta Agroph., Rozprawy i Monografie, 2005, **8(128)**: 1-117.
115. Miyazaki J., Yang S.F.: The methionine salvage pathway in relations to ethylene and polyamine biosynthesis. Physiol. Plantarum, 1987, **69**: 366-370.
116. Mortensen J., Eriksen J.: Effect of sulfur on amino acid composition. Norw. J. Agr. Sci., 1994, **15(suppl.)**: 135-142.
117. Moss H.J., Wrigley C.W., MacRitchie F., Randall P.J.: Sulfur and nitrogen effects on wheat. II. Influence on grain quality. Aust. J. Agr. Res., 1981, **32**: 213-226.
118. Motowicka-Terelak T., Terelak H.: Siarka w glebach Polski – stan i zagrożenie. Państwowa Inspekcja Ochrony Środowiska, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa 1998, ss. 106.
119. Motowicka-Terelak T., Terelak H., Witek T.: Liczby graniczne do wyceny zawartości siarki w glebach i roślinach. W: Ocena stopnia zanieczyszczenia gleb i roślin metalami ciężkimi i siarką. Ramowe wytyczne dla rolnictwa, A. Kabata-Pendias, T. Motowicka-Terelak i M. Piotrowska (red.). IUNG Puławy, 1993, **P(53)**: 15-20.
120. Mudd H.D., Datko A.H.: The S-methylmethionine cycle in *Lemna paucicostata*. Plant Physiol., 1990, **93**: 623-630.
121. Naeve S.L., Shibles R.M.: Distribution and mobilization of sulfur during soybean reproduction. Crop Sci., 2005, **45**: 2540-2551.
122. Nikiforova V.J., Kopka J., Tolstikov V., Fiehn O., Hopkins L., Hawkesford M.J., Hesse H., Hoefgen R.: Systems rebalancing of metabolism in response to sulfur deprivation, as revealed by metabolome analysis of Arabidopsis plants. Plant Physiol., 2005, **138**: 304-318, DOI: 10.1104/pp.104053793.
123. Nocito F.F., Lancilli C., Giacomini B., Sacchi G.A.: Sulfur metabolism and cadmium stress in higher plants. Plant Stress, 2007, **1(2)**: 142-156.
124. Noctor G., Gomez L., Vanacker H., Foyer C.H.: Interactions between biosynthesis, compartmentation and transport in the control of glutathione homeostasis and signaling. J. Exp. Bot., 2002, **53**: 1283-1304.

125. Nowak W., Zbrozczyk T.: Wpływ poziomu intensywności uprawy na zawartość niektórych składników mineralnych w ziarnie pszenicy. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 2003, **493**: 439-445.
126. Okhama - Ohtsu N., Wasaki J.: Recent progress in plant nutrition research: cross-talk between nutrients, plant physiology and soil microorganisms. Plant Cell Physiol., 2010, **51(8)**: 1255-1264, DOI: 10.1093/pcp/pcq095.
127. Oleszek W.: Glukozytolany – występowanie i znaczenie ekologiczne. Wiad. Bot., 1995, **39(1/2)**: 49-58.
128. Panak H., Szafrańek R.C.: Przemieszczanie siarki znaczonej izotopem ^{35}S przy dolistnym i dokorzeniowym jej zastosowaniu. Acta Agrobot., 1967, **XX**: 143-151.
129. Pate J.S.: Roots as organs of assimilation of sulfate. Science, 1965, **149**: 547-548.
130. Patorczyk - Pytlík B., Zbrozczyk T., Zimoch A.: Zawartość siarki w niektórych gatunkach roślin łąkowych. Zesz. Nauk. UP we Wrocławiu, Rol., XCII, 2008, **568**: 67-77.
131. Piesiewicz H., Sadkiewicz K., Ambroziak Z.: Wodochłonność mąki – niedoceniony wskaźnik jakości mąki. Przegląd Piekarski i Cukierniczy, 1998, **46(3)**: 5.
132. Płazek A.: Interactions between host plants and pathogens. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1999, **469**: 79-87.
133. Podleśna A.: Air pollution by sulfur dioxide in Poland – impact on agriculture. Phytion, Special issue “Global change”, 2002a, **42(3)**: 157-163.
134. Podleśna A.: Reakcja rzepaku ozimego na zróżnicowane nawożenie siarką. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 2002b, **481**: 335-339.
135. Podleśna A.: Wpływ nawożenia siarką na zawartość i pobieranie składników pokarmowych przez rzepak ozimy. Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, 2004, **XXV**: 627-635.
136. Podleśna A.: Nawożenie siarką jako czynnik kształtujący metabolizm roślin uprawnych i jakość produktów rolnych. Pam. Puł., 2005, **139**: 161-174.
137. Podleśna A.: Wpływ siarki na jakość technologiczną ziarna pszenicy. Pam. Puł., 2010, **152**: 199-213.
138. Podleśna A., Cacak-Pietrzak G.: Kształtowanie plonu oraz parametrów przemysłowych i wypiekowych pszenicy jarej poprzez nawożenie azotem i siarką. Pam. Puł., 2006, **142**: 381-392.
139. 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.
140. Podleśna A., Kocień A.: Intensity of photosynthesis and yielding of maize fertilized with sulfur and nitrogen. Bibl. Fragm. Agron., 2006, **11(I)**: 195-196.
141. Podolska G., Sułek A.: Główne elementy technologii produkcji decydujące o jakości ziarna pszenicy. Pam. Puł., 2002, **130(II)**: 599-603.
142. Potarzycki J.: Rola siarki z superfosfatu prostego w nawożeniu jęczmienia jarego. Cz. II. Wykorzystanie azotu i siarki z nawozów. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2003, **4(17)**: 193-205.
143. Prosser I.M., Purves J.V., Saker L.R., Clarkson D.T.: Rapid disruption of nitrogen metabolism and nitrate transport in spinach plants deprived of sulphate. J. Exp. Bot., 2001, **52(354)**: 113-121.
144. Pusz W., Serafin-Andrzejewska M., Płaskowska E., Kozak M.: The effect of different sulphur rates on seed health of white mustard seeds, cultivar Radena. Prog. Plant Prot./Post. Ochr. Roślin, 2012, **52(3)**: 590-595.

145. Reussi Calvo N.I., Echeverria H.E., Sainz Rozas H.: Usefulness of foliar nitrogen-sulfur ratio in spring red wheat. J. Plant Nutr., 2008, **31**: 1612-1623.
146. Reussi N., Echeverria H., Sainz Rozas H.: Diagnosing sulfur deficiency in spring red wheat: plant analysis. J. Plant Nutr., 2011, **34**: 573-589, DOI: 10.1080/01904167.2011.538118.
147. Roje S.: S-Adenosyl-L-methionine: Beyond the universal methyl group donor. Phytochemistry, 2006, **67**: 1686-1698.
148. Rotkiewicz D., Ojczyk T., Konopka I.: Nawożenie siarką a wartość użytkowa i technologiczna nasion rzepaku. Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, 1996, **XVII**: 257-264.
149. Różyło R., Laskowski J.: Wpływ właściwości pszenicy jarej na wodochłonność mąki. Acta Agroph., 2007, **9(3)**: 755-765.
150. Ruiz J.M., Rivero R.M., Romero L.: Regulation of nitrogen assimilation by sulfur in bean. J. Plant Nutr., 2005, **28**: 1163-1174, DOI: 10.1081/PLN-200063215.
151. Rutkowska B., Szulc W., Stępień W.: Znaczenie obornika jako źródła S i Mg we współczesnych systemach nawożenia. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 2009, **538**: 201-206.
152. Sachdev M.S., Deb D.L.: Nitrogen and S uptake and efficiency in the mustard-moong-maize cropping systems. Fertilizer News, 1990, **35**: 49-55.
153. Sadowski Cz., Baturó A., Lenc L., Trzcíński J.: Występowanie mączniaka rzekomego (*Peronospora parasitica* Pers.ex Fr./Fr.) i mączniaka prawdziwego (*Erysiphe cruciferae* Opiz ex L. Junell) na rzepaku jarym odmiany Star przy zróżnicowanym nawożeniu azotem i siarką. Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, 2002, **XXIII**: 391-408.
154. Salac I., Haneklaus S., Bloem E., Booth E., Sutherland K., Walker K., Schnug E.: Influence of sulfur fertilization on sulfur metabolites, disease incidence and severity of fungal pathogens in oilseed rape in Scotland. Landbauforschung Völkenrode, 2006, **1-2(56)**: 01-04.
155. Scherer H.W.: Sulphur in crop production – invited paper. Eur. J. Agron., 2001, **14**: 81-111.
156. Scherer H.W.: Impact of sulfur on N_2 fixation of legumes. In: Sulfur assimilation and abiotic stress in plants, N.A. Khan, S. Singh and S. Umar (eds). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008, pp. 43-54.
157. Schnug E.: Sulphur nutrition and quality vegetables. Sulphur Agric., 1990, **14**: 3-7.
158. Schnug E., Ceynova J.: Phytopathological aspects of glucosinolates in oilseed rape. J. Agron. Crop Sci., 1990, **165**: 319-328.
159. Schnug E., Gaj R., Haneklaus S.: Visual diagnosis of sulphur nutrition in major agricultural crops. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2003, **4(17)**: 78-91.
160. Schonhof I., Blankenburg D., Müller S., Krumborn A.: Sulfur and nitrogen supply influence growth, product appearance, and glucosinolate concentration of broccoli. J. Plant Nutr. Soil Sci., 2007, **170**: 1-8, DOI: 10.1002/jpln.200620639.
161. Shewry P.R., Tatham A.S., Lazzari P.: Biotechnology of wheat quality. J. Sci. Food Agr., 1997, **73**: 397-406.
162. Shibagaki N., Rose A., McDermott J.P., Fujwara T., Hayashi H., Yoneyama T., Davies J.P.: Selenate-resistant mutants of *Arabidopsis thaliana* identify *Sultr1;2*, a sulfate transporter required for efficient transport of sulfate into roots. Plant J., 2002, **29**: 475-486.
163. Shinmachi F., Buchner P., Stround J.L., Palmer S., Zhao F.J., McGrath S.P., Hawkesford M.J.: Influence of sulfur deficiency on the expression of specific sulfate transporters and the distribution of sulfur, selenium, and molybdenum in wheat. Plant Physiol., 2010, **153**: 327-336, DOI: 10.1104/pp.110.153759.

164. Siemens D.H., Garner S.H., Mitchell-Olds T., Callaway R.M.: Cost of defense in the context of plant competition: *Brassica rapa* may grow and defend. *Ecology*, 2002, **83**(2): 505-517.
165. Siuta A.: Wpływ nawożenia słomą i biomasa międzyplonu ścierniskowego na plonowanie zbóż i wybrane wskaźniki żyzności gleby. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 1999, **467**(1): 245-251.
166. Siuta J., Rejman-Czajkowska M.: Siarka w biosferze. PWRiL, 1980, ss. 393.
167. 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.: Monitoring chemizmu gleb ornych w Polsce w latach 2010–2012. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, 2012, ss. 196.
168. Sitkowski T.: Ocena wartości przemiałowej ziarna pszenicy za pomocą wyników przemiału laboratoryjnego. *Przegląd Zbożowo-Młynarski*, 1994, **38**(6): 23-24.
169. Skwierawska M., Zawartka L., Zawadzki B.: The effect of different rates and forms of applied sulphur on nutrient composition of planted crops. *Plant Soil Environ.*, 2008, **54**(5): 179-189.
170. Skwierawska M., Zawadzki B., Zawartka L., Nogalska A.: Wpływ różnych dawek i form siarki na zawartość i pobranie wapnia przez rośliny. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 2006, **512**: 545-554.
171. Smith I.K.: Sulphate transport in cultured tobacco. *Plant Physiol.*, 1975, **55**: 303-307.
172. Sobczyk M., Haber T., Witkowska K.: Wpływ dodatku płatków owsianych na jakość ciasta i pieczywa pszennego. *Acta Agroph.*, 2010, **16**(2): 423-433.
173. Sobolewski M.: Emisja dwutlenku siarki w Polsce. Kancelaria Sejmu. Biuro Studiów i Ekspertyz, 1992, **19**: 1-8.
174. Stewart B.A., Porter L.K.: Nitrogen-sulfur relationship in wheat (*Triticum aestivum* L.) corn (*Zea mays* L.), and bean (*Phaseolus vulgaris*). *Agron. J.*, 1969, **61**: 267-271.
175. Szulc W.: Potrzeby nawożenia roślin uprawnych siarką oraz metody ich wyznaczania. *Rozprawy Naukowe i Monografie, SGGW Warszawa*, 2008, **332**: 98.
176. Szulc W., Rutkowska B., Łabędowicz J.: Zawartość siarki ogólnej, organicznej i siarczanowej w profilu glebowym w warunkach różnych systemów uprawy gleby. *Ann. UMCS, Sect. E.*, 2004a, **LIX**(1): 55-62.
177. Szulc W., Rutkowska B., Łabędowicz J.: Zawartość siarki siarczanowej w glebie w zależności od roztworu ekstrakcyjnego i systemu nawożenia. *Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization*, 2004b, **1**(18): 129-136.
178. Tabatabai M.A.: Importance of sulphur in crop production. *Biogeochemistry*, 1984, **1**: 45-62.
179. Tabatabai M.A.: Sulfur in agriculture. *Am. Soc. Agron., Madison, Wisconsin*, 1986, pp. 668.
180. Tabe L.M., Droux M.: Sulfur assimilation in developing lupine cotyledons could contribute significantly to the accumulation of organic sulfur reserves in the seed. *Plant Physiol.*, 2001, **126**: 176-187.
181. Thomason W.E., Philips S.B., Pridgen T.H., Kenner J.C., Griffey C.A., Beahm B.R., Seabourn B.W.: Managing nitrogen and sulfur fertilization for improved bread wheat quality in humid environments. *Cereal Chem.*, 2007, **84**(5): 450-462.
182. Till A.R.: Sulphur and sustainable agriculture. *Int. Fertilizer Industry Association, Paris, France*, 2010, pp. 70.
183. Toboła P., Jakubus M.: Ocena wartości nawozowej gipsu oraz siarczanu amonu jako źródeł siarki dla rzepaku. *Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization*, 2003, **4**(17): 56-63.

184. Trawczyński C.: Zawartość siarki ogólnej w glebie w warunkach zróżnicowanego nawożenia organicznego. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2003, **4(17)**: 221-227.
185. Troczyńska J.: System mirozynaza – glukozynolany – charakterystyka i funkcje w roślinie. Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, 2005, **XXVI**: 51-64.
186. Varin S., Cliquet J.B., Personeni E., Avice J.C., Lemauiel-Lavenant S.: How does sulphur availability modify N acquisition of white clover (*Triticum repens* L.)? J. Exp. Bot., 2010, **61(1)**: 225-234, DOI:10.1093/jxb/erp303.
187. Vašák J., Fábry A., Zukaľová H., Morbacher J., Baranyk P.: Systém výroby řepky – česká a slovenská pěstitelská technologie ozimé řepky pro roky 1997–1999. SPZO, Praha, 1997, ss. 116.
188. Wałkowski T., Korbas M.: Odmiany rzepaku ozimego i ochrona przed chorobami grzybowymi. IHAR Poznań, 2000, ss 23.
189. Wang Y.H., Garvin D.F., Kochian L.V.: Nitrate-induced genes in tomato roots. Array analysis reveals novel genes that may play a role in nitrogen nutrition. Plant Physiol., 2001, **127**: 345-359.
190. Wang Z.H., Li S.X., Malhi S.: Effects of fertilization and other agronomic measures on nutritional quality of crops. J. Sci. Food Agric., 2008, **88**: 7-23.
191. Wang M., Zheng Q., Shen Q., Guo S.: The critical role of potassium in plant stress response. Int. J. Mol. Sci., 2013, **14**: 7370-7390.
192. White P.J., Brown P.H.: Plant nutrition for sustainable development and global health. Ann. Bot., 2010, **105**: 1073-1080.
193. Wickenhäuser P., Bloem E., Haneklaus S., Schnug E.: Ecological significance of H₂S emissions by plants – a literature review. Landbauforschung Völkenrode, Special Issue, 2005, **283**: 157-160.
194. Wielebski F.: Nawożenie różnych typów odmian rzepaku ozimego siarką w zróżnicowanych warunkach glebowych. Cz. II. Wpływ na jakość i skład chemiczny nasion. Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, 2006, **XXVII(II)**: 283-297.
195. Wielebski F.: Efektywność nawożenia siarką różnych typów hodowlanych odmian rzepaku w świetle wyników wieloletnich doświadczeń polowych. Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, 2008, **XXIX**: 91-103.
196. Wielebski F.: Wpływ nawożenia siarką w warunkach stosowania zróżnicowanych dawek azotu na plonowanie różnych typów odmian rzepaku ozimego. Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, 2011, **XXXII**: 61-78.
197. Wielebski F., Wójtowicz M., Czernik-Kołodziej K.: Ocena stanu zaopatrzenia w siarkę rzepaku uprawianego na polach doświadczalnych wybranych Zakładów Instytutu Hodowli i Klimatyzacji Roślin. Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, 2000, **XXI**: 466-473.
198. Wieser H., Gutser R., von Toucher S.: Influence of sulphur fertilization on quantities and proportions of gluten protein types in wheat flour. J. Cereal Sci., 2004, **40**: 239-144.
199. Zaroug M.G., Munns D.N.: Nodulation, nitrogen fixation, leaf area, and sugars content in *Lablab purpureus* as affected by sulfur nutrition. Plant Soil, 1979, **53**: 319-328.
200. Zechmann B., Koffler B.E., Russell S.D.: Glutathione synthesis is essential for pollen germination *in vitro*. BMC Plant Biology, 2011, **11**: 54, DOI: 10.1186/1471-2229-11-54.
201. Zengin M., Gökmén F., Yazıcı M.A., Gezgín S.: Effects of potassium, magnesium, and sulphur containing fertilizers on yield and quality of sugar beets (*Beta vulgaris* L.). Turk. J. Agric. For., 2009, **33**: 495-502.

202. Zhao F.J., Hawkesford M.J., Warrilow S.P., McGrath S.P., Clarkson D.T.: Responses of two wheat varieties to sulphur addition and diagnosis of sulphur deficiency. *Plant Soil*, 1996, **181**: 317-327.
203. Zhao F.J., Salmon S.E., Withers P.J.A., Evans E.K., Monaghan J.M., Shevry P.R., McGrath S.P.: Responses of breadmaking quality to sulphur in three wheat varieties. *J. Sci. Food Agr.*, 1999, **79**: 1865-1874.
204. Zhao F.J., Verkampen K.C.J., Birdsey M., Blake-Kalff M.M.A., McGrath S.P.: Use of the enriched stable isotope ^{34}S to study sulphur uptake and distribution in wheat. *J. Plant Nutr.*, 2001, **24**(10): 1551-1560.
205. Zhao Y., Xiao X., Bi D., Hu F.: Effects of sulfur fertilization on soybean root and leaf traits, and soil microbial activity. *J. Plant Nutr.*, 2008, **31**: 473-483.

STUDIA NAD ROLĄ SIARKI W KSZTAŁTOWANIU GOSPODARKI MINERALNEJ ORAZ WIELKOŚCI I JAKOŚCI PLONU WYBRANYCH ROŚLIN UPRAWNYCH

Streszczenie

Słowa kluczowe: zawartość składników pokarmowych, pszenica, rzepak, plon, białko, cechy reologiczne ciasta, choroby grzybowe

W celu rozpoznania wpływu siarki nawozowej na wzrost, rozwój i plonowanie roślin uprawnych oraz zawartość i pobranie azotu, fosforu, potasu, wapnia, magnezu i siarki przeprowadzono serię doświadczeń wazonowych i polowych. Roślinami doświadczalnymi były rzepak ozimy i jary oraz pszenica ozima. Wykazano, że brak nawożenia upraw polowych siarką, a zwłaszcza deficyt siarki w doświadczeniach wazonowych powodował duże zmiany w gospodarce mineralnej tych roślin. Od wczesnych faz rozwojowych rośliny deficytowe w siarkę wykazywały zawyżoną zawartość azotu, fosforu, potasu, wapnia i magnezu przy jednocześnie zaniżonej zawartości siarki. Tak zmieniony skład mineralny roślin towarzyszył zmianom wizualnym w rozwoju i morfologii roślin doświadczalnych. Głównym objawem tych zaburzeń była chloroza liści i łodyg pszenicy oraz antocyjanowy kolor liści młodych roślin rzepaku. Następnie obserwowano zredukowaną, w stosunku do roślin nawożonych siarką, wysokość roślin i ograniczone ich krzewienie, a także deformacje w tworzeniu pędów kwiatostanowych rzepaku i zmniejszoną produkcję pędów kłosowych pszenicy. Silny niedobór siarki prowadził do zmian w budowie liści, łodyg, kwiatów i łuszczyń rzepaku. W efekcie tych zmian rośliny były w stanie zawiązać nieliczne łuszczyzny, z których część opadła przed osiągnięciem dojrzałości, a część była pozbawiona prawidłowo wykształconych nasion. Pszenica uprawiana w obiektach bez siarki reagowała znaczną redukcją plonu ziarna. W doświadczeniach polowych nie stwierdzono tak drastycznych zmian w wyglądzie roślin, a różnice w plonowaniu roślin z obiektów +S i -S nie zawsze były istotne i często zależały od warunków pogodowych oraz lokalizacji doświadczenia. Wykazano ponadto, że w warunkach ścisłych doświadczeń wazonowych niedobór siarki w glebie powodował spadek zawartości tłuszczu w nasionach rzepaku, co nie potwierdziło się w warunkach doświadczenia polowego. Stwierdzono również niejednoznaczny wpływ siarki na zawartość białka w nasionach rzepaku. Pod wpływem nawożenia siarką wzrastał natomiast plon tłuszczu i białka. Technologiczne analizy potwierdziły wpływ siarki nawozowej na niektóre cechy jakościowe ziarna

pszenicy (zawartość białka i glutenu), mąki (zawartość glutenu, współczynnik efektywności przemiału) oraz ciasta (czas rozwoju i stałości, rozmiękczenie, liczba jakości) i wytworzonego pieczywa (objętość). Nawożenie siarką nie zabezpieczało całkowicie rzepaku ozimego przed wystąpieniem chorób grzybowych w okresie wegetacji, ale w znacznym stopniu zmniejszało nasilenie infekcji, szczególnie w odniesieniu do suchej zgnilizny kapustnych, mączniaka prawdziwego i czerni krzyżowych.

STUDIES ON ROLE OF SULFUR AT FORMING OF MINERAL MANAGEMENT AND HEIGHT AND QUALITY OF CHOSEN CROPS YIELD

Summary

Key words: concentration of nutrients, wheat, oilseed rape, yield, protein, rheological features of dough, fungal diseases

In the aim of diagnose of fertilizer sulfur effect on growth, development and yielding of crops as well as concentration and uptake of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium and sulfur, some pot and field experiments were conducted. Experimental plants were winter oilseed rape, spring oilseed rape and winter wheat. It was shown that lack of sulfur fertilization of field crops, and in particularly sulfur deficit at pot experiments caused great changes at mineral management of these plants. Sulfur deficient plants showed from the early developmental phases an excessive concentration of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium and at the same time – decreased concentration of sulfur. Such changed mineral composition of plants was accompanied visual changes at development and morphology of experimental plants. The main symptom of these disturbances was chlorosis of leaves and stems of wheat and anthocyanin pigmentation of leaves of young oilseed rape plants. In compare to plants fertilized with sulfur was observed also reduced plant height and limited their tillering as well as some deformations at forming of oilseed rape flowering stems and decreased production of wheat fertile shoots. Severe deficiency of sulfur led to changes at structure of leaves, stems, flowers and siliques of oilseed rape. In effect of mentioned changes plants were able to set small siliques, a part of which fall before maturation and a part was deprived of proper developed seeds. Winter wheat cultivated at object without sulfur responded a considerably reduction of grain yield. At field experiments was not found such drastic changes at plant morphology and the differences at yielding of plants cultivated at +S and –S objects were not always significant and often were depended on weather conditions and locality of an experiment. It was found moreover, that at conditions of pot experiments sulfur deficit caused a decrease of oil concentration at oilseed rape seeds, what was not confirmed at field experiments. It was found also no identical effect of sulfur on protein concentration at oilseed rape seeds. The yield of oil and protein increased under the influence of this nutrient. Technological analysis confirmed an effect of fertilizer sulfur on some quality features of wheat grain (concentration of protein and gluten), flour (gluten, milling efficiency factor K), dough (time of development and stability, softening of dough, quality number) and bread (volume). Sulfur fertilization did not protect totally oilseed rape against fungal diseases during the vegetation period, but at considerable degree decreased the infection size, particularly in relation to stem cancer, powdery mildew and dark leaf-spot of rape.

ANEKS

WYKAZ PRAC WŁASNYCH WCHODZĄCYCH W SKŁAD
ROZPRAWY HABILITACYJNEJ**pt. Studia nad rolą siarki w kształtowaniu gospodarki mineralnej
oraz wielkości i jakości plonu wybranych roślin uprawnych**

- I. Podleśna A.: Wpływ dogłębowego i dolistnego stosowania siarki na plon i skład mineralny roślin rzepaku ozimego. Ann. UMCS, Sect. E, 2009, LXIV(1): 68-75.
- II. Podleśna A.: Wpływ siarki i azotu na plonowanie i skład elementarny rzepaku jarego. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 2010, 556: 211-217.
- III. Podleśna A.: Wpływ deficytu siarki na gospodarkę składnikami pokarmowymi pszenicy ozimej. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 2010, 545: 237-243.
- IV. Podleśna A. (80%), Kocoń A.: The effect of sulfur and nitrogen on yield and quality of winter oilseed rape. In: Sulfur metabolism in higher plants: regulatory aspects, significance of sulfur in the food chain, agriculture and the environment, A. Sirko, L.J. De Kok, S. Haneklaus, M.J. Hawkesword, H. Rennenberg, K. Saito, E. Schnug and I. Stulen (eds). Margraf Publishers, Germany, 2009, pp. 123-127.
- V. Podleśna A.: Yielding effect of nitrogen and sulfur at pot experiment conditions with winter wheat (*Triticum aestivum* L.). Ecol. Chem. Eng. A, 2011, 18(3): 401-405.
- VI. Podleśna A.: Wstępna ocena potrzeb nawożenia siarką rzepaku ozimego. Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, 2003, XXIV(2): 641-649.
- VII. Podleśna A. (80%), 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.
- VIII. Podleśna A. (70%), Cacak-Pietrzak G.: Effects of fertilization with sulfur on quality of winter wheat: a case study of nitrogen deprivation. In: Sulfur assimilation and abiotic stress in plants, N.A. Khan, S. Singh, S. Umar (eds). Springer Verlag Berlin, Heidelberg, Germany, 2008, pp. 355-366.
- IX. Podleśna A. (60%), Jędryczka M., Lewartowska E.: Występowanie chorób grzybowych na rzepaku ozimym w warunkach zróżnicowanego nawożenia siarką i azotem. Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, 2005, XXVI: 173-184.

DOI: 10.2478/v10081-009-0010-4

ANNALES
UNIVERSITATIS MARIAE CURIE-SKŁODOWSKA
LUBLIN – POLONIA

VOL. LXIV (1)

SECTIO E

2009

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Czarzoryskich 8, 24-100 Puławy
e-mail: ap@iung.pulawy.pl

ANNA PODLEŚNA

Wpływ doglebowego i dolistnego stosowania siarki na plon i skład mineralny roślin rzepaku ozimego

The effect of soil and foliar application of sulfur on the yield and mineral composition of winter oilseed rape plants

Streszczenie. Ze względu na pojawiające się niedobory siarki w glebach Polski powstaje potrzeba wnoszenia tego składnika, w tym również poprzez dokarmianie dolistne roślin. W opracowaniu przedstawiono wyniki z dwuletniego doświadczenia wazonowego, w którym zastosowano dwa sposoby nawożenia rzepaku siarką: doglebowo oraz dolistnie w fazie tworzenia pąków kwiatowych w postaci $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, na tle obiektu kontrolnego, czyli bez siarki w pożywce. Stwierdzono, że rośliny pozbawione siarki zahamowały wzrost i rozwój i nie wykształciły nasion oraz zawierały nadmierną koncentrację większości makroelementów. Siarka zastosowana w oprysku dolistnym została zaabsorbowana przez liście rzepaku, przez co zmianie uległ metabolizm roślin, prowadząc do uruchomienia procesów wzrostu i rozwoju oraz obniżenia nadmiernej koncentracji badanych składników. W efekcie rośliny z tej serii wykształciły łuszczyzny wypełnione nasionami i dały plon w wysokości 70% plonu roślin nawożonych siarką doglebowo.

Słowa kluczowe: rzepak, odmiany, nawożenie siarką, plon, zawartość składników

WSTĘP

Siarka należy do tzw. składników niezbędnych, co oznacza, że spełnia ona w metabolizmie roślin specyficzne funkcje fizjologiczne i nie może być zastąpiona przez żaden inny pierwiastek. Rzekap, jak i inne rośliny z rodziny kapustowatych, należy do roślin siarkolubnych, pobierających duże ilości tego składnika. Ponieważ od końca minionego wieku następuje stałe zmniejszanie się ilości gazowych zanieczyszczeń powietrza zawie-

rających związki siarki, więc pula tego składnika dostępna dla roślin z tego źródła także ulega zmniejszeniu. Niedobór siarki prowadzi do obniżenia plonu nasion, a często także do pogorszenia jego jakości [Podleśna 2002]. Obecne w glebie jony siarczanowe charakteryzują się znaczną łatwością wymywania w głąb profilu glebowego, przez co znaczna część siarki jest tracona dla roślin. W efekcie tych zmian w niektórych rejonach Polski niedobory siarki negatywnie wpływają na wzrost i rozwój roślin. W takiej sytuacji zaleca się poza nawożeniem doglebowym także dokarmianie dolistne rzepaku bądź innych roślin. Jednakże tą drogą można podawać tylko ograniczone ilości siarki, która jest trudno przemieszczana z liści do pozostałych organów. Według Schnuga i in. [1998] tylko do 3% dolistnie podanego siarczanu magnezu oraz 33–35% siarki elementarnej jest wykorzystywane przez rośliny rzepaku.

Celem podjętych badań było sprawdzenie reakcji roślin rzepaku ozimego na sposób i termin zastosowanego nawożenia siarką w aspekcie plonu końcowego i akumulacji głównych składników pokarmowych.

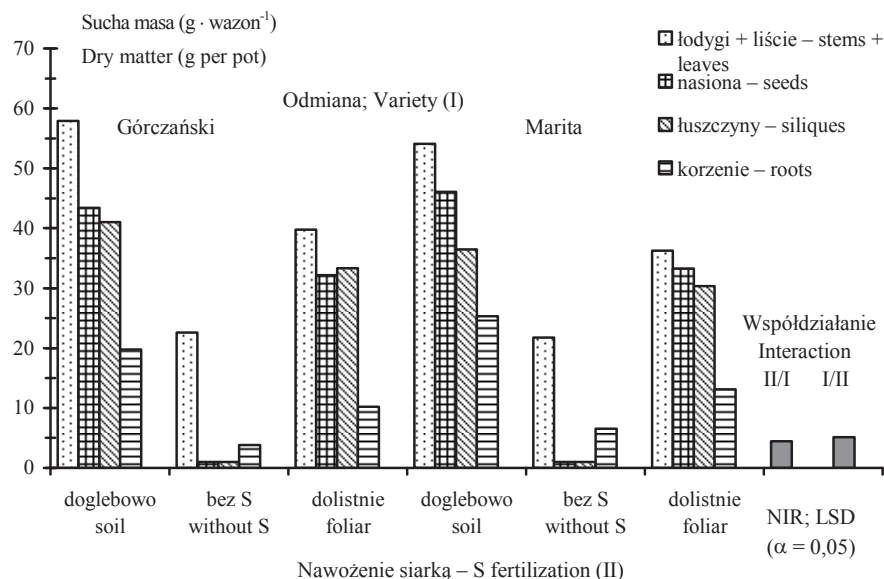
MATERIAŁ I METODY

Prezentowane wyniki pochodzą z doświadczenia wazonowego prowadzonego w hali wegetacyjnej IUNG – PIB w Puławach w latach 1998–2000. W wazonach Mitscherlicha wypełnionych 6,5 kg gleby o pH 6,5 oraz zawierającej 7,1 mg $S-SO_4 \cdot kg^{-1}$ gleby wysiano jesienią po 10 sztuk nasion rzepaku ozimego dwóch odmian. Po wschodach pozostawiono po 5 roślin w przeliczeniu na wazon. Pierwszym czynnikiem doświadczenia było nawożenie siarką, które zróżnicowano na obiekty: 1) nawożenie doglebowe S w postaci siarczanu potasu, siarczanu magnezu i siarczanu amonu w łącznej dawce 1,2 g S wazon⁻¹, 2) dokarmianie dolistne S w postaci roztworu $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, zastosowane w fazie tworzenia pąków kwiatowych, 3) brak nawożenia siarką. Ze względu na małą powierzchnię liści roślin dokarmianych dolistnie oprysk wodnym roztworem $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ wykonywano przez 6 dni po uprzednim zabezpieczeniu powierzchni gleby w wazonach. Całkowita dawka siarki i magnezu podana roślinom wynosiła odpowiednio 0,8 g S i 0,6 g Mg na wazon. Drugim czynnikiem doświadczenia były dwie odmiany rzepaku ozimego: Górczański – tradycyjna (wysokoerukowa i wysokoglukozynolanova) oraz Marita – podwójnie ulepszona. Każdy obiekt doświadczenia miał 5 powtórzeń. Pozostałe składniki pokarmowe były podane w tych samych ilościach dla całego doświadczenia (g · wazon⁻¹): N – 2,5; P – 0,31; K – 1,16 i Mg – 0,22. Nawożenie rzepaku uzupełniono również o zestaw podstawowych mikroelementów a przy zakładaniu doświadczenia do gleby każdego wazonu dodano 3,9 g $CaCO_3$.

Zbiór roślin przeprowadzono w fazie pełnej dojrzałości nasion rzepaku. Zebrane rośliny dzielono na: liście z łodygami, nasiona, łuszczyzny i korzenie. Każdego roku do analiz pobierano próbki materiału roślinnego, które stanowiły średnie próbki obiektowe, natomiast wyniki przedstawione w pracy stanowią średnie z dwu lat badań. Próbkę były analizowane pod kątem zawartości poszczególnych makroelementów przy zastosowaniu następujących metod: azot ogólny i fosfor – metoda spektrofotometryczna, potas – spektrometria emisyjna, wapń i magnez – ASA, siarka – rentgenowska fluorescencja spektroskopowa. Wyniki opracowano statystycznie metodą analizy wariancji przy zastosowaniu programu Statgraphics Plus 5.1.

WYNIKI

Pierwsze objawy zróżnicowanego zaopatrzenia rzepaku w siarkę obserwowano w doświadczeniu wiosną, po podaniu pierwszej dawki N. Rośliny, które od początku wzrostu były żywione siarką, wydłużały pęd i rozwijały nowe liście, podczas gdy rzepak rosnący bez dodatku siarki miał zahamowany wzrost, a liście przybrały kolor jasnozielony. Aplikacja kolejnych dawek azotu spowodowała dalsze zmiany w wyglądzie rzepaku w obiekcie bez siarki, rośliny rzepaku miały krótkie łodygi oraz małe liście zabarwione antocyjanowo. W fazie pąkowania wykształciły niewielkie pąki kwiatowe. W tym czasie rośliny zaopatrzone w siarkę miały wysokie łodygi z zielonymi liśćmi oraz dobrze wykształconymi pąkami. W obiekcie z dolistną aplikacją siarczanu magnezu po 2 tygodniach od przeprowadzenia oprysków zaobserwowano pierwsze wyraźne zmiany w wyglądzie roślin rzepaku. Liście stały się zielone i bardziej elastyczne, a łodygi zaczęły się wydłużać. Następnie rośliny wytworzyły odgałęzienia boczne z licznymi pąkami kwiatowymi, które z pewnym opóźnieniem w stosunku do rzepaku nawożonego doglebowo siarką rozpoczęły kwitnienie i zawiązywanie łuszczyń. Dolistne dokarmienie rzepaku siarczanem magnezu okazało się więc korzystne dla wzrostu i rozwoju roślin, co w efekcie przełożyło się na wytworzenie 73% plonu nasion w porównaniu z roślinami doglebowymi nawożonymi siarką. Rzekpak mający dostęp do siarki mineralnej od początku wegetacji wydał istotnie wyższy plon nasion oraz wytworzył większą masę łodyg, liści, łuszczyń i korzeni (rys. 1). Z kolei rośliny nienawożone siarką doglebowo i niedokarmiane



Rys. 1. Plon rzepaku w zależności od nawożenia siarką i odmiany
Fig. 1. Yield of oilseed rape in dependence on S fertilization and variety

dolistnie wytworzyły niewielki plon masy wegetatywnej. W związku z opadaniem niewielkich łuszczyń w obiekcie tym nie uzyskano nasion. Obie odmiany rzepaku wykazywały podobny typ reakcji na zróżnicowane zaopatrzenie w siarkę. Jednakże odmiana

WPLYW DOGLEBOWEGO I DOLISTNEGO STOSOWANIA SIARKI NA PLON I SKŁAD... 71

Górczański wytwarzała większą masę liści, łodyg i łuszczyń, a odmiana Marita miała większą masę korzeni oraz wyższy plon nasion z wazonu. Niezależnie od wymienionych różnic obie odmiany wyprodukowały zbliżony plon suchej masy roślin z wazonu.

Zróżnicowane żywienie rzepaku siarką wpływało zarówno na końcowy plon badanych odmian, jak i na skład chemiczny poszczególnych organów. Rośliny dokarmiane dolistnie siarczanem magnezu charakteryzowały się wyższą zawartością makroelementów w porównaniu z rzepakiem nawożonym doglebowo (tab. 1). Wyjątek stanowi koncentracja siarki w łodygach i nasionach. Jednak największe zawartości badanych składników stwierdzono w roślinach rosnących bez nawożenia siarką, które wyróżniały się bardzo dużą koncentracją makroelementów w liściach, łodygach i korzeniach. Zawartości te były kilkakrotnie większe w porównaniu ze stwierdzonymi w rzepaku nawożonym siarką doglebowo. Warto podkreślić, iż koncentracje wyższe od średnich stwierdzono również w roślinach dokarmianych dolistnie. Rzepak odmiany Górczański, w porównaniu z odmianą Marita, wykazywał większą koncentrację azotu, siarki, fosforu i wapnia w liściach, łodygach i korzeniach, podczas gdy koncentracja magnezu była podobna w obydwu odmianach (tab. 2).

Tabela 1. Koncentracja (%) i akumulacja ($\text{g} \cdot \text{wazon}^{-1}$) składników pokarmowych w rzepaku ozimym

Table 1. Concentration (%) and accumulation (g per pot) of nutrients in oilseed rape

Nawożenie S S fertilization	Liście + łodygi Leaves + stems	Nasiona Seeds	Łuszczyzny Siliques	Korzenie Roots	Łączne pobranie Total uptake
N					
Doglebowo – Soil	0,59a/0,328a*	2,80a/1,251b	0,42a/0,165a	0,67a/0,152b	1,896c
Bez S – Without S	4,01c/0,892c	-	-	3,03b/0,149b	1,041a
Dolistnie – Foliar	1,14b/0,431b	2,87a/0,937a	0,40a/0,126b	0,72a/0,084a	1,578b
S					
Doglebowo – Soil	0,55b/0,306c	1,24b/0,546b	0,35a/0,133a	0,29b/0,066c	1,051c
Bez S – Without S	0,13a/0,028a	-	-	0,18a/0,006a	0,034a
Dolistnie – foliar	0,60b/0,228b	0,81a/0,263a	0,43a/0,211b	0,32b/0,038b	0,740b
P					
Doglebowo – Soil	0,07a/0,037a	0,65a/0,290a	0,10a/0,038a	0,13a/0,030a	0,395b
Bez S – Without S	0,64b/0,141c	-	-	0,77b/0,038b	0,179a
Dolistnie – foliar	0,15a/0,057b	0,79a/0,257a	0,17b/0,053b	0,21a/0,024a	0,391b
K					
Doglebowo – Soil	1,23a/0,689b	0,78a/0,350a	2,46a/0,952a	0,61a/0,138b	2,129b
Bez S – Without S	2,39b/0,529a	-	-	1,09b/0,056a	0,585a
Dolistnie – foliar	2,04b/0,776b	0,93a/0,304a	3,06b/0,978a	1,10b/0,126b	2,184b
Ca					
Doglebowo – Soil	1,65a/0,924b	0,39a/0,175b	1,16a/0,449b	0,62a/0,140b	1,688c
Bez S – Without S	2,91b/0,646a	-	-	0,96b/0,051a	0,697a
Dolistnie – Foliar	1,81a/0,689a	0,41a/0,134a	1,14a/0,362a	0,66a/0,077a	1,262b
Mg					
Doglebowo – Soil	0,08a/0,044a	0,26a/0,117a	0,03a/0,012a	0,11a/0,024b	0,197b
Bez S – Without S	0,66c/0,146b	-	-	0,25b/0,013a	0,159a
Dolistnie – Foliar	0,33b/0,124b	0,35a/0,113a	0,08b/0,024b	0,10a/0,012a	0,273c

* zawartość/akumulacja – concentration/accumulation

Tabela 2. Koncentracja (%) i akumulacja ($\text{g} \cdot \text{wazon}^{-1}$) składników pokarmowych w rzepaku ozimym

Table 2. Concentration (%) and accumulation (g per pot) of nutrients in oilseed rape

Składnik pokarmowy Nutrient	Odmiana Variety	Liście + łodygi Leaves + stems	Nasiona Seeds	Łuszczyzny Siliques	Korzenie Roots	Łączne pobranie Total uptake
N	Górczański Marita	2,02a/0,589b 1,80a/0,511a	2,84a/1,069a 2,83a/1,120a	0,41a/0,153b 0,41a/0,137a	1,64b/0,112a 1,30a/0,144b	1,923a 1,912a
S	Górczański Marita	0,46a/0,206b 0,39a/0,168a	1,32b/0,520b 0,73a/0,290a	0,30a/0,109a 0,48b/0,161b	0,25a/0,027a 0,28a/0,046b	0,862b 0,665a
P	Górczański Marita	0,31a/0,087b 0,26a/0,069a	0,69a/0,255a 0,74a/0,292b	0,12a/0,041a 0,15a/0,050a	0,42b/0,027a 0,32a/0,033b	0,410a 0,444a
K	Górczański Marita	1,89a/0,695a 1,88a/0,634a	0,87a/0,322a 0,84a/0,332a	2,86a/1,045b 2,68a/0,885a	0,99b/0,095a 0,87a/0,118b	2,157b 1,969a
Ca	Górczański Marita	2,17a/0,792a 2,07a/0,714a	0,39a/0,146a 0,41a/0,164b	1,19a/0,445b 1,10a/0,367a	0,69a/0,072a 0,79b/0,106b	1,455b 1,351a
Mg	Górczański Marita	0,35a/0,109a 0,35a/0,100a	0,31a/0,113a 0,30a/0,117a	0,06a/0,020a 0,05a/0,016a	0,15a/0,014a 0,15a/0,019a	0,256a 0,252a

* zawartość/akumulacja – concentration/accumulation

Większe pobranie makroelementów stwierdzono w roślinach nawożonych doglebowo S, a mniejsze – w rzepaku dokarmianym dolistnie siarczanem magnezu. Rośliny rosnące w warunkach braku pożywki siarkowej wykazywały bardzo dużą akumulację większości składników pokarmowych w liściach, łodygach i korzeniach, jednak nie wykształciły nasion, które są głównym miejscem gromadzenia N, S, P i Mg. Rośliny tradycyjnej odmiany Górczański charakteryzowały się większą akumulacją siarki, fosforu i potasu w porównaniu z rzepakiem podwójnie ulepszonym odmiany Marita.

DYSKUSJA

Przedstawione w pracy wyniki badań wykazują, że deficyt siarki prowadzi do negatywnych zmian w metabolizmie roślin, co ostatecznie powoduje obniżenie jakości i ilości uzyskiwanych plonów. Wskazują one także, że w przypadku niedoboru siarki staje się ona czynnikiem limitującym produkcję, gdyż nie są wówczas wykorzystane inne składniki pokarmowe. Widocznym objawem niedoboru siarki w roślinie są jasnozielone zabarwienia młodych liści, które wynikają ze znacznego zmniejszenia zawartości chlorofilu na jednostkę powierzchni liścia [Baszyński i in. 1972, Dietz 1989, Landry i in. 1991]. Zdaniem Dietza [1989] liście roślin rosnących w warunkach deficytu siarki zawierają mniejszą pulę białka i kwasów nukleinowych, w wyniku czego ich wzrost zostaje zahamowany. Badania Lencioniego i in. [1997] wykazały zmniejszenie aktywności fotosyntetycznej roślin rzepaku, poddanych stresowi niedoboru S. Autorzy ci wykazali także 25% spadek chlorofilu a i b przy wzroście zawartości karotenu oraz 70% redukcję zawartości glukozyolanów, wolnych aminokwasów i innych związków zawierających siarkę. O ponad 70% zmniejszyła się również aktywność enzymu ATP sulfurylasy. Zdaniem tych badaczy długotrwały stres deficytu siarki powoduje u rzepaku powolne zmiany

przez obniżenie natężenia fotosyntezy i konsekwentne przystosowanie metabolizmu dla utrzymania syntezy białka i glutationu. Przedstawione zmiany wewnętrzne uwidaczniają się przez tzw. zmiany makroskopowe obserwowane w pokroju rzepaku, a szczególnie w zahamowanym przyroście masy liści, łodyg i łuszczyń [Schnug i Haneklaus 1994]. Według McGrath i Zhao [1996] powodem produkcji zmienionych kwiatów i aborcji łuszczyń są zaburzenia metabolizmu azotowego wywołane niedoborem siarki w roślinach, w tym głównie przez duże ilości NO_3 akumulowane w liściach oraz znaczne obniżenie aktywności reduktazy azotanowej. Mniej widocznymi efektami niedoboru siarki jest hamowanie rozwoju systemu korzeniowego, co jest zgodne z wcześniejszymi doniesieniami Podleśnej [2002] oraz wysoka koncentracja składników pokarmowych w liściach, łodygach i korzeniach. Nadmierna zawartość N, P, K, Ca i Mg wskazuje, że te składniki zostały pobrane ze środowiska, ale nie mogły być przetransportowane ani rozłokowane w roślinach, ponieważ brak siarki prowadzi do zahamowania wzrostu i rozwoju ich organów. Występuje więc zjawisko przeciwne do „rozcieńczenia” – składniki ulegają „zagęszczeniu” w zmniejszonej masie rośliny. W takim przypadku dolistna aplikacja siarczanu magnezu spowodowała przywrócenie właściwego metabolizmu w roślinach i odblokowanie ich rozwoju.

Dietz [1989] wykazał, że dostarczenie głodującym roślinom pożywki siarkowej powoduje wzrost ich aktywności poprzez syntezę chloroplastów, białka i kwasów nukleinowych. Ponadto w warunkach niedoboru siarki często obserwuje się akumulację argininy, która w około 50% może być użyta do produkcji białka po zasileniu roślin siarczanami [Landry i in. 1991]. Zmiany te mają odbicie we wzroście kinetyki RuBP i fotosyntezy. W efekcie następuje także znaczne obniżenie koncentracji N, P, K, Ca i Mg, a wzrost zawartości S w liściach, łodygach i korzeniach rzepaku. Wprawdzie wartości tych koncentracji są jeszcze często większe niż spotykane w roślinach doglebowo nawożonych siarką [Podleśna 2004], ale są zbliżone do podawanych dla odmian bezerukowych [Szukalski 1984].

Zmiana koncentracji makroelementów w organach rzepaku po dolistnym zastosowaniu siarczanu magnezu spowodowała w większości przypadków zwiększenie ich akumulacji do wartości stwierdzonych w roślinach nawożonych siarką doglebowo. Stwierdzono również, że wielkość akumulacji makroelementów w nasionach w stosunku do całkowitej puli zgromadzonych składników nie różniła się znacznie pomiędzy obiektami nawożonymi siarką doglebowo oraz z zastosowaniem oprysku dolistnego i wynosiła: 66, 70 oraz 15% odpowiednio dla N, P i K. Z kolei akumulacja S i Mg w nasionach roślin dokarmianych dolistnie siarczanem magnezu była istotnie niższa niż w nasionach roślin żywionych doglebowo, chociaż badania Landry i in. [1991] z zastosowaniem siarki znaczonej ^{35}S dowodzą, iż aplikacja siarki na rośliny z deficytem tego składnika zwiększa efektywność i trwanie procesu pobierania S. Jest także sygnałem do uruchomienia zmian w metabolizmie związków S i N obecnych w liściach, dzięki którym zmniejszają się skutki stresu wywołane deficytem.

Uruchomienie właściwych szlaków metabolicznych w roślinach, którym dostarczono siarkę, zauważa się wizualnie jako zmianę zabarwienia liści, przywrócenie ich elastyczności, uruchomienie wzrostu łodygi, a zwłaszcza pędów bocznych oraz normalny proces pąkowania, kwitnienia i zawiązywania łuszczyń z nasionami. Panak i Szafranek [1967] stwierdzili bowiem, że siarka (^{35}S) podana dolistnie przemieszcza się w roślinie mniej więcej równomiernie do liści, łodyg i korzeni, podczas gdy w roślinach żywionych

doglebowo najwięcej tego składnika gromadzi się w liściach, a najmniej w łodygach. W efekcie drastycznych zmian wywołanych głodem siarkowym, a następnie dostarczeniem siarki w formie dolistnej aplikacji siarczanu magnezu możliwe było uzyskanie ponad 70% plonu nasion w porównaniu z plonem roślin nawożonych doglebowo. W pracy nie oszacowano wpływu dawki magnezu wprowadzonej wraz z siarką w oprysku dolistnym, aczkolwiek, podobnie jak w badaniach Schnuga i in. [1998], zastosowana siarka była w wysokim stopniu wykorzystana w produkcji plonu. O korzystnym oddziaływaniu siarczanu magnezu na plon nasion rzepaku w doświadczeniu polowym donoszą także Barłóg i Potarzycki [2000].

Przedstawione objawy deficytu i reakcja roślin na dokarmianie dolistne były takie same u obu badanych odmian. Różnice wynikały głównie z cech genotypowych, bowiem odmiany stare oraz odmiany niskoerukowe charakteryzują się dużą zawartością siarki w nasionach, co wynika z typowej dla tych odmian dużej koncentracji glukozynolanów – wtórnych metabolitów zawierających siarkę [Szukalski 1984]. Koncentracja siarki w nasionach tych odmian jest większa niż zawartość K i P, a znacznie większa niż Ca i Mg, co potwierdzają również badania autorki. Natomiast nowsze, podwójnie ulepszone (OO) odmiany rzepaku wyróżniają się mniejszą zawartością siarki.

WNIOSKI

1. W warunkach doświadczenia wazonowego nawożenie siarką mineralną okazało się konieczne do prawidłowego rozwoju rzepaku ozimego i jego plonowania.
2. Rośliny rzepaku pozbawione siarki zahamowały wzrost i rozwój oraz nie wykształciły nasion. Zawierały też, z wyjątkiem siarki, nadmierne koncentracje badanych makroelementów w organach wegetatywnych i korzeniach.
3. Siarka zastosowana w oprysku dolistnym została zaabsorbowana przez deficytowe w ten składnik rośliny rzepaku, co zmieniło ich metabolizm, prowadząc do uruchomienia wzrostu i rozwoju, w wyniku czego rośliny zakwitły i wydały nasiona. W roślinach tych stwierdzono również wzrost zawartości S oraz zmniejszenie koncentracji N, P, K, Ca i Mg w liściach, łodygach i korzeniach.
4. Zróżnicowane genetycznie odmiany rzepaku podobnie reagowały na zastosowane w doświadczeniu nawożenie siarką, chociaż odmiana Górczański wykazała większą całkowitą akumulację tego składnika i większe jego gromadzenie w nasionach.

PIŚMIENNICTWO

- Barłóg P., Potarzycki J., 2000. Plonotwórcza i ekonomiczna efektywność magnezu zastosowanego dolistnie w uprawie rzepaku ozimego. [W:] Zbilansowane nawożenie rzepaku. Aktualne problemy, pod red. W. Grzebisza, Wyd. AR w Poznaniu, 152–156.
- Baszynski T., Brand J., Barr R., Krogmann W., Crane F.L., 1972. Some biochemical characteristics of chloroplasts from mineral-deficient maize. *Plant Physiol.*, 50, 410–411.
- Dietz K.J., 1989. Recovery of spinach leaves from sulfate and phosphate deficiency. *J. Plant Physiol.*, 134, 551–557.

- Landry J., Legris-Delaporte S., Ferron F., 1991. Foliar application of elemental sulphur on metabolism of sulphur and nitrogen compounds in leaves of sulphur-deficient wheat. *Phytochemistry*, 30 (3), 729–732.
- Lencioni L., Ranieri A., Fergola S., Soldatini G.F., 1997. Photosynthesis and metabolic changes in leaves of rapeseed grown under long-term sulfate deprivation. *J. Plant Nutr.*, 20 (2–3), 405–415.
- McGrath S.P., Zhao F.J., 1996. Sulphur uptake, yield responses and the interactions between nitrogen and sulphur in winter oilseed rape (*Brassica napus*). *J. Agric. Sci.*, 126, 53–62.
- Panak H., Szafrank R.C., 1967. Przemieszczanie siarki znaczonej izotopem ^{35}S przy dolistnym i dokerzeniowym jej zastosowaniu. *Acta Agrobot.*, 20, 143–152.
- Podleśna A., 2002. Reakcja rzepaku ozimego na zróżnicowane nawożenie siarką. *Zesz. Prob. Post. Nauk Rol.*, 481, 335–339.
- Podleśna A., 2004. Wpływ nawożenia siarką na zawartość i pobranie składników pokarmowych przez rzepak ozimy. *Rośl. Oleiste*, 25, 627–636.
- Schnug E., Haneklaus S., 1994. Sulphur deficiency in *Brassica napus*. *Landbauforschung Volkenrode*, 144, 1–31.
- Schnug E., Paulsen H.M., Untiedt H., Haneklaus S., 1998. Fate and physiology of foliar applied sulphur compounds in *Brassica napus*. *Proc. Symp. „Foliar Fertilization: A technique to improve production and decrease pollution”*. 10–14 December 1995, Cairo, Egypt., Publ. NRC, Cairo, 91–100.
- Szukalski H., 1984. Bilans składników i potrzeby nawozowe jakościowo ulepszonych odmian rzepaku. *Nowe Rol.*, 10, 2–7.

Summary. Considering sulfur shortages in Polish soils, there is a necessity of supplying this nutrient by foliar fertilization of plants. In the paper results of a two years' pot experiment are presented where two ways of oilseed rape fertilization with sulfur were used: to soil and foliar fertilization during the budding stage with $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ against the background of control object without S in the nutrient solution. It was found that plants deprived S inhibited the growth and development and did not produce any seeds as well as containing excessive concentration of most of nutrients. Sulfur used as foliar application was absorbed by oilseed rape leaves and as a consequence plant metabolism was changed, which led to growth and plant development processes and a decrease of excessive concentration of nutrients. As a result, plants originating from this object produced siliques filled with seeds and gave a 70% yield in comparison to plants fertilized with sulfur to soil.

Key words: oilseed rape, varieties, fertilization with sulfur, yield, content of nutrients

WPŁYW SIARKI I AZOTU NA PLONOWANIE I SKŁAD ELEMENTARNY RZEPAKU JAREGO

Anna Podleśna

Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia,
Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy w Puławach

Wstęp

Rzepak należy do grupy roślin o dużym zapotrzebowaniu na składniki pokarmowe, w tym także na siarkę. Pojawiające się informacje o stwierdzanym deficycie tego składnika na plantacjach rzepaku, w niektórych rejonach Polski, skupiają się na ogół na przewidywaniu redukcji plonu lub poszukiwaniu prób zaradzenia tym problemom. Doniesienia te wskazują jednocześnie, że w roślinach rosnących w warunkach niedoboru siarki następują zaburzenia na poziomie metabolicznym, które upośledzają wzrost i rozwój roślin, a to w konsekwencji prowadzi do znacznego obniżenia plonu i jego jakości [BASZYŃSKI i in. 1972; DIETZ 1989; PODLEŚNA 2009].

Celem pracy było wykazanie znaczenia siarki i azotu w kształtowaniu gospodarki mineralnej oraz wzrostu, rozwoju i plonowania rzepaku jarego.

Materiał i metody

Doświadczenie prowadzono w dwu sezonach, w hali wegetacyjnej IUNG – PIB w Puławach. Rośliny rzepaku jarego odm. Licosmos w liczbie 5 sztuk rosły w wazonach Mitscherlicha, wypełnionych 6,5 kg gleby o składzie granulometrycznym piasku gliniastego ciężkiego i zawartości siarki poniżej 1 mg S-SO₄·kg⁻¹ gleby. Jako pierwszy czynnik doświadczenia przyjęto rodzaj nawozu azotowego: azotan amonu (kontrola – bez siarki) i zawierający siarkę czteromocznikan siarczanu wapnia – CMSW [KOTUŁA, NOWAK 1998], a jako czynnik drugi – dwie dawki nawożenia azotem: 1,6 i 2,4 g N-wazon⁻¹. W obiektach nawożonych CMSW wraz z azotem rośliny otrzymały także siarkę w ilości: 0,5 i 0,75 g S-wazon⁻¹, odpowiednio dla kolejnych dawek N. Rośliny nawożono również pozostałymi składnikami pokarmowymi, a przez cały okres wegetacji podlewano je wodą zdemineralizowaną. Zbiorów dokonano w fazie tworzenia pąków kwiatowych i dojrzałości pełnej rzepaku, odpowiednio 50 i 89 BBCH. Materiał roślinny poddano analizom na zawartość głównych makroelementów z zastosowaniem następujących metod: S – kolorymetrycznej benzydynowej, N i P – spektrometrii przepływowej, K – emisyjnej spektrometrii płomieniowej, a Ca i Mg – ASA. Wyniki opracowano

statystycznie metodą analizy wariancji przy zastosowaniu programu Statgraphics Plus 5.1.

Wyniki i dyskusja

Już w fazie wykształcania trzeciej pary liści właściwych stwierdzono, że rzepak uprawiany bez siarki (obiekt z NH_4NO_3) miał bladezielone i mniej elastyczne liście o antocyjanowo zabarwionych brzegach. W tym czasie rośliny nawożone siarką (CMSW) wyróżniały się większym wzrostem oraz dużymi, zielonymi i elastycznymi liśćmi. W efekcie rośliny te w fazie tworzenia pąków kwiatowych miały istotnie większą masę liści i łodyg w porównaniu z roślinami uprawianymi bez dodatku siarki (tab. 1). BLAKE-KALFF i in. [2003] uważają, że rozwijające się liście są pierwszymi organami, na których uwidacznia się deficyt siarki. Najczęściej jest to żółknięcie młodych liści wywołane hamowaniem syntezy białka i chlorofilu [BASZYŃSKI i in. 1972]. Ponadto liście roślin, które uprawiano bez siarki zawierają mniej kwasów nukleinowych [DIETZ 1989]. W liściach pszenicy, która była pozbawiona nawozów siarkowych, stwierdzono także istotny spadek zawartości chlorofilu [ZHAO, MCGRATH 1994], co przyjmuje się za główny powód redukcji wzrostu roślin. Wspomniani autorzy wykazali ścisłą zależność liniową pomiędzy zawartością tego barwnika a suchą masą pędu. Z fizjologicznego punktu widzenia jest to podstawowy problem karłowatości rzepaku, bowiem zmniejszenie zawartości chlorofilu wywołuje zmniejszenie aktywności fotosyntetycznej roślin [LENCIONI i in. 1997]. W dalszym rozwoju rzepaku obserwowano nasilenie się objawów niedoboru siarki, tj. karłowatość roślin, „skórzastość” i charakterystyczne wyginanie liści oraz pojawienie się zdeformowanych kwiatów o bladeżółtych płatkach. Takie objawy obserwowane były przez PODLEŚNĄ [2009] oraz MCGRATH'A i ZHAO [1996], którzy opisują, że rośliny rzepaku ozimego rosnące bez pożywki siarkowej miały mniejsze i jasnożółte płatki kwiatowe. Przeważająca część zawiązanych strąków opadła, w wyniku czego w fazie dojrzałości zaledwie kilka strąków pozostało na roślinach. Najmniejszą liczbę łuszczyń na rzepaku, który nie był nawożony siarką, zanotowali także KACZOR i BRODOWSKA [2003]. W rezultacie rośliny pochodzące z tych obiektów wytworzyły niewielkie ilości nasion, co autorzy tłumaczą nie tylko brakiem S, ale także kwaśnym odczynem gleby i niedostateczną zasobnością gleby w magnez. Natomiast w doświadczeniu autorki stwierdzono, że w obiektach bezsiarkowych wystąpił całkowity brak nasion, bowiem opadały zarówno kwiaty, jak również zawiązane nieliczne strąki. Opadanie kwiatów przed zawiązaniem strąków jest uważane również jako typowy efekt deficytu siarki w uprawie rzepaku [BLAKE-KALFF i in. 2003].

W przypadku obu zastosowanych w doświadczeniu nawozów wyższa dawka azotu powodowała na ogół istotny wzrost suchej masy organów rzepaku. Przyrost suchej masy po zastosowaniu wyższego nawożenia N wyniósł w obiektach bezsiarkowych 24 i 20%, a w obiektach z siarką 13 i 29%, odpowiednio dla zbioru roślin dokonanego w fazie tworzenia pąków kwiatowych i dojrzałości pełnej (tab. 1). Natomiast poziom plonów z obiektów nawożonych azotem amonu w fazie tworzenia pąków kwiatowych i dojrzałości pełnej stanowił, w stosunku do obiektów z CMSW, odpowiednio 45,6% i 17,9%. Tak znaczna różnica w wytworzonych plonach wynikała ze zróżnicowanego przyrostu masy liści i łodyg, a w fazie dojrzałości pełnej dodatkowo jeszcze nasion z łuszczykami.

Tabela 1; Table 1

Sucha masa rzepaku w zależności od fazy rozwoju, dawki N i S
oraz rodzaju nawozu (g-wazon⁻¹)

Dry matter of oilseed rape in dependence on development phase and N and S dose
and type of fertilizer (g-pot⁻¹)

Czynnik Treatment	BBCH – 50			BBCH – 89				
	liście leaves	łodygi stems	razem total	liście leaves	łodygi stems	nasiona seeds	łuszczyzny siliques	razem total
N(S) g-wazon ⁻¹ N(S) g-pot ⁻¹ 1,6 (0,50) 2,4 (0,75)	16,8a* 20,4b	5,6a 5,7a	22,4a 26,1b	14,4a 23,8b	23,6a 26,9b	15,1a 18,2b	13,0a 15,2b	66,1a 84,1b
NH ₄ NO ₃ CMSW	12,9a 24,3b	2,3a 9,0b	15,2a 33,3b	12,7a 25,5b	10,1a 40,4b	0,0a 33,3b	0,0a 28,2b	22,8a 127,4b

* liczby oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie; numbers marked with the same letters did not differ significantly

Analizy chemiczne wykazały, że rośliny zebrane z obiektów kontrolnych (bez siarki nawozowej) zawierały w słomie znacznie więcej azotu, fosforu, potasu, wapnia i magnezu, a istotnie mniej siarki w porównaniu do roślin z obiektów nawożonych S (tab. 2), podobnie jak w przypadku rzepaku ozimego [PODLEŚNA 2009]. Natomiast w rzepaku zebranym z obiektów, w których stosowano siarkę w postaci CMSW stwierdzono niższą koncentrację badanych składników. Kształtowała się ona na poziomie zbliżonym do zawartości podawanych w literaturze jako średnie dla uwzględnionych w badaniach faz rozwojowych. Nasiona tych roślin miały również optymalne zawartości oznaczanych makroelementów. GOODROAD i in. [1989] uzyskali jednak wzrost zawartości N, Mg, Fe i Cu w tkankach pszenicy wraz ze wzrostem zawartości siarki, a MCGRATH i ZHAO [1996] nie stwierdzili istotnego wpływu S na koncentrację N w rzepaku w okresie trzech sezonów. Pośrednią pozycję w tych rozważaniach zajmują badania HRIVNÝ i in. [2002], z których wynika, że rośliny młodsze (DC 20-29) wykazują, na ogół, wzrost zawartości makroelementów po zastosowaniu siarki, natomiast rośliny starsze, zwłaszcza na wyższych dawkach N – obniżenie tych wartości. Przedstawione wyniki wskazują, że określana przez HRIVNÝ i in. [2002] „naturalna” zawartość S nie była jednak zbyt niska, bowiem rośliny dały, w tych warunkach, średnio 50% plonu uzyskanego w obiektach o podwyższonej zawartości S. Zatem rośliny te nie miały zmienionego metabolizmu wywołanego ostrym deficytem siarki, kiedy stwierdza się znaczną koncentrację pobranych z podłoża składników, a typowym objawem tych nieprawidłowości jest zahamowanie wzrostu i rozwoju roślin, co stwierdziła PODLEŚNA [2009] w przypadku rzepaku ozimego i, co prawdopodobnie, miało miejsce w doświadczeniu z rzepakiem jarym. W konsekwencji prowadzi to do mniejszego pobrania składników, ponieważ, jak wiadomo, akumulacja składnika jest wypadkową jego zawartości i masy rośliny (tab. 1 i 2). Tymczasem masa rzepaku z obiektów bezsiarkowych była znacznie mniejsza niż roślin rosnących w obiektach zaopatrzonych w S oraz, co ważne – w obiektach tych nie stwierdzono nasion. Zdaniem HRIVNÝ i in. [2002], w warunkach ekstremalnie niskiej zawartości S w roślinach zmiany morfologiczne mogą prowadzić do redukcji plonu. Z kolei MCGRATH i ZHAO [1996] uważają, że zaburzony metabolizm azotowy jest główną przyczyną braku strąków w roślinach nienawożonych siarką. Stwierdzili oni, że

choć pobranie N nie było uzależnione od deficytu S, to jednak ogromne ilości NO_3 gromadziły się w liściach tych roślin. Badania SKWIERAWSKIEJ i in. [2008] wykazały, iż zastosowanie optymalnych dawek S wpływa na obniżenie zawartości oraz wzrost akumulacji w roślinach N, P, K i S. Przedstawione wyżej wyniki wskazują, że zbilansowane nawożenie, uwzględniające także siarkę, wpływa na efektywne wykorzystanie składników pokarmowych i prawidłowy przebieg procesów metabolicznych prowadząc do niezakłóconego wzrostu roślin i wydania zadowalającego plonu nasion.

Tabela 2; Table 2

*Zawartość składników pokarmowych ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) i ich pobranie ($\text{g}\cdot\text{wazon}^{-1}$) przez rzepak jary
Content of nutrients ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) and their uptake ($\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$) by spring oilseed rape

Składnik Nutrient	Czynnik Factor	Słoma; Straw		Nasiona; Seeds		Łączne pobranie Total uptake
		zawartość ¹⁾ content ¹⁾	pobranie ¹⁾ uptake ¹⁾	zawartość content	pobranie uptake	
N	NH_4NO_3	49,8b/33,9b ²⁾	0,77a/0,77b	0,0a	0,00a	0,77a/0,77a
	CMSW	35,4a/6,3a	1,18b/0,62a	25,0b	0,85b	1,18b/1,47b
	N: 1,6	38,2a/19,2a	0,81a/0,53a	12,0a	0,37a	0,81a/0,90a
	2,4	47,0b/21,0a	1,14b/0,86b	12,7a	0,46b	1,14b/1,32b
S	NH_4NO_3	0,4a/0,4a	0,01a/0,01a	0,0a	0,00a	0,01a/0,01a
	CMSW	6,1b/4,9b	0,20b/0,46b	3,2b	0,11b	0,20b/0,57b
	N: 1,6	3,2a/2,7a	0,10a/0,21a	1,4a	0,04a	0,10a/0,25a
	2,4	3,3a/2,6a	0,11a/0,26a	1,8b	0,07b	0,11a/0,33b
P	NH_4NO_3	10,8b/7,3b	0,17a/0,17a	0,0a	0,00a	0,17a/0,17a
	CMSW	5,9a/1,9a	0,20a/0,18a	8,2b	0,28b	0,20a/0,46b
	N: 1,6	7,3a/4,3a	0,15a/0,25a	4,1a	0,12a	0,15a/0,37a
	2,4	9,3b/4,9a	0,21a/0,53b	4,1a	0,15a	0,21a/0,68b
K	NH_4NO_3	34,6a/24,3b	0,53a/0,56b	0,0a	0,00a	0,53a/0,56a
	CMSW	39,2a/18,7a	1,31b/1,76a	9,3b	0,31b	1,31b/2,07b
	N: 1,6	33,8a/20,6a	0,77a/0,98a	4,5a	0,14a	0,77a/1,12a
	2,4	40,0b/22,3a	1,08/1,34b	4,8a	0,18b	1,08b/1,52b
Ca	NH_4NO_3	25,1b/30,4b	0,38a/0,69a	0,0a	0,00a	0,38a/0,69a
	CMSW	16,2a/22,1a	0,54b/2,04b	4,4b	0,15b	0,54b/2,19b
	N: 1,6	21,4a/27,2a	0,45a/1,31a	2,4a	0,07a	0,45a/1,38b
	2,4	19,9a/25,2a	0,47a/1,43a	2,1a	0,08a	0,47a/0,51a
Mg	NH_4NO_3	2,6b/4,0b	0,04a/0,09a	0,0a	0,00a	0,04a/0,09a
	CMSW	1,2a/1,0a	0,04a/0,09a	3,9b	0,13b	0,04a/0,22b
	N: 1,6	2,0a/2,4a	0,04/0,09	1,9a	0,06a	0,04a/0,15a
	2,4	1,8a/2,5a	0,08/0,10	2,0a	0,07a	0,08b/0,17a

¹⁾ pierwsza wartość oznacza dane dla zbioru dokonanego w fazie tworzenia pąków kwiatowych (BBCH–50), a druga w fazie dojrzałości pełnej (BBCH–89); first value means data for harvest performed at flower buds forming phase (BBCH–50) and the second – at full maturity (BBCH–89),

objaśnienia jak pod tabelą 1; explanations see Table 1

W roślinach nawożonych siarką stwierdzono także poprawę stosunku N:S, bowiem miał on wartość 5,8 oraz 5,9, a w przypadku obiektów bezsiarkowych wynosił on w słomie 124 i 77, odpowiednio dla zbioru dokonanego w fazie 50 i 89

BBCH. Zdaniem MCGRATH'a i ZHAO [1996] zarówno N, jak i S miały ogromny, ale przeciwny wpływ na stosunek N:S w roślinie. Jednakże dodatek siarki obniżył wartość stosunku N:S poniżej 10, co obserwowano także w badaniach HRIVNY i in. [2002]. Wyniki uzyskane przez GOODROAD i in. [1989] dla pszenicy ozimej potwierdziły, że stosunek N:S większy niż 22 był zawsze związany z redukcją wzrostu roślin.

Wnioski

1. W warunkach ścisłego doświadczenia wazonowego uprawa rzepaku bez nawożenia siarką prowadziła do nieprawidłowego wzrostu i rozwoju roślin i w efekcie braku plonu nasion bez względu na dawkę azotu.
2. Rzepak rosnący w obiektach kontrolnych (bez nawożenia S) wykazywał znacznie większą zawartość składników pokarmowych i mniejszą ich akumulację w porównaniu z roślinami nawożonymi dodatkowo siarką.
3. Zastosowanie 2,4 g N-wazon⁻¹ spowodowało wzrost suchej masy rzepaku oraz wzrost zawartości N, P i K, a także akumulacji składników w stosunku do roślin nawożonych dawką 1,6 g N-wazon⁻¹.

Literatura

- BASZYŃSKI T., BRAND J., BARR R., KROGMANN W., CRANE F.L. 1972. *Some biochemical characteristics of chloroplasts from mineral-deficient maize*. Plant Physiol. 50: 152–156.
- BLAKE-KALFF M.M.A., ZHAO F., MCGRATH S.P. 2003. *Sulfur deficiency diagnosis using plant tissue analysis*. Nawozy i Nawożenie 3(16): 5–25.
- DIETZ K.J. 1989. *Recovery of spinach leaves from sulfate and phosphate deficiency*. J. Plant Physiol. 134: 551–557.
- GOODROAD L.L., OHKI K., WILSON D.O. 1989. *Influence of sulfur on growth and nutrient composition of red winter wheat*. J. Plant Nutrition 12(8): 1029–1039.
- HRIVNA L., RICHTER R., LOSAK T., HLUSEK J. 2002. *Effect of increasing doses of nitrogen and sulphur on chemical composition of plants, yields and seed quality in winter rape*. Rostlinna Vyroba 48(1): 1–6.
- KACZOR A., BRODOWSKA M.S. 2003. *Wpływ wapnowania i nawożenia siarką na wzrost, rozwój i plonowanie jarych form pszenicy i rzepaku. Cz. II. Rzepak jary*. Acta Agrophysica 1(4): 661–666.
- KOTUŁA E., NOWAK R. 1998. *Czteromocznikan siarczanu wapnia – nawóz azotowo-siarkowo-wapniowy jako alternatywa utylizacji fosfogipsu*. Mat. konf. „Technologie bezodpadowe i zagospodarowanie odpadów w przemyśle i rolnictwie”. Łukęcin: 91–96.
- LENCIONI L., RANIERI A., FERGOLA S., SOLDATINI G.F. 1997. *Photosynthesis and metabolic changes in leaves of rapeseed grown under long-term sulfate deprivation*. J. Plant Nutr. 20(2–3): 405–415.

MCGRATH S.P., ZHAO F.J. 1996. *Sulphur uptake, yield responses and the interactions between nitrogen and sulphur in winter oilseed rape (Brassica napus)*. J. Agric. Sci. 126: 53–62.

PODLEŚNA A. 2009. *Wpływ dogłębowego i dolistnego stosowania siarki na plon i skład mineralny roślin rzepaku ozimego*. Annales UMCS, Sectio E LXIV(1): 68–75.

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 Environ. 54(5): 179–189.

ZHAO F., MCGRATH S.P. 1994. *Extractable sulphate and organic sulphur in soils and their availability to plants*. Plant Soil 164: 243–250.

Słowa kluczowe: rzepak, plon, wzrost i rozwój roślin, skład mineralny, pobranie składnika

Streszczenie

Dwuletnie doświadczenie wazonowe z rzepakiem jarym prowadzono w celu wykazania roli siarki i azotu w kształtowaniu gospodarki mineralnej oraz wzrostu i plonowania rzepaku jarego odm. Licosmos. Źródłem siarki i azotu był czteromocznikan siarczanu wapnia (CMSW), a nawozem kontrolnym (bez siarki) – azotan amonu. Pozostałe składniki były podane w tych samych ilościach i nawozach we wszystkich obiektach. Rośliny zbierano w fazie pąków kwiatowych (50 BBCH) i dojrzałości pełnej (89 BBCH). Po oznaczeniu suchej masy roślin, materiał roślinny zmielono i poddano analizom chemicznym na zawartość głównych makroelementów. Stwierdzono, że rzepak nawożony azotem, ale pozbawiony siarki, miał niekorzystnie zmieniony wzrost i rozwój, w wyniku czego nie zdołał wytworzyć nasion. Analizy chemiczne łodyg i liści tych roślin wykazały, że wyróżniały się one istotnie wyższą zawartością N, P, K, Ca i Mg, a niższą S w porównaniu z rzepakiem żywionym także siarką. Uzyskane wyniki wskazały na nieprawidłowo zmieniony metabolizm wywołany deficytem siarki i potwierdziły niezbędność tego składnika dla właściwego przebiegu wzrostu i rozwoju rzepaku.

EFFECT OF SULFUR AND NITROGEN ON YIELDING AND ELEMENTARY COMPOSITION OF THE SPRING OILSEED RAPE

Anna Podleśna

Department of Plant Nutrition and Fertilization,
Institute of Soil Science and Plant Cultivation – State
Research Institute, Puławy

Key words: oilseed rape, yield, growth and development of plants, mineral composition, nutrient uptake

Summary

A two-year pot experiment with spring oilseed rape was conducted in order to show the role of sulfur and nitrogen in forming of mineral management as well as growth and yielding of spring oilseed rape, Licosmos cv. As a source of nitrogen and sulfur tetra urea calcium sulfate (CMSW) was used and as a control (without sulfur) – ammonium nitrate. The other nutrients were applied at the same amounts and the same fertilizers to all objects. Plants were harvested at bud forming phase (50 BBCH) and in full maturity (89 BBCH). After dry matter determination the vegetative parts and seeds of plants were grounded and analyzed for the content of basic macro-elements. It was found, that oilseed rape fertilized with nitrogen but deprived of sulfur revealed unfavourably changed growth and development and did not contrive to form the seeds. Chemical analysis of stems and leaves showed that these plants were distinguished by significantly higher concentration of N, P, K, Ca and Mg and lower S, in comparison to oilseed rape additionally fed with sulfur. Obtained results indicated on incorrectly changed metabolism caused by sulfur deficit and confirmed the necessity of this nutrient for proper course of oilseed rape growth and development.

Dr Anna Podleśna

Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – PIB

ul. Czartoryskich 8

24-100 PUŁAWY

e-mail: ap@iung.pulawy.pl

WPLYW DEFICYTU SIARKI NA GOSPODARKE SKŁADNIKAMI POKARMOWYMI PSZENICY OZIMEJ

Anna Podleśna

Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia,
Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy, Puławy

Wstęp

Zawartość składników pokarmowych w roślinach waha się w pewnym zakresie w zależności od gatunku, dostępności składników, wieku rośliny i jej plonu. Może być ona także istotnie związana z zaopatrzeniem w inne składniki. Warunki niedoboru składnika powodują pewne zmiany metabolizmu roślin co, w konsekwencji, prowadzi do zmian w pobieraniu składników pokarmowych i ich wykorzystaniu. Jest to często obserwowane jako wizualne objawy na roślinach lub zmiany w ich wzroście i rozwoju a w efekcie końcowym – słabsze plonowanie. W ostatnich latach występuje problem niedoboru siarki w wielu krajach Europy jak i w niektórych rejonach Polski [GRZEBISZ, FOTYMA 1993]. Siarka jest silnie związana metabolicznie z azotem jako głównym składnikiem plonotwórczym w uprawie roślin.

Celem podjętych badań było poznanie wpływu deficytu siarki na zawartość i pobieranie składników pokarmowych przez pszenicę ozimą.

Materiał i metody

Doświadczenie prowadzono w hali vegetacyjnej, w wazonach Mitscherlicha wypełnionych 6,5 kg gleby charakteryzującej się następującą zawartością podstawowych składników: 13,6 – P_2O_5 , 11,6 – K_2O , 3,5 – Mg i < 1 mg $S-SO_4 \cdot kg^{-1}$ gleby oraz pH_{KCl} 5,63. W każdym wazonie rosło 12 roślin pszenicy ozimej odm. Mobeła. Pierwszym czynnikiem doświadczenia był rodzaj nawozu azotowego: saletra amonowa (bez siarki) – NH_4NO_3 oraz czteromocznikan siarczanu wapnia – CMSW [KOTUŁA, NOWAK 1998], a czynnikiem drugim – dawka azotu (g-wazon $^{-1}$): 0,8; 1,6 i 2,4. Oba nawozy miały postać drobnych granул. Wraz z czteromocznikanem siarczanu wapnia do wazonów wprowadzono także następujące dawki siarki (g-wazon $^{-1}$): 0,25; 0,50 i 0,75, odpowiednio dla wzrastających dawek N. Przy zakładaniu doświadczenia do każdego wazonu podano również (g-wazon $^{-1}$): 0,8 P, 1,6 K i 5,4 $CaCO_3$ oraz zestaw mikroelementów. Wilgotność gleby utrzymywana była na poziomie 40–60% ppw, w zależności od fazy rozwojowej pszenicy a do podlewania roślin używano wody zdemineralizowanej. Rośliny zbierano w trzech

fazach wg skali BBCH [ADAMCZEWSKI, MATYSIAK 2005]: 33 – strzelanie w źdźbło, 65 – pełnia kwitnienia oraz 92 – dojrzałość pełna. Z każdego obiektu nawozowego zbierano rośliny z trzech wazonów a prezentowane dane są średnimi z obiektów i lat badań. Oznaczenie zawartości składników pokarmowych wykonano w Głównym Laboratorium Analiz Chemicznych IUNG-PIB w Puławach przy zastosowaniu następujących metod badawczych: N i P – spektrometrii przepływowej, K – emisyjnej spektrometrii płomieniowej oraz S – metody kolorymetrycznej benzydynowej. Wyniki zostały opracowane statystycznie przy pomocy programu Statgraphics 5.1.

Wyniki i dyskusja

Zastosowanie nawożenia pozbawionego siarki spowodowało znaczny wzrost zawartości azotu, fosforu i potasu w roślinach pszenicy oraz istotne obniżenie zawartości siarki (tab. 1). W słomie pszenicy z obiektu nawożonego saletrą amonową stwierdzono znaczne przekroczenie średniej zawartości wymienionych składników podawanych przez LITYŃSKIEGO i JURKOWSKĄ [1982], NOWAKA i ZBROSZCZYKA [2003] oraz CHOJNACKIEGO i BOGUSZEWSKIEGO [1971]. O zwiększonej zawartości makroelementów w roślinach rzepaku uprawianych w obiektach bezsiarkowych donosi PODLEŚNA [2009a] oraz HRIVNA i in. [2002].

Tabela 1; Table 1

Zawartości składników pokarmowych w roślinach pszenicy jarej (%)
Concentration of nutrients in spring wheat plants

Wyszczególnienie Description	Azot; Nitrogen		Fosfor Phosphorus		Potas Potassium		Siarka; Sulphur	
	ziarno grain	słoma straw	ziarno grain	słoma straw	ziarno grain	słoma straw	ziarno grain	słoma straw
1	2	3	4	5	6	7	8	9
33 BBA – strzelanie w źdźbło; shooting								
Nawóz; Fertilizer: NH ₄ NO ₃ CMSW	0,00 0,00	3,09 b* 1,81 a	0,00 0,00	0,62 b 0,45 a	0,00 0,00	2,52 b 1,93 a	0,00 0,00	0,02 a 0,21 b
Azot (g-wazon ⁻¹) N dose (g-pot ⁻¹): 0,8 1,6 2,4	0,00 0,00 0,00	1,46 a 2,51 b 3,38 c	0,00 0,00 0,00	0,44 a 0,55 a 0,63 a	0,00 0,00 0,00	1,84 a 2,25 b 2,59 c	0,00 0,00 0,00	0,04 a 0,13 b 0,19 c
65 BBA – kwitnienie; flowering								
Nawóz; Fertilizer: NH ₄ NO ₃ CMSW	0,00 0,00	2,23 b 1,36 a	0,00 0,00	0,54 b 0,33 a	0,00 0,00	1,97 b 1,23 a	0,00 0,00	0,01 a 0,13 b
Azot (g-wazon ⁻¹) N dose (g-pot ⁻¹): 0,8 1,6 2,4	0,00 0,00 0,00	1,1 a 2,0 b 2,3 b	0,00 0,00 0,00	0,35 a 0,46 a 0,50 a	0,00 0,00 0,00	1,34 a 1,66 a 1,81 ab	0,00 0,00 0,00	0,03 a 0,06 b 0,14 c

1	2	3	4	5	6	7	8	9
92 BBA – dojrzałość pełna; full maturity								
Nawóz; Fertilizer: NH ₄ NO ₃ CMSW	2,63 b 1,77 a	2,40 b 0,41 a	0,44 a 0,38 a	0,57 b 0,19 a	0,59 a 0,53 a	1,91 b 1,20 a	0,03 a 0,30 b	0,01 a 0,13 b
Azot (g-wazon ⁻¹) N dose (g-pot ⁻¹)								
0,8	1,96 a	0,63 a	0,38 a	0,34 a	0,53 a	1,34 a	0,12 a	0,06 a
1,6	2,26 a	1,61 b	0,41 a	0,37 a	0,56 a	1,53 b	0,17 b	0,07 a
2,4	2,40 ab	2,02 b	0,44 a	0,43 b	0,60 a	1,80 c	0,17 b	0,07 a

* liczby w kolumnach i obiektach nawozowych oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie; numbers in columns and objects marked with the same letters did not differ significantly

Obserwowano również tendencję do zwiększania zawartości tych składników także w ziarnie pszenicy, chociaż w przypadku fosforu i potasu różnice były nieistotne. Należy zaznaczyć także, że według danych RASMUSSENA i in. [1977] oraz MILLERA i in. [1994] rośliny pozbawione pożywki siarkowej wykazywały wyjątkowo niską zawartość tego składnika. We wcześniejszych fazach rozwojowych szczególnie duże różnice stwierdzono w przypadku słomy a jak wiadomo znaczną jej część stanowią w tym czasie liście pszenicy. Zdaniem RASMUSSENA i in. [1977] tkanki liści zawierają najwyższe zawartości siarki w związku z tym objawy deficytu są bardziej zaznaczone właśnie w młodych liściach. Zwiększające się dawki azotu powodowały wzrost zawartości wszystkich badanych składników a nieliczne przekroczenia przyjętych dla pszenicy wartości średnich wynikały, na ogół, z uśrednienia nadmiernych zawartości tych składników w roślinach z serii bezsiarkowej (tab. 1).

Z kolei pobieranie makroelementów przez pszenicę wzrastało w obiektach, w których zastosowano czteromocznikan siarczanu wapnia jako nawóz azotowo-siarkowy oraz po zwiększeniu dawek azotu (tab. 2). Zaburzenie metabolizmu pszenicy w tych warunkach prowadziło nie tylko do widocznych zmian we wzroście i rozwoju tych roślin [PODLEŚNA 2009b] ale także do zmian w ich składzie chemicznym. Niezależnie więc od wysokich koncentracji składników w obiektach bezsiarkowych masa tych roślin była mała w porównaniu z roślinami o normalnym tempie rozwoju zaopatrzonych dodatkowo w siarkę mineralną, co wpłynęło na znaczne zmniejszenie ilości zakumulowanych składników. Lepsze zaopatrzenie roślin w azot sprzyjało także przyrostowi ich masy. W rezultacie pszenica zasilona siarką akumulowała w ziarnie około 77% azotu, 59% fosforu i 67% siarki z całkowitej ilości tych składników zgromadzonej przez rośliny w fazie dojrzałości. Natomiast w słomie stwierdzono 75% całkowitej ilości pobranego potasu. Są to wartości zbliżone do podanych przez MILLERA i in [1994]. Dla porównania akumulacja azotu i fosforu w ziarnie roślin deficytowych w siarkę wynosiła odpowiednio 32 i 27%. Należy podkreślić także, że wraz ze wzrostem dawki azotu wzrastało gromadzenie N, P i S w ziarnie a K w słomie pszenicy, w stosunku do całkowitego pobrania tych składników.

Tabela 2; Table 2

Pobranie składników pokarmowych w zależności od nawożenia i fazy rozwojowej (g·wazon⁻¹)
Uptake of nutrients depending on fertilization and developmental phase (g·pot⁻¹)

Wyszczególnienie Specification	Azot; Nitrogen			Fosfor; Phosphorus			Potas; Potassium			Siarka; Sulphur		
	słoma straw	ziarno grain	razem total	słoma straw	ziarno grain	razem total	słoma straw	ziarno grain	razem total	słoma straw	ziarno grain	razem total
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
33 BBA – strzelanie w żółbło; shooting												
Nawóz; Fertilizer:												
NH ₄ NO ₃	0,76	0,00	0,76	0,15	0,00	0,15	0,61	0,00	0,61	0,005	0,000	0,005
CMSW	1,04	0,00	1,04	0,26	0,00	0,26	1,07	0,00	1,07	0,124	0,000	0,124
NIR _{0,05} ; LSD _{0,05}	0,24	–	0,24	0,08	–	0,08	0,14	–	0,14	0,081	–	0,081
Azot (g·wazon ⁻¹); N (g·pot ⁻¹)												
0,8	0,45	0,00	0,45	0,14	0,00	0,14	0,59	0,00	0,59	0,015	0,000	0,015
1,6	0,87	0,00	0,87	0,21	0,00	0,21	0,84	0,00	0,84	0,069	0,000	0,069
2,4	1,39	0,00	1,39	0,28	0,00	0,28	1,11	0,00	1,11	0,111	0,000	0,111
NIR _{0,05} ; LSD _{0,05}	0,34	–	0,34	0,10	–	0,10	0,36	–	0,36	0,322	–	0,323
65 BBA – kwitnienie; flowering												
Nawóz; Fertilizer:												
NH ₄ NO ₃	0,74	0,00	0,74	0,18	0,00	0,18	0,65	0,00	0,65	0,004	0,000	0,004
CMSW	1,19	0,00	1,19	0,28	0,00	0,28	1,03	0,00	1,03	0,120	0,000	0,120
NIR _{0,05} ; LSD _{0,05}	0,36	–	0,36	0,07	–	0,07	0,26	–	0,26	0,084	–	0,065
Azot (g·wazon ⁻¹); N (g·pot ⁻¹)												
0,8	0,45	0,00	0,45	0,14	0,00	0,14	0,56	0,00	0,56	0,020	0,000	0,020
1,6	1,01	0,00	1,01	0,24	0,00	0,24	0,85	0,00	0,85	0,049	0,000	0,049
2,4	1,45	0,00	1,45	0,32	0,00	0,32	1,12	0,00	1,12	0,118	0,000	0,118
NIR _{0,05} ; LSD _{0,05}	0,52	–	0,52	0,96	–	0,96	0,24	–	0,24	0,020	–	0,020

cd. tabeli 2; cont. Table 2												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
92 BBA – dojrzałość pełna; full maturity												
Nawóz; Fertilizer: NH_4NO_3 CMW	0,72	0,34	1,06	0,16	0,06	0,22	0,55	0,07	0,62	0,002	0,004	0,006
	0,30	0,98	1,28	0,14	0,20	0,34	0,87	0,29	1,16	0,095	0,020	0,115
NIR _{0,05} ; LSD _{0,05}	0,18	0,37	r.n.; n.s.	r.n.; n.s.	0,04	r.n.; n.s.	0,26	0,14	0,36	0,042	0,071	0,06
Azot (g·wazon ⁻¹); N (g·pot ⁻¹): 0,8 1,6 2,4	0,19	0,42	0,61	0,10	0,09	0,19	0,47	0,12	0,59	0,033	0,033	0,066
	0,55	0,64	1,19	0,15	0,13	0,28	0,71	0,18	0,89	0,052	0,087	0,139
	0,80	0,92	1,72	0,21	0,18	0,39	0,96	0,24	1,20	0,061	0,112	0,173
NIR _{0,05} ; LSD _{0,05}	0,17	0,12	0,44	0,04	0,03	0,07	0,18	0,05	0,24	0,164	0,052	0,040

Wnioski

1. Pszenica jara pozbawiona pożywki siarkowej wykazywała objawy zaburzenia metabolizmu obserwowane jako zahamowanie wzrostu i rozwoju oraz zmianę składu chemicznego organów wegetatywnych i ziarna.
2. Rośliny uprawiane w warunkach deficytu siarki wykazywały zawyżoną zawartość N, P, K i obniżenie zawartości S w stosunku do wartości uznawanych jako średnie w badanych fazach rozwojowych pszenicy oraz zmniejszoną akumulację wymienionych składników.
3. Wzrastające nawożenie azotowe powodowało wzrost zawartości oraz pobrania składników w słomie (K) i ziarnie (N, P, S) pszenicy.

Literatura

ADAMCZEWSKI K., MATYSIAK K. 2005. *Klucz do określania faz rozwojowych roślin jedno- i dwuliściennych w skali BBCH. Zboża*. IOR Poznań: 15–19.

CHOJNACKI A., BOGUSZEWSKI W. 1971. Zawartość azotu, fosforu i potasu w głównych roślinach uprawnych w Polsce. *Pam. Puławski* 50: 5–28.

GRZEBISZ W., FOTYMA E. 1993. *Ocena odżywienia siarką rzepaku uprawianego w północno-zachodniej Polsce*. *Rośliny Oleiste XVII*: 275–280.

HRIVNA L., RICHTER R., LOSAK T., HLUSEK J. 2002. *Effect of increasing doses of nitrogen and sulphur on chemical composition of plants, yields and seed quality in winter rape*. *Rostlinna Vyroba* 48(1): 1–6.

KOTUŁA E., NOWAK R. 1998. Czteromocznikan siarczanu wapnia – nawóz azotowo-siarkowo-wapniowy jako alternatywa utylizacji fosfogipsu. *Mat. Konf. „Technologie bezodpadowe i zagospodarowanie odpadów w przemyśle” Łukęcin*: 91–96.

LITYŃSKI T., JURKOWSKA H. 1982. *Żyzność gleby i odżywianie się roślin*. PWN Warszawa.

MILLER R.O., JACOBSON J.S., SKOGLEY E.O. 1994. *Aerial accumulation and partitioning of nutrients by hard red spring wheat*. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25(11&12): 1891–1911.

NOWAK W., ZBROSZCZYK T. 2003. *Wpływ poziomu intensywności uprawy na zawartość niektórych składników mineralnych w ziarnie pszenicy*. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 493: 439–445.

PODLEŚNA A. 2009a. *Wpływ dogłębowego i dolistnego stosowania siarki na plon i skład mineralny roślin rzepaku ozimego*. *Annales UMCS, Sectio E, Vol. LXIV*(1): 68–75.

PODLEŚNA A. 2009b. *Yielding effect of nitrogen and sulfur at a pot experiment conditions with winter wheat (*Triticum aestivum* L.)*. *Ecological Chemistry and Engineering A* (w druku).

RASMUSSEN P.E., RAMIG R.E., EKIN L.G., ROHDE C.R. 1977. *Tissue analyses guidelines for diagnosing sulfur deficiency in white wheat*. *Plant and Soil* 46: 153–163.

Słowa kluczowe: doświadczenie wazonowe, pszenica ozima, deficyt siarki, azot, zawartość i pobranie składników

Streszczenie

Pszenicę ozimą uprawiano w wazonach Mitscherlicha. Pierwszym czynnikiem doświadczenia był nawóz azotowy: saletra amonowa (bez S) i czteromocznikan siarczanu wapnia (zawierający S), a czynnikiem drugim – dawka azotu: 0,8, 1,6 i 2,4 g N-wazon⁻¹. Rośliny zbierano w trzech fazach rozwojowych, oznaczano ich masę oraz wykonano analizy chemiczne na zawartość: N, P, K i S. Stwierdzono, że deficyt siarki spowodował zmiany w metabolizmie pszenicy prowadzące do wzrostu zawartości N, P i K w słomie i ziarnie oraz drastycznie niskiej zawartości siarki. Pomimo tego, zmniejszona, w stosunku do pszenicy zaopatrzonej w siarkę, masa tych roślin, powodowała mniejszą akumulację badanych składników pokarmowych. Wyższe dawki azotu wpływały na wzrost koncentracji makroelementów oraz ich pobrania.

EFFECT OF SULFUR DEFICIT ON NUTRIENT MANAGEMENT BY WINTER WHEAT

Anna Podleśna

Institute of Soil Science and Plant Cultivation –
National Research Institute, Puławy

Key words: pot experiment, winter wheat, sulphur deficit, nitrogen, concentration and uptake of nutrients

Summary

Winter wheat was cultivated in Mitscherlich pots. The first experimental factor was nitrogen fertilizer: ammonium nitrate (without S) and tetra urea calcium sulphate (with S), and the second factor – the nitrogen dose: 0.8, 1.6 i 2.4 g N·pot⁻¹. Plants were harvested at three developmental phases and then their mass was evaluated and analysed for the N, P, K and S content. It was found, that sulphur deficit caused changes in plant metabolism which led to N, P and K increase in straw and a drastic low content of S. In spite of this, the decreased mass of those plants, in comparison to wheat supplied with sulphur, caused less accumulation of the studied nutrients. Higher doses of nitrogen influenced the increase of their concentration and uptake.

Dr inż. Anna **Podleśna**

Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa –

Państwowy Instytut Badawczy

ul. Czartoryskich 8

24-100 PUŁAWY

e-mail: ap@iung.pulawy.pl

THE EFFECTS OF SULFUR AND NITROGEN ON YIELD AND QUALITY OF WINTER OILSEED RAPE

Anna Podleśna and Anna Kocoń

*Department of Plant Nutrition and Fertilization, Institute of Soil Science and Plant Cultivation -
National Research Institute, Czartoryskich 8, 24-100 Pulawy, Poland*

Abstract

A pot experiment was conducted with winter oilseed rape in which six doses of sulfur (from 0 to 1.0 g per pot) and two doses of nitrogen (1.4 and 2.8 g per pot) were applied. The purpose of these provocative doses was to show the realistic requirement of oilseed rape for N and S for balanced fertilizer recommendations. The results indicated that deficit as well as excess of S negatively affects yield and seed quality. The optimum effects were found with mean doses of sulfur. Higher doses of N increased seed yield and protein content but on the other hand, decreased oil content in the seeds. These data confirmed that an excessive fertilization of oilseed rape is unfounded.

Sulfur belongs to the essential elements for plant growth. Requirement of plants for sulfur is closely related to N nutrition since most of the organic S in plants is bound in amino acids and proteins. Over the last two decades, however, there has been a fundamental shift in the S balance toward deficit in agricultural systems. In this situation farmers apply considerable amounts of sulfur containing mineral fertilizers in crop production. The dose of S application has to be controlled because severe S deficiency as well as S toxicity may occur in plants and both are harmful for yield and quality of crops (Ahmad *et al.* 1999; Haneklaus *et al.*, 2007; Szymanska 1988). The aim of the current experiment was to test some doses of S (from deficiency up to excess) and N in relation to the actual nutritive requirement of oilseed with respect to yield and quality features.

The two-year experiment was conducted in Mitschelrich pots filled with 6,5 kg of soil. Soil pH was 5.25, and the plant available S content was 1.42 mg SO₄-S kg⁻¹. Five plants of double low, winter oilseed rape var. Kana were grown in every pot. Sulfur was applied at rates of: 0, 2, 4, 6, 8 and 1.0 g per pot and nitrogen at 1.4 (N1) and 2.8 g per pot (N2). Plants were watered according to their requirement. During flowering photosynthetic activity was determined by employing a LiCOR 6400 device. The measurements were performed before noon, in the middle part of leaves, just below the first inflorescence, at PAR = 1000 µmol m⁻² s⁻¹. Plants were harvested at full maturity. In the air-dry seed material the total protein content was evaluated on the base of nitrogen content determined by Kjeldahl method. Oil content was measured with the Soxhlet method. Data are the mean of five replicates and two years.

Photosynthesis is one of the main factors of biomass production. According to Seidler *et al.* (1985) leaves are the prevailing organ at oilseed rape photosynthesis

Sulfur Metabolism in Higher Plants, pp. 123-127

Edited by A. Sirko et al.

© 2009 Margraf Publishers, Germany

because their participation in this process ranges from 100% at rosette to 31% at pods filling stage. At our experiment, maximum rates of photosynthesis were found for plants fertilized with 0.4 - 0.6 (N1) and 0.4 g S per pot (N2). Without fertilizer sulfur the rates were lowest (Fig. 1). Sulfur doses higher than 0.6 g S per pot caused the decrease of photosynthetic rate values at both nitrogen rates, however this decline was lower than observed at objects with sulfur deficit. A decrease in maximum rate of photosynthesis per unit of leaf area with a higher dose of S was found by Kastori *et al.* (2000) in an experiment with sugar beet plants.

Table 1. The effect of sulfur and nitrogen doses on dry matter of oilseed rape at maturity (g per pot)

Fertilization (g per pot)	Plant organ					Total
	Leaves	Stems	Seeds	Pods	Roots	
S dose: 0	18.5 ± 1.2	30.8 ± 1.9	0.0	0.0	8.0 ± 2.3	57.2 ± 3.0
0.2	19.5 ± 1.3	38.4 ± 2.5	35.3 ± 0.6	30.5 ± 0.7	12.6 ± 1.7	136.4 ± 3.0
0.4	20.0 ± 1.2	40.7 ± 0.8	38.7 ± 1.5	31.7 ± 1.9	13.2 ± 0.6	144.3 ± 3.3
0.6	20.1 ± 1.3	43.2 ± 0.1	38.7 ± 1.9	33.2 ± 0.5	13.2 ± 1.4	148.3 ± 3.7
0.8	20.3 ± 0.7	43.2 ± 0.1	38.7 ± 1.8	30.8 ± 0.4	12.8 ± 1.9	145.7 ± 5.1
1.0	19.7 ± 1.6	49.0 ± 0.1	36.3 ± 1.2	32.9 ± 2.2	14.5 ± 1.1	152.4 ± 4.8
N dose: 1.4	18.0 ± 2.4	37.5 ± 1.3	30.6 ± 1.5	26.0 ± 2.5	10.6 ± 1.5	113.9 ± 7.6
2.8	21.4 ± 2.3	44.2 ± 3.0	45.0 ± 3.2	37.7 ± 3.2	12.7 ± 1.8	147.6 ± 8.9

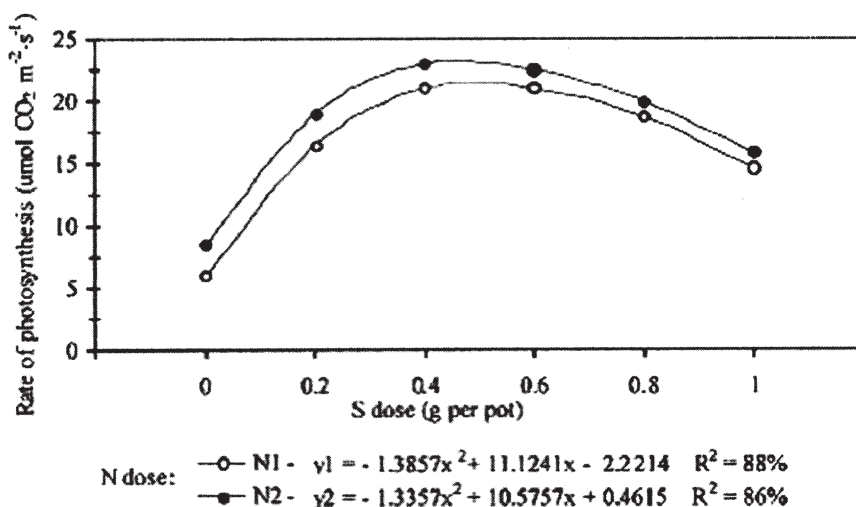


Fig. 1. Effect of N and S on the rate of photosynthesis of oilseed rape leaves.

A higher dose of N caused the increase of dry mass of all oilseed rape organs and particularly yield of seeds and pods (Table 1) although increased nitrogen supply had little influence on photosynthetic rate. According to Kappen *et al.* (1998), increased

nitrogen supply increases productivity through higher leaf area index and extended period of photosynthetic activity. Maintenance of photosynthesis by leaves throughout the growth period, especially at the seed filling stage, is the major requirement for production of adequate carbohydrates to give large seeds and high yield (People *et al.* 1980). Photosynthetic activity of pods was not measured in our experiment but these organs contribute substantially to seed development and yield. Seidler *et al.* (1985) found for oilseed rape that pods prevailed during pod filling and seed maturation. The effect of increasing doses of S on dry mass of various organs of oilseed was different. Plants cultivated without sulfur had the least mass of leaves, stems and roots and did not produce any seeds as in the pot experiment conducted by Horodyski and Krzywinska (1979). Their leaves were small, antocyanine colored and stiff. The effect of S deficiency on roots and yield component is widely shown by Haneklaus *et al.* (2007). Dose of 0.4 g S per pot appeared very favourable for seed yield of oilseed rape. The higher doses did not change of seed yield (0.6 - 0.8 g S per pot) or even caused its decrease (1.0 g S per pot). A similar effect was observed in a pot experiment by Szymanska (1988) and field experiments by Schnug *et al.* (1993) and Ahmad *et al.* (1999). The greatest biomass of oilseed rape was observed with the highest dose of sulfur. Although we did not observe any symptoms of S toxicity in plants, high doses of sulfur and nitrogen probably negatively affected plant metabolism in agreement with the findings of Ahmad *et al.* (1999), Ruiz *et al.* (2005) and Szymanska (1988).

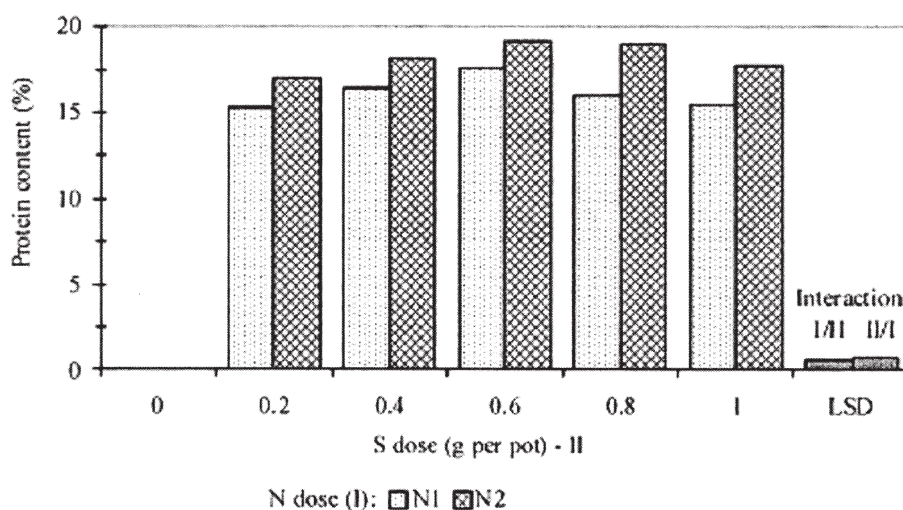


Fig. 2. Interactive effect of N and S doses on protein content of oilseed rape.

Total protein concentration in seeds of oilseed rape was dependent on N and S dose, however the greatest content was found at 0.6 g S per pot and at both N rates (Fig. 2). Sulfur fertilization did not change protein content at field experiments of Horodyski and Krzywinska (1979) and Wielebski and Wojtowicz (2004) probably because of the occurrence of water deficit during growth. According to Tanska and

Rotkiewicz (2003) a positive effect of N on protein increase is closely related with oil content, which decreases at high N doses. It results from negative correlation between protein and oil accumulation in oilseed rape seeds. We found higher oil concentrations at lower dose of N (Fig. 3) in agreement with McGrath and Zhao (1996). Oil content tended to increase up to 0.6 (N1) and 0.8 g S per pot (N2). Higher doses of N and S resulted in a decrease in oil content. According to Ahmad *et al.* (1999) excessive doses of N and S decrease the activity of nitrate reductase and ATP sulfurylase resulting in a reduction of seed and oil yield. We found that under our experimental conditions excessive doses of nitrogen and sulfur as well as deficits had negative effects on yield and quality of oilseed rape.

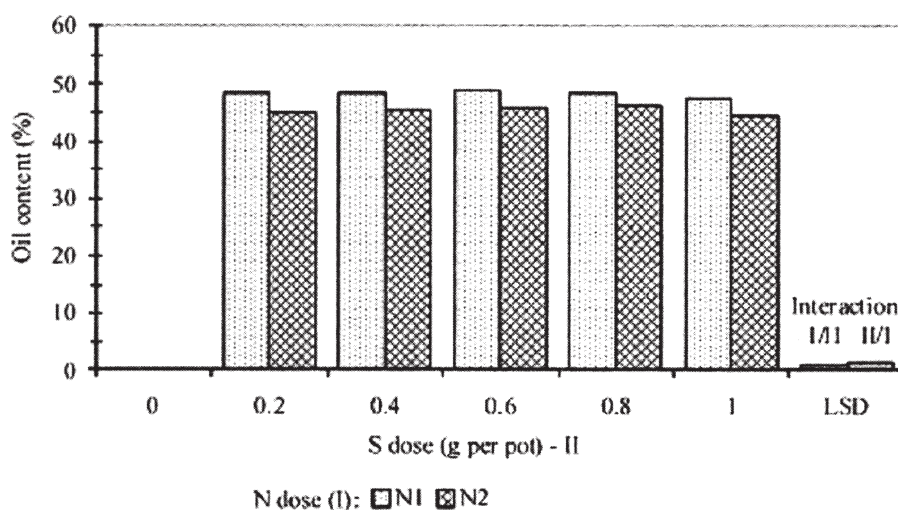


Fig. 3. Interactive effect of N and S on oil content of oilseed rape.

References

- Ahmad, A., Abraham, G. and Abdin, M.Z. 1999. Physiological investigation of the impact of nitrogen and sulphur application on seeds and oil yield of rapeseed (*Brassica campestris* L.) and mustard (*Brassica juncea* L.) Czern. And Coss.) genotypes. J. Agron. Crop Sci. 183: 19-25.
- Kappen, L., Hammler, A. and Schultz, G. 1998. Seasonal changes in the photosynthetic capacity of winter rape plants under different nitrogen regimes measured in the field. J. Agron. Crop Sci. 181: 179-187.
- Kastori, R., Plesnicar, M., Arsenijevic-Maksimovic, I., Petrovic, N., Pankovic, D. and Sakac, Z. 2000. Photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and water relations in young sugar beet plants as affected by sulfur supply. J. Plant Nutr. 23: 1037-1049.
- Haneklaus, S., Bloem, E. and Schnug, E. 2007. Sulfur interactions in crops ecosystems. In: Hawkesford M.J. and De Kok L.J. (eds) Sulfur in Plants - An Ecological Perspective. pp. 17-39, Springer.
- Horodyski, A. and Krzywinska, F. 1979. Sulphur fertilization effects on the winter rape seed yield and its quality. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 229: 101-109 (in Polish).

- McGrath, S.P. and Zhao F.J. 1996. Sulphur uptake, yield responses and the interactions between nitrogen and sulphur in oilseed rape (*Brassica napus*). J Agric. Sc. 126: 53-62.
- People, M.L., Beilharz, V.C., Waters, S.P., Simpson, R.J. and Dalling M.J. 1980. Nitrogen redistribution during grain growth in wheat (*Triticum aestivum* L.) II. Chloroplast senescence and the degradation of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase. Planta 149: 241-251.
- Ruiz, J.M., Rivero R.M. and Romero L. 2005. Regulation of nitrogen assimilation by sulfur in bean. J. Plant Nutr. 28: 1163-1174.
- Schnug E., Haneklaus, S. and Murphy, D. 1993. Impact of sulphur fertilization on fertilizer nitrogen efficiency. Sulphur in Agriculture 17: 8-12.
- Szymanska, M. 1988. The effect of high doses of chlorides and sulfates on yield and nitrogen metabolism of plants at conditions of differentiated mineral nutrition. Habilitation thesis. Agricultural University in Lublin, 109, pp. 1-76 (in Polish).
- Seidler, M., Gwizdek, S. and Wilanowski, L. 1985. Gas exchange process at different growth stages of winter rape. Biul. Hod. Aklim. Ros. 157: 65-74 (in Polish).
- Tanska, M. and Rotkiewicz, D. 2003. Different factors influencing rapeseed quality. Oilseed Crops, XXIV: 595-616 (in Polish).
- Wielebski, F. and Wojtowicz M. 2004. The influence of agrotechnical factors on chemical composition of seeds of restored hybrid in comparison to open pollinated and composite hybrids. Oilseed Crops, XXV, 505-519 (in Polish).

Anna PODLEŚNA¹

**YIELDING EFFECT OF NITROGEN AND SULFUR
AT POT EXPERIMENT CONDITIONS
WITH WINTER WHEAT (*Triticum aestivum* L.)**

**PLONOTWÓRCZE DZIAŁANIE AZOTU I SIARKI
W WARUNKACH DOŚWIADCZENIA WAZONOWEGO
Z PSZENICĄ OZIMĄ (*Triticum aestivum* L.)**

Abstract: The aim of the present research was to proof the yielding role of nitrogen and sulfur in the process of growth and development of winter wheat. The experiment was conducted at a greenhouse, in Mitscherlich pots and soil had a low concentration of sulfur. Three increasing doses of N were applied in this experiment. The N sources were ammonium nitrate (without sulfur) and tetra urea calcium sulfate (with sulfur). No other sulfur fertilizer was used in this experiment. It was found that higher yields of wheat were obtained at objects with use of sulfur containing fertilizer. These plants gave higher yield of grain on all N-S levels in comparison to objects not fertilized with S. Plant supply with N and S produced a larger number of lateral fertile shoots as well as a significantly larger number of grains per ear of main and lateral shoots. Mineral sulfur also caused better plumpness of grain in comparison to parallel objects without sulfur, because in these objects a larger mass of thousand grains was found.

Keywords: pot experiment, winter wheat, nitrogen, sulfur, yield structure

Cereals belong to plants with relatively little requirement for sulfur, however it is known that they uptake up to $20 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$ [1, 2]. It is observed in agriculture the considerable sulfur exhaustion from the soil resources by enlarging cereal participation in cropping system and cultivation of cruciferous plants which have the biggest requirement for this nutrient. As an effect of this process as well as permanent decrease of sulfur compounds emitted to the atmosphere, sulfur becomes a deficit nutrient in some regions of Poland. There is an anxiety that in this nutrient shortage conditions, widespread use of NPK fertilization can appear less effective. Balanced fertilization, which is recommended in recent years, is based on the foundation that plants require all

¹ Department of Plant Nutrition and Fertilization, Institute of Soil Science and Plant Cultivation – National Research Institute, ul. Czarzoryskich 8, 24–100 Puławy, Poland, phone: +48 81 886 34 21 ext. 251, email: ap@iung.pulawy.pl

nutrients, in adequate amounts, for proper development and production of high and good quality yields.

The aim of the present research was to prove the important role of sulfur in the process of growth, development as well as yield formation of winter wheat.

Material and methods

The experiment was conducted at a greenhouse, in Mitscherlich pots filled with 6,5 kg soil with granulometric composition of heavy loamy sand, which was characterized by following parameters ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ soil): 13.6 – P_2O_5 , 11.6 K_2O , 3.5 Mg, < 1 mg S- SO_4 and pH_{KCl} 5,6. In each pots were cultivated 12 plants of winter wheat, cv. Mobela. The first experimental factor was the type of nitrogen fertilizer: ammonium nitrate (without sulfur) and tetra urea calcium sulfate – CMSW (with sulfur) [3], and the second factor – N dose ($\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$): 0.8, 1.6 and 2.4. At objects fertilized with tetra urea calcium sulfate were applied also the following doses of sulfur ($\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$): 0.25, 0.50 and 0.75 for succeeding N doses, respectively. During the establishing of the experiment also 0.8 g P, 1.6 g K and 5.4 g CaCO_3 were applied to every pot. Plants were watered with distilled water and soil moisture was kept on the level of 40–60 % of field water capacity in dependence on the developmental stage of wheat. Three plant harvests, at phases evaluated according to the BBCH scale, were performed in the vegetation period: 33 – shooting, 65 – flowering and 92 – full maturity. During all harvests, plants from 3 pots, from each fertilizer object were harvested. The presented data are the mean from the objects and two years of research. The obtained results were calculated statistically with the use of Statgraphics Program v. 5.1.

Results and discussion

From the phase of the second node there were observed some differences in the growth and development of wheat, in dependence on N dose and supply with sulfur. Plants fertilized with ammonium nitrate, and particularly at low doses of this fertilizer, had light yellow pigmentation of leaves as opposed to dark green leaves of wheat fertilized with tetra urea calcium sulfate, which was also observed by Haneklaus et al [4]. Moreover, in the shooting phase retarding the increase of aboveground part dry mass of plants with sulfur deficit was found in spite of nitrogen supply. In this result the lowest dose of N applied with S gave greater yielding effect than the highest dose of nitrogen alone (Fig. 1). This tendency was maintained up to the end of vegetation. Sulfur shortage in the soil influenced change of wheat growth and development because in plants occurs mutual regulation of the NO_3^- and SO_4^{2-} assimilatory pathways [5], as a result of which the deficit of one nutrient decreases assimilation of the other. Karmoker et al [6] found that barley deprivation of sulfate ions led to decrease of nitrogen transport in plant and lower stomatal conductance, transpiration and photosynthesis. Growth reduction as a consequence of a lack of balance between fertilization with N and S was caused probably by protein synthesis inhibition and lower nitrate reductase activity as well as accumulation of low molecular protein compounds in these

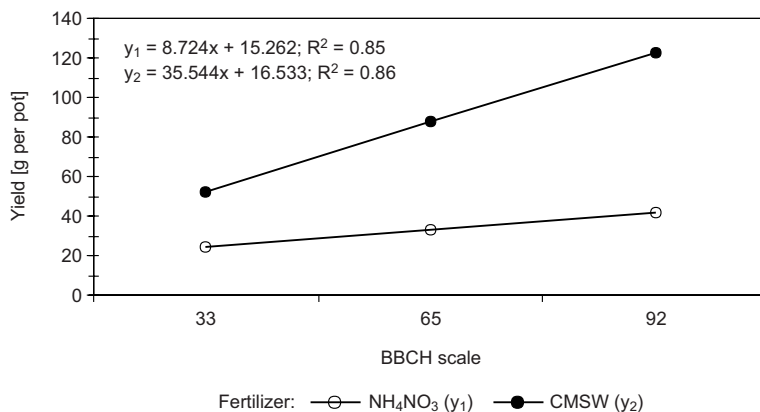


Fig. 1. Aboveground part yield of wheat in dependence on stage of growth and fertilizer

plant vegetative organs [7]. At full maturity it was found, that the used fertilizers and their doses had a significant effect on grain yield, which at objects without sulfur was lower in comparison to the yield found on each N-S level (Fig. 2). Sulfur deficit found at the objects where fertilizers without sulfur were used, caused (mean for N): 75 and 60 % yield reduction of grain and straw, respectively. At a pot experiment conducted by Haneklaus et al [4] and Brodowska [2] wheat from sulfur deficit object gave only 10 and 6 % of seed yield, respectively, in comparison to control. However, Rasmussen et al [8] found in a field experiment a 15 and 20 % seed and straw yield decrease of wheat cultivated in sulfur deficit conditions. In the present author's own research there was observed a significant effect of sulfur and nitrogen on the increase of fertile shoot number, number of grain per ear and number of seeds per plant (Table 1). The obtained results indicated an important role of sulfur in lateral fertile shoot formation as well as their participation in total seeds yield (Fig. 2, Table 1), which was also found in research led by Rasmussen et al [8].

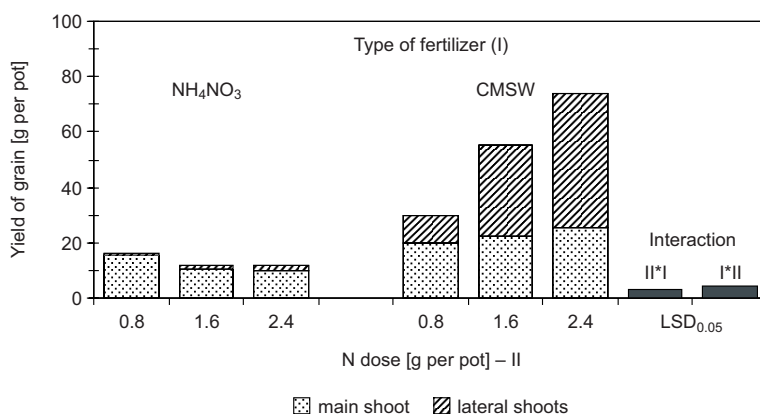


Fig. 2. Yield of wheat grain in dependence on fertilization

Table 1

Yield structure of winter wheat

Fertilizer	N dose [g per pot]	Number of shoots per plant		Number of grain per ear		Number of grain per plant	1000 grain weight [g]
		fertile	sterile	main shoot	lateral shoots		
NH ₄ NO ₃	0.8	0.08	1.5	33.6	1.86	35.2	38.7
	1.6	0.19	1.3	28.8	2.60	31.3	31.2
	2.4	0.39	1.5	28.4	5.10	33.4	29.3
CMSW	0.8	1.00	2.7	35.1	23.8	58.8	42.7
	1.6	2.19	1.7	45.1	70.3	115.3	39.9
	2.4	3.00	1.7	48.7	93.9	142.5	43.3
LSD _{0.05}		0.161	0.089	0.470	0.428	0.399	0.631

Haneklaus et al [4] supposes however, that in deficit conditions an intra-plant competition for sulfur takes place and in its effect lateral shoots are kept alive at the cost of ear growth and number of seeds per ear. In the experimental wheat plants fertilized with sulfur also a higher mass of a thousand seeds was noted (Table 1), although it is not confirmed by Karmoker et al [6]. According to Castle and Randall [9], sulfur shortage causes abridgement of time necessary to kernel cell division and acceleration of storage protein synthesis phase, as a result of which the number of cells and possibility of their filling decrease. Moreover, incorporation of nitrogen to seed protein still requires sulfur supply after the end of flowering [10], which probably affected better seed filling in the present experiment.

Conclusions

1. The use of a fertilizer with sulfur caused positive changes in the growth and development of wheat and as a consequence these plants gave significant higher yield in comparison to plants cultivated without sulfur.
2. Efficiency of nitrogen and its usefulness for the yielding potential of wheat was very low in conditions of sulfur deficit.

Acknowledgement

This paper was elaborated in the range of 2.9 task of Long-term Program of Institute of Soil Science and Plant Cultivation – National Research Institute in Puławy, Poland.

References

- [1] Siuta J. and Rejman-Czajkowska M.: Siarka w biosferze. PWRiL, Warszawa 1980.
- [2] Brodowska M.S.: Acta Agrophys. 2003, 1(4), 617–622.
- [3] Kotuła E. and Nowak R.: Mat. Konf. Technologie bezodpadowe i zagospodarowanie odpadów w przemyśle i rolnictwie. Łukęcin, 18–21.05.1998, pp. 91–96.

- [4] Haneklaus S., Murphy D.P.L., Nowak G. and Schnug E.: Z. Pflanzenernähr. Bodek. 1995, **158**, 83–85.
- [5] Barney P.E. and Bush L.P.: J. Plant Nutr. 1985, **8**, 505–515.
- [6] Karmoker J.L., Clarkson D.T., Saker L.R., Rooney J.M. and Purves J.V.: Planta 1991, **185**, 269–278.
- [7] Brunold C., Von Ballmoos P., Hesse H., Fell D. and Kopriva S.: Sulfur Transport and Assimilation in Plants, J.-C. Davidian et al (eds.), Backuys Publishers, Leiden, The Netherlands 2003, pp. 45–56.
- [8] Rasmussen P.E., Ramig R.E., Ekin L.G. and Rohde C.R.: Plant and Soil, 1977, **46**, 153–163.
- [9] Castele S.L. and Randall P.J.: Aust. J. Plant Physiol. 1987, **14**, 503–516.
- [10] Eriksen J., Nielsen M., Mortensen J.V. and Schjørring J.K.: Plant and Soil 2001, **230**, 239–246.

**PLONOTWÓRCZE DZIAŁANIE AZOTU I SIARKI
W WARUNKACH DOŚWIADCZENIA WAZONOWEGO
Z PSZENICĄ OZIMĄ (*Triticum aestivum* L.)**

Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia

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

Abstrakt: Doświadczenie prowadzono w wazonach Mitscherlicha, na glebie o niskiej zawartości siarki. W doświadczeniu zastosowano trzy wzrastające dawki N z użyciem nawozu bezsiarkowego (saletra amonowa) oraz czteromocznikanu siarczanu wapnia jako źródła azotu i siarki. Stwierdzono, że od początku wzrostu i rozwoju pszenicy wyższe plony suchej masy uzyskano na obiektach, w których stosowano dodatkowo nawożenie siarką. Rośliny dojrzałe, które nawożono siarką, dały wyższy plon ziarna na wszystkich poziomach nawożenia w porównaniu do obiektów nawożonych tylko azotem. Uzyskany wzrost plonu wynikał przede wszystkim ze wzrostu liczby pędów bocznych kłosowych oraz liczby ziaren w kłosie pędu głównego i kłosach pędów bocznych. Po zastosowaniu każdej z dawek siarki stwierdzono również wzrost MTZ w porównaniu do równoległych obiektów N bez siarki.

Słowa kluczowe: doświadczenie wazonowe, pszenica ozima, azot, siarka, struktura plonu

Anna Podleśna

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach

Wstępna ocena potrzeb nawożenia siarką rzepaku ozimego

Preliminary estimation of sulphur fertilization requirements of winter oilseed rape

Słowa kluczowe: doświadczenie polowe, azot, test roślinny, zawartość siarki, plon

Key words: field experiment, nitrogen, plant test, sulphur concentration, yield

Podstawowym warunkiem agrotechnicznym w uprawie rzepaku ozimego jest wysokie nawożenie mineralne, szczególnie w odniesieniu do azotu, potasu i siarki. Do niedawna głównym źródłem siarki były gazowe zanieczyszczenia powietrza. W ostatnich latach nastąpiła około 40% redukcja emisji SO_2 w wyniku czego pod koniec lat 90-tych pojawiły się sygnały o niedoborach siarki na wielu plantacjach rzepaku. Badania monitoringowe wykazały, że ponad połowa gleb uprawnych w Polsce wykazuje niską zawartość tego składnika. Celem badań było rozpoznanie potrzeb nawożenia rzepaku siarką w warunkach doświadczenia polowego. Doświadczenie prowadzono w dwu Zakładach Doświadczalnych IUNG i w dwu powtórzeniach. Pierwszy czynnik stanowiło nawożenie siarką a drugi 6 poziomów nawożenia azotem. Zastosowany w początku kwitnienia test roślinny, określający stan zaopatrzenia rzepaku w siarkę, wykazał duże zróżnicowanie w obrębie stacji oraz lat. Jednak zawartość siarki w liściach rzepaku zależała wyraźnie od nawożenia mineralnego. Wykazano istotny wpływ nawożenia siarką na przyrost plonu nasion i zawartości tego składnika w roślinach dojrzałych, jak również na wzrost jego wykorzystania.

The basic condition of technology of winter oilseed rape cultivation is high mineral fertilization, particularly in relation to nitrogen, potassium and sulphur. Until quite recently the main source of sulphur were gaseous air pollutants. Lately there has been about 40% reduction of SO_2 emission and in consequence in the end of the 90s there were signals about sulphur deficit in many oilseed rape fields. Monitoring studies showed that over half of cultivated soil area in Poland have low concentration of this element. The aim of the studies was to diagnose sulphur fertilization requirements of oilseed rape in field experiment conditions. The experiment was conducted at two Experimental Stations of IUNG and at two replications. The first factor was sulphur fertilization and the second one six levels of nitrogen fertilization. Plant test applied at the beginning of flowering, appointing the state of sulphur supply in rapeseed, showed great differentiation in reference to stations and years. The sulphur content in plants can be a result of weather conditions during winter and early spring and it effects the rate of mineralization. But the low sulphur concentration in young leaves can indicate hidden deficit of S which can be eliminated by fertilization. It was shown that sulphur content in rape leaves clearly depended on mineral fertilization. It was also found that the influence of sulphur fertilization on seed yield and S concentration increase in mature plants as well as on the increase of its utilization was significant.

Wstęp

Rzepak ozimy ma duże wymagania pokarmowe względem azotu, potasu i fosforu, a jako roślina krzyżowa potrzebuje również siarki. Do niedawna składnik ten nie był jednak uwzględniany w nawożeniu roślin ze względu na znaczne zanieczyszczenie atmosfery związkami siarki. Ilość tego składnika dostająca się do gleby z powietrza przewyższała niejednokrotnie potrzeby roślin uprawnych. W wyniku działań proekologicznych oraz zmian w gospodarce krajowej emisja związków siarki ulega ciągłemu zmniejszeniu, przez co następuje zmniejszenie ilości S dostępnej z tego źródła dla roślin (Podleśna 2002a). Pod koniec lat 90. pojawiły się sygnały o niedoborach siarki stwierdzonych na wielu plantacjach rzepaku (Grzebisz i Fotyma 1996, Wielebski i in. 2002). Badania monitoringowe wykazały, że ponad 50% gleb Polski charakteryzuje się niską zawartością tego składnika (Motowicka-Terelak, Terelak 1998). Procesowi temu sprzyja dodatkowo przewaga w kraju gleb lekkich. Jest to zjawisko niepokojące, bowiem wykazano wcześniej niezbędność siarki do prawidłowego wzrostu i plonowania rzepaku (Podleśna 2002, Wielebski 2002). Siarka wpływa również na lepsze wykorzystanie pozostałych składników oraz podnosi naturalną odporność roślin na choroby grzybowe rzepaku (Jędrzycka i in. 2002). W tej sytuacji, pomijane dotąd, nawożenie roślin uprawnych siarką nabiera nowego znaczenia.

Celem pracy była ocena wpływu nawożenia siarką na zawartość tego składnika w roślinach oraz na końcowy plon.

Material i metody badań

Badania prowadzono w dwu sezonach wegetacyjnych 1998/1999 – 1999/2000 w oparciu o wieloletnie doświadczenie polowe prowadzone w Rolniczym Zakładzie Doświadczalnym w Grabowie i Stacji Doświadczalnej IUNG w Baborówku koło Poznania. Obiektem doświadczalnym była Kana, podwójnie ulepszona odmiana rzepaku ozimego. W Grabowie zastosowano normę wysiewu 5,5 kg nasion/ha, natomiast w Baborówku 3,7 kg/ha. Doświadczenie prowadzono w zmianowaniu czteropolowym obejmującym rzepak ozimy, pszenicę ozimą, kukurydzę i pszenicę jară, w dwu powtórzeniach, na glebie o zawartości siarki siarczanowej mniejszej niż 1 mg S-SO₄²⁻/100 g gleby. W dwuczynnikowym doświadczeniu, założonym metodą split-blok, pierwszy czynnik stanowiło nawożenie siarką, a drugi — nawożenie azotem. Połowa doświadczenia nie była nawożona siarką, a w drugiej, równoległej części zastosowano nawozy zawierające ten składnik w ilości: 80 kg S/ha — pierwszy rok badań oraz 94 kg S/ha w Grabowie i 100 kg S/ha w Baborówku — rok drugi. Siarkę stosowano w formie siarczanu amonu, superfosfatu pojedynczego, siarczanu potasu i siarczanu magnezu. W obiektach nie

Wstępna ocena potrzeb nawożenia siarką rzepaku ozimego

643

nawożonych siarką stosowano równoważne ilości azotu, fosforu i potasu w formie nawozów bezsiarkowych. Nawożenie azotem było zróżnicowane na sześć poziomów: 0, 40, 80, 120, 160 i 200 kg N/ha. Rzepak chroniono według zasad standardowej ochrony tego gatunku.

W początku kwitnienia rzepaku zbierano rozwinięte liście pędu, w 1/3 jego długości, począwszy od wierzchołka rośliny (Schnug i Haneklaus 1994a), a w fazie dojrzałości pełnej zebrano rośliny przy pomocy kombajnu poletkowego Seedmaster. Próbkę roślinną wysuszono, zmielono i wykonano analizę zawartości siarki ogólną metodą fluorescencji rentgenowskiej (Schnug i Haneklaus 1994).

Ponieważ uzyskane plony różniły się w zależności od roku, zamieszczone w pracy dane przedstawiają średnie wyniki z dwu powtórzeń, oddzielnie dla każdego roku prowadzenia doświadczenia i każdej stacji. Analizę regresji wykonano za pomocą programu Statgraphics Plus v. 4.0.

Wyniki

Ocenę zaopatrzenia roślin w siarkę w okresie ich wegetacji przeprowadzono w oparciu o klasy zawartości S ogólnej w młodych, w pełni wykształconych liściach rzepaku, opracowane przez Schnuga i Haneklaus (1994). W pierwszym roku badań w części nie nawożonej siarką stwierdzono, że rzepak z połowy obiektów nawozowych N w Baborówku wykazał niedostateczne zaopatrzenie w siarkę (0,48–0,54%), a pozostałe rośliny miały zawartość optymalną (tab. 1). Z kolei rośliny uprawiane w Grabowie w tym roku wykazywały optymalną zawartość tego składnika, tj. 0,56–0,63% S. Wyniki uzyskane w roku 2000 wskazują, że w SD Baborówko utajony niedobór siarki wystąpił tylko w obiekcie o najwyższym nawożeniu azotem. Natomiast rzepak nawożony średnimi dawkami azotu wykazywał optymalne zaopatrzenie w siarkę, a nawożony dawkami niskimi lub nie nawożony azotem miał wysoką zawartość siarki. W Grabowie stwierdzono tylko jeden przypadek niedoboru utajonego, wizualnie niemożliwego do wykrycia, a pozostałe próbki miały optymalną lub wysoką zawartość siarki. Zastosowane nawożenie siarką spowodowało, że wszystkie obiekty azotowe z obu lat wykazały w większości wysoką jej zawartość. Tylko w trzech przypadkach liście zawierały koncentrację S ustaloną dla roślin rzepaku w tej fazie jako optymalną.

Zastosowane nawożenie siarką wpływało istotnie na wzrost plonu nasion w obu latach w Grabowie i w roku 2000 w Baborówku (tab. 2). Stwierdzono także istotny wpływ siarki na plony słomy. Średni przyrost plonu nasion w Grabowie wynosił odpowiednio dla zbioru w 1999 i 2000 roku 0,34 t/ha przy zakresie 0,15–0,81 i 0,27 przy zakresie 0,05–0,30 t/ha. Z kolei w Baborówku ten przyrost był znacznie niższy, bo 0,1 oraz 0,14 t/ha. Największe przyrosty plonów stwierdzano na ogół na obiektach nawożonych siarką i najwyższą dawką azotu. Obliczenia statys-

Tabela 1

Zawartość siarki w liściach rzepaku zebranych w początku kwitnienia (%)

Sulphur concentration in the leaves of oilseed rape harvested at the beginning of flowering

Dawka N <i>N dose</i> [kg/ha]	1999				2000			
	Grabów		Baborówko		Grabów		Baborówko	
	–S	+S	–S	+S	–S	+S	–S	+S
0	0,61	0,76	0,58	0,79	0,96	1,33	0,70	0,64
40	0,57	0,64	0,54	0,99	0,79	1,18	0,65	0,81
80	0,63	0,63	0,60	0,87	0,78	1,25	0,76	0,72
120	0,60	0,64	0,48	0,81	0,64	0,97	0,56	0,68
160	0,63	0,66	0,50	0,84	0,55	0,98	0,59	0,66
200	0,56	0,64	0,65	0,96	0,60	0,95	0,46	0,64

Tabela 2

Wpływ nawożenia siarką i azotem na plony rzepaku ozimego (t/ha)

The effect of sulphur and nitrogen fertilization on yields of winter oilseed rape

Wyszczególnienie <i>Description</i>	1999				2000			
	Grabów		Baborówko		Grabów		Baborówko	
	nasiona <i>seeds</i>	słoma <i>straw</i>	nasiona <i>seeds</i>	słoma <i>straw</i>	nasiona <i>seeds</i>	słoma <i>straw</i>	nasiona <i>seeds</i>	słoma <i>straw</i>
Nawożenie S — <i>S fertilization*</i>								
–S	2,15 a	5,70 a	1,10 a	2,29 a	1,56 a	5,24 a	2,32 a	5,91 a
+S	2,49 b	6,17 b	1,20 a	2,56 a	1,83 b	5,67 b	2,46 b	6,42 b
Nawożenie N — <i>N fertilization</i> [kg/ha]								
0	1,25 a	3,45 a	0,54 a	1,03 a	0,99 a	3,48 a	1,66 a	4,22 a
40	1,46 ab	4,21 ab	0,58 ab	1,15 a	1,17 ab	3,82 a	1,97 b	4,88 ab
80	2,15 b	4,97 bc	0,75 b	1,61 a	1,57 bc	3,93 a	2,09 b	5,26 b
120	2,92 c	6,35 cd	1,18 c	2,37 b	1,81 cd	6,19 b	2,59 c	6,77 c
160	3,00 c	7,14 d	1,85 d	3,84 c	2,35 de	7,30 c	2,98 d	7,81 d
200	3,17 c	9,51 e	1,99 d	4,55 d	2,29 e	8,00 c	3,06 d	8,05 d

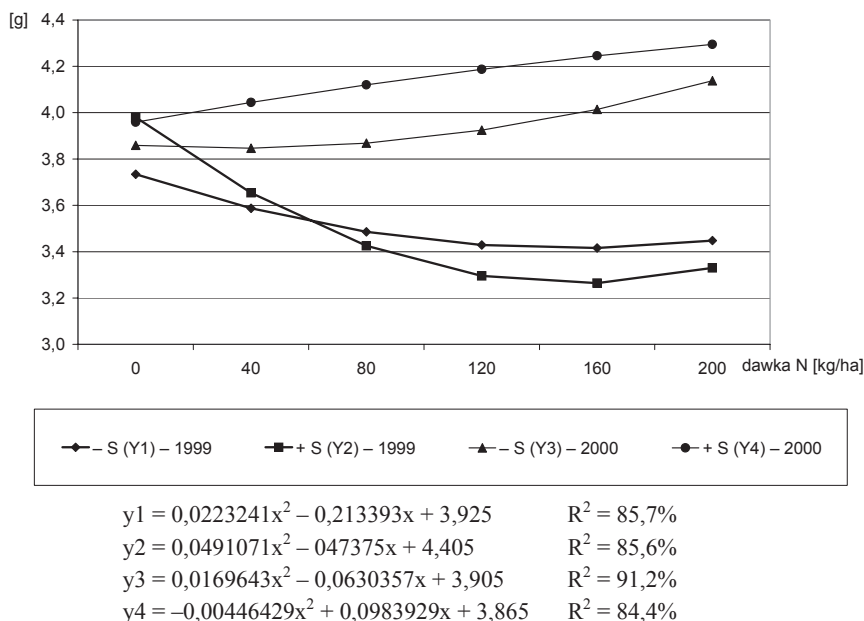
* — liczby w kolumnach oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie
numbers in columns marked with the same letters do not differ significantly

tyczne potwierdzają istotny wpływ nawożenia azotowego na poziom uzyskiwanych plonów (tab. 2) bowiem najwyższe plony nasion i słomy otrzymywano na obiektach nawożonych najwyższą dawką azotu, czyli 200 kg N na hektar. Zdecydowanie najniższe plony uzyskano w 1999 roku w SD Baborówko, kiedy warunki meteorologiczne uniemożliwiły przeprowadzenie zabiegów odchwaszczenia zasie-

Wstępna ocena potrzeb nawożenia siarką rzepaku ozimego

645

wów. W efekcie znacznie zmniejszyła się, i tak niższa niż w Grabowie, obsada roślin, a w konsekwencji także plony. Wpływ nawożenia siarką na masę tysiąca nasion rzepaku zebranego w Grabowie był zróżnicowany w latach i trudno je porównać z reakcją w Baborówku ze względu na brak danych (rys. 1). W pierwszym roku badań, kiedy warunki pogodowe były sprzyjające, masa tysiąca nasion wyraźnie się obniżała wraz ze wzrostem dawki azotu, zwłaszcza w obiektach nawożonych również siarką. W roku drugim przy wysokich temperaturach oraz braku opadów w maju i czerwcu nastąpiło przyspieszone dojrzewanie roślin. W tych warunkach rośliny wydały mniej nasion, ale o większej masie, szczególnie na obiektach nawożonych siarką.



Rys. 1. Wpływ nawożenia siarką na masę 1000 nasion rzepaku ozimego – RZD Grabów
The effect of sulphur fertilization on thousand seeds mass of winter oilseed rape

Zarówno nasiona, jak i słoma rzepaku nawożonego siarką miały istotnie wyższą koncentrację tego składnika w porównaniu do roślin nie nawożonych (tab. 3). Pod wpływem nawożenia siarką większym zmianom ulegała jednak koncentracja S w słomie niż w nasionach. Należy dodać, że nasiona rzepaku uprawianego w SD Baborówko charakteryzowały się stałą w obu latach i wyższą zawartością siarki ogólnej niż nasiona uzyskane w RZD Grabów. Koncentracja siarki w nasionach rzepaku uzależniona była również od dawki nawożenia azotowego i na ogół wzrastała wraz ze wzrostem ilości dostarczonego azotu. Wzrost

zawartości S oraz wzrost plonów rzepaku znalazły odbicie w wielkości pobrania siarki (tab. 3). Rośliny rzepaku nawożone siarką pobierały średnio znacznie więcej tego składnika, podobnie jak rośliny dostatecznie zaopatrzone w azot.

Tabela 3

Zawartość i pobranie siarki przez rośliny rzepaku ozimego

Concentration and uptake of sulphur by winter oilseed rape plants

Wyszczególnienie <i>Description</i>	1999			2000		
	zawartość <i>concentration</i> [%]		pobranie <i>uptake</i> [kg/ha]	zawartość <i>concentration</i> [%]		pobranie <i>uptake</i> [kg/ha]
	nasiona <i>seeds</i>	słoma <i>straw</i>	słoma + nasiona <i>straw + seeds</i>	nasiona <i>seeds</i>	słoma <i>straw</i>	słoma + nasiona <i>straw + seeds</i>
RZD Grabów						
Nawożenie S — <i>S fertilization*</i>						
–S	0,827 a	0,328 a	36,81 a	0,866 a	0,335 a	31,74 a
+S	0,866 b	0,444 b	49,47 b	0,921 b	0,519 b	46,98 b
Nawożenie N — <i>N fertilization</i> [kg/ha]						
0	0,823 a	0,408 a	24,23 a	0,858 ab	0,548 a	28,32 ab
40	0,816 a	0,384 a	28,40 a	0,837 a	0,363 a	23,71 a
80	0,826 a	0,346 a	35,16 ab	0,844 a	0,336 a	26,63 a
120	0,843 ab	0,344 a	46,63 abc	0,880 abc	0,335 a	36,63 abc
160	0,868 ab	0,408 a	55,28 bc	0,960 bc	0,474 a	57,26 bc
200	0,904 b	0,429 a	69,19 c	0,982 c	0,508 a	63,52 c
SD Baborówko						
Nawożenie S — <i>S fertilization*</i>						
–S	0,973 a	0,337 a	19,15 a	0,977 a	0,352 a	43,64 a
+S	1,004 b	0,434 b	23,27 b	1,021 b	0,438 b	53,20 b
Nawożenie N — <i>N fertilization</i> [kg/ha]						
0	0,999 a	0,421 a	9,67 a	0,999 a	0,454 a	34,90 a
40	0,956 a	0,365 a	9,73 a	0,072 a	0,368 a	37,34 ab
80	0,963 a	0,355 a	12,97 a	0,974 a	0,353 a	38,86 ab
120	1,005 a	0,406 a	21,48 b	1,126 a	0,429 a	55,60 bc
160	1,010 a	0,430 a	35,36 c	1,017 a	0,396 a	61,54 c
200	1,006 a	0,397 a	38,08 c	1,015 a	0,389 a	62,38 c

* — liczby w kolumnach oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie
numbers in columns marked with the same letters do not differ significantly

Dyskusja

W obu miejscowościach, gdzie prowadzono doświadczenie, nie stwierdzono w liściach rzepaku zawartości siarki poniżej 0,35%, która według Schnuga i Hanelklaus (1994) daje wizualne objawy niedoboru pierwiastka. W żadnym obiekcie doświadczenia nie stwierdzono także zawartości siarki zbliżonej do 0,38%, jaką Mc Grath i Zhao (1996) przyjmują za krytyczną w fazie wczesnego kwitnienia rzepaku. Stwierdzono natomiast przypadki zawartości niedostatecznej, czyli tzw. niedoboru utajonego, niemożliwego wizualnie do wykrycia. Na najniższych dawkach azotu, gdzie rośliny wytwarzały znacznie niższy plon masy liści i łodyg, zawartość siarki wskazywała na wysoki stopień zaopatrzenia rzepaku w ten składnik. Sytuacja ta mogła wynikać z mniejszego rozcieńczenia siarki, w przeciwieństwie do roślin wyżej nawożonych azotem i tworzących większą masę. Na poletkach nawożonych siarką, niezależnie od poziomu nawożenia N, stwierdzono wysoką zawartość tego składnika. Była ona najwyższa — 1,34% — w roślinach z obiektów nie nawożonych azotem, a najniższa — 0,64% — w roślinach najwyżej nawożonych N. Nawożenie siarką wyraźnie zwiększało jej koncentrację w liściach rzepaku, bowiem w obiektach nawożonych S stwierdzano zawartość tego składnika powyżej 0,65%. Pozytywny wpływ nawożenia siarką na jej zawartość w młodych liściach rzepaku stwierdziła również Boreczek (2001).

Porównując wpływ nawożenia siarką na plon nasion rzepaku ozimego w latach 1998/1999 i 1999/2000 stwierdzono znaczne różnice w jego wysokości w badanych sezonach wegetacyjnych i miejscowościach. Trudno także porównać uzyskane plony z wynikami testu roślinnego na zawartość siarki. Jednak istotny wzrost plonu nasion i słomy rzepaku stwierdzony w doświadczeniu wskazuje na występowanie zapotrzebowania roślin na nawożenie siarką. W ostatnich 15 latach aż 37% badanych pól rzepaku ozimego i jarego uprawianego w Anglii wykazało istotny wzrost plonu po aplikacji siarki (Zhao i in. 2002). Potrzeba nawożenia siarką znacznie wzrasta szczególnie przy wysokim nawożeniu azotem często stosowanym w uprawie rzepaku. Ze wzrostem dawek azotu wzrasta plon i zwiększa się zapotrzebowanie roślin na siarkę, co w warunkach Polski stwierdziły również Krauze i Bowszys (2000) oraz Jabłoński i Horodyski (1981), a w Kanadzie Janzen i Bettany (1984). Brak istotnego wpływu siarki na plon rzepaku w tym jednym przypadku świadczy dobitnie o wzajemnym powiązaniu wielu czynników środowiskowych. Okazuje się, że zastosowane nawożenie mineralne nie przyniosło efektu w niekorzystnych warunkach pogodowych, które przełożyły się na znaczne zmniejszenie obsady rzepaku. Niekiedy czynnikiem ograniczającym wykorzystanie siarki może być niedobór innego składnika pokarmowego, np. magnezu (Krauze i Bowszys 2000).

Analizując uzyskane wyniki można zauważyć, że pomimo znacznego zróżnicowania wielkości plonów uzyskanych w obu Stacjach Doświadczalnych zarówno zawartość siarki w nasionach i słomie rzepaku, jak i jej pobranie utrzymują się na

tym samym poziomie w ciągu dwu lat badań. Znamienne są różnice pomiędzy miejscowościami, które mogą wskazywać na wpływ innych czynników, takich jak właściwości gleby czy dopływ siarki z atmosfery. Przebieg pogody w okresie zimy (ilość opadów) i wczesnej wiosny (tempo mineralizacji) ma duży wpływ na zaopatrzenie roślin w siarkę po ruszeniu wiosennej wegetacji. Bardzo często czynnik ten sprzyja występowaniu okresowych niedoborów siarki i wydaje się prawdopodobne, że odegrał istotną rolę w badaniach autorki.

Stosunkowo niska zawartość siarki w młodych liściach rzepaku zebranych w Baborówku w 1999 roku z obiektów nie nawożonych tym składnikiem nie znalazła odbicia w koncentracji S w roślinach dojrzałych. Ta niska koncentracja siarki we wczesnych fazach wiosennej wegetacji rzepaku mogła być spowodowana wolnym tempem mineralizacji na skutek niekorzystnych warunków klimatyczno-glebowych. Natomiast wysoka koncentracja S w roślinach dojrzałych może świadczyć o dużej, naturalnej zasobności gleby w ten składnik. W porównaniu do uzyskanych wyników Boreczek (2000) stwierdziła w swoich badaniach niższą zawartość siarki w nasionach (0,49%) i słomie (0,38%) rzepaku ozimego.

Wnioski

- Przeprowadzone badania wskazują, że zastosowany w doświadczeniu test roślinny jako wskaźnik stanu zaopatrzenia roślin w siarkę pozwala na wykrycie utajonych niedoborów tego składnika, które można usunąć poprzez nawożenie mineralne.
- Nawożenie rzepaku ozimego siarką miało wpływ na wzrost plonów w doświadczeniu.
- Stwierdzono istotny wzrost koncentracji oraz pobrania siarki w roślinach nawożonych tym składnikiem.
- W wyniku stałej redukcji zanieczyszczenia atmosfery związkami siarki oraz wysokiego nawożenia rzepaku azotem może wkrótce wystąpić w kraju konieczność stosowania nawozów siarkowych.

Conclusions

- Conducted research shows that plant test used in this experiment as an indicator of state of sulphur supply in plants allows to find latent S deficits which can be removed by mineral fertilization.
- Sulphur fertilization of winter oilseed rape had influence on yield increase in the experiment.

Wstępna ocena potrzeb nawożenia siarką rzepaku ozimego 649

- The increase of concentration and sulphur uptake in plants fertilized with this element was found.
- Soon the necessity to use sulphur fertilizers may occur in the whole country as the result of continuous reduction of air pollution with sulphur compounds and high fertilization of rapeseed with nitrogen.

Literatura

- Boreczek B. 2001. Wykorzystanie testów roślinnych do oceny stanu odżywienia roślin siarką. *Fragmenta Agronomica*, 4 (72): 136-145.
- Boreczek B. 2000. Bilans siarki w zianowaniu czteropolowym. *Nawozy i Nawożenie*, 4 (5): 173-184.
- Grzebisz W., Fotyma E. 1996. Ocena odżywienia siarką rzepaku uprawianego w północno-zachodniej Polsce. *Rośliny Oleiste – Oilseed Crops*, XVII: 275-280.
- Krauze A., Bowszys T. 2000. Wpływ stosowania różnych technologii nawozów siarkowych na plonowanie i jakość rzepaku ozimego i jarego. *Folia Univ. Agric. Stetin.*, 204, *Agricultura*, 81: 133-142.
- Jabłoński M., Horodyski A. 1981. Omówienie niektórych prac nad technologią uprawy rzepaku ozimego. *Biul. IHAR*, 146: 57-61.
- Janzen H.H., Bettany J.R. 1984. Sulphur nutrition of rapeseed: influence of fertilizer nitrogen and sulphur rates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48: 100-107.
- Jędrzycka M., Podleśna A., Lewartowska E. 2002. Wpływ nawożenia azotem i siarką na zdrowotność roślin rzepaku ozimego. *Pam. Puł.*, 130/I: 329-338.
- Mc Grath S.P., Zhao F.J. 1996. Sulphur uptake, yield responses and the interactions between nitrogen and sulphur in winter oilseed rape (*Brassica napus*). *Journal of Agricultural Science*. 126: 53-62.
- Motowicka-Terelak H., Terelak T. 1998. Siarka w glebach Polski – stan i zagrożenie. *PIOŚ, Biblioteka Monitoringu Środowiska*, Warszawa.
- Podleśna A. Reakcja rzepaku ozimego na zróżnicowane nawożenie siarką. 2002. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 48: 335-340.
- Podleśna A. 2002a. Air pollution by sulphur dioxide in Poland – impact on agriculture. *Phyton*, 42 (3): 157-163.
- Schnug E., Haneklaus S. 1994. Diagnosis of crop sulphur status and application of X-ray fluorescence spectroscopy to sulphur determination in plant materials. *Sulphur in Agriculture*, 18: 31-40.
- Schnug E., Haneklaus S. 1994a. Sulphur deficiency in *Brassica napus*. *Landbauforschung Volkenrode, Sonderheft* 144.
- Wielebski F., Wójtowicz M., Horodyski A. 2002. Agrotechnika rzepaku ozimego w badaniach Zakładu Roślin Oleistych IHAR w Poznaniu. *Rośliny Oleiste – Oilseed Crops*, XXIII (1): 29-52.
- Zhao F.J., McGrath S.P., Blake-Kalff M.M.A., Link A., Tucker M. 2002. Crop responses to sulphur fertilisation in Europe. *Proceedings No 504, International Fertiliser Society, York, UK*: 1-28.

WPLYW NAWOŻENIA SIARKĄ I AZOTEM NA ZAWARTOŚĆ TŁUSZCZU I BIAŁKA W NASIONACH RZEPAKU OZIMEGO

Anna Podleśna¹, Wacław Strobel²

¹ Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia,

Instytut Uprawy, Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy, Puławy

² Zakład Fizycznych i Technologicznych Właściwości Agromateriałów,

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin

Wstęp

Rzepak ozimy jest najważniejszą rośliną oleistą w Polsce. Zabiegi hodowców i agrotechników mają na celu uzyskanie stabilnego i możliwie wysokiego plonu tej rośliny spełniającego określone normy jakościowe. Wśród ważnych cech rzepaku główne miejsce zajmuje zawartość białka i tłuszczu w nasionach [BARTKOWIAK-BRODA i in. 2005]. Zależą one od właściwości genetycznych i warunków pogodowych a także od zastosowanego nawożenia. Składnikiem, który najsilniej oddziałuje na wielkość i jakość plonu nasion jest azot, który jest ściśle powiązany metabolicznie z siarką, wobec której rośliny rzepaku wykazują szczególnie duże zapotrzebowanie.

Celem podjętych badań była ocena wpływu nawożenia siarką i azotem na główne cechy jakościowe rzepaku ozimego uprawianego w warunkach pola doświadczalnego.

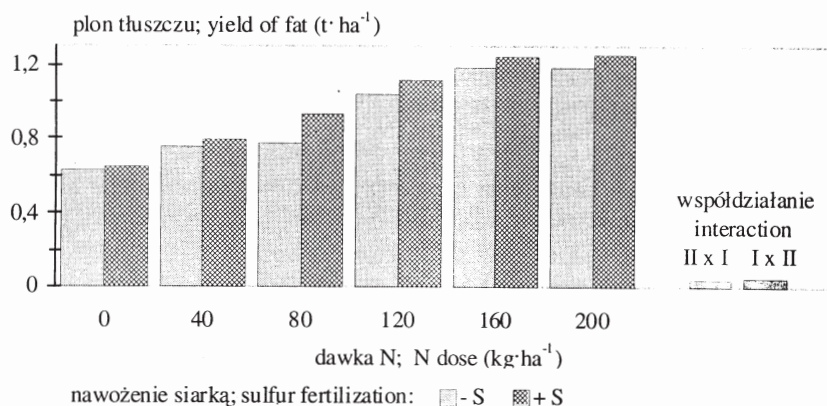
Materiał i metody

Doświadczenie zlokalizowane na glebie kompleksu żyznego bardzo dobrze, prowadzono w Stacji Doświadczalnej IUNG-PIB w Puławach, w zmianowaniu czteropolowym, metodą split-blok, w dwu powtórzeniach. W roku 2000 uprawiano rzepak ozimy odmiany Kana, a w latach 2001 i 2002 – odmianę Lisek. W kolejnych latach badań nasiona wysiano 27, 25 i 24 sierpnia. Ilość wysiewu nasion wynosiła 3,7 oraz 3,8 kg·ha⁻¹, odpowiednio dla odmiany Kana i Lisek a każde poletko miało powierzchnię 20,2 m². Przedplonem dla rzepaku była pszenica jara. Pierwszym czynnikiem doświadczenia było nawożenie siarką: kontrola bez nawożenia (–S) i dawka 80 kg S·ha⁻¹ (+S). Czynnikiem drugim stanowiło nawożenie azotem w dawkach: 0 (kontrola), 40, 80, 120, 160 i 200 kg·ha⁻¹. Nawozy fosforowe stosowano w dawkach 15, 20 i 35 kg P₂O₅·ha⁻¹ a potasowe – 110, 110 i 120 kg K₂O·ha⁻¹, odpowiednio dla kolejnych lat badań. Rzepak zbierano w dojrzałości

pełnej. Oznaczenie zawartości tłuszczu surowego i białka ogólnego w nasionach przeprowadzono w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie przy użyciu spektrometru bliskiej podczerwieni Oxford QN 1000 [NOGALA-KAŁUCKA i in. 2002]. Uzyskane wyniki, stanowiące średnią obiektową, opracowano statystycznie przy pomocy programu Statgraphics 5.1.

Wyniki

Uzyskane wyniki zawartości tłuszczu w nasionach rzepaku różnią się nieco w poszczególnych latach badań (tab. 1). Zastosowane nawożenie siarką miało niewielki, i na ogół nieistotny, wpływ na zawartość tłuszczu w nasionach rzepaku (tab. 1). Wprawdzie nasiona zebrane z obiektu nawożonego siarką w latach 2000 i 2002 miały średnio wyższą zawartość tłuszczu niż nasiona z obiektu kontrolnego ale były to różnice nieistotne. Natomiast w roku 2001 wyższą średnią zawartością tłuszczu wyróżniały się nasiona z obiektu, w którym siarka nawozowa nie była stosowana. Nie stwierdzono też znaczących różnic w wielkości tej cechy w zależności od poziomu nawożenia azotem (tab. 1). Natomiast plon tłuszczu wzrastał w obiektach nawożonych siarką ale różnie na poszczególnych poziomach N (0,8–20,5%), a istotny wpływ na jego wzrost miały zwiększające się dawki azotu (rys. 1). Nawożenie azotem w dawce 160 kg·ha⁻¹ stanowiło, na ogół górną jego granicę ponieważ dawka 200 kg N·ha⁻¹ powodowała statystycznie nieistotny przyrost plonu. Plon tłuszczu wzrastał prawie dwukrotnie w porównaniu z kontrolą (bez N) z dawką 160–200 kg N·ha⁻¹.



Rys. 1. Plon tłuszczu w zależności od nawożenia azotem i siarką (średnia z lat badań)
Fig. 1. Fat yield depending on fertilization with N and S (mean for years of studies)

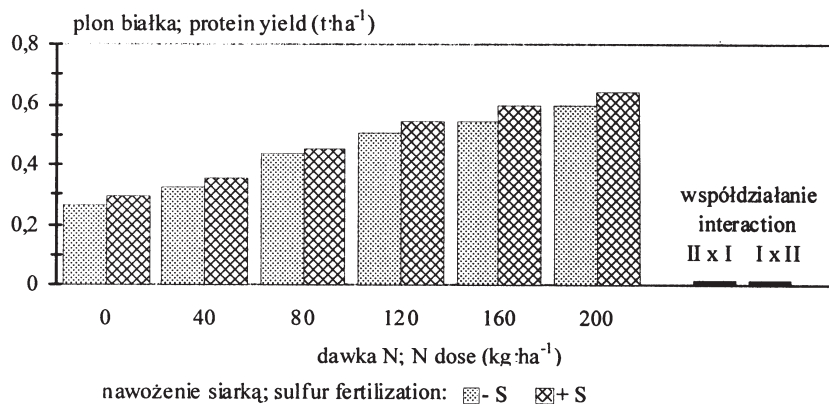
Wykonane badania potwierdziły pewien wpływ siarki nawozowej na zawartość białka ogólnego w nasionach rzepaku, ponieważ we wszystkich latach nasiona z tych obiektów miały wyższe wartości tej cechy, w porównaniu do nasion uzyskanych z roślin nienawożonych siarką (tab. 1). Jednakże istotnie wyższą statystycznie zawartość stwierdzono tylko w 2001 roku. Zawartość białka wzrastała na ogół wraz z podwyższaniem dawki nawożenia azotem ale zależność ta była w latach bardzo zróżnicowana. Zmniejszonej zawartości tłuszczu w nasionach z obiektów nawożonych najwyższą dawką azotu w 2000 roku towarzyszył istotny statystyczny

cznie wzrost zawartości białka. Zastosowane nawożenie siarką wpłynęło na 1–10% wzrost średniego plonu białka w nasionach rzepaku natomiast wyższe nawożenie azotowe spowodowało ponad dwukrotny, w stosunku do kontroli, i statystycznie istotny wzrost jego plonu (rys. 2).

Tabela 1; Table 1

Wpływ nawożenia na zawartość tłuszczu i białka w nasionach rzepaku
Effect of fertilization on the content of fat and protein in rape seeds

Nawożenie Fertilization	Zawartość tłuszczu; Fat content (%)			Zawartość białka; Protein content (%)		
	2000	2001	2002	2000	2001	2002
Dawka siarki; Sulfur dose (kg·ha ⁻¹)						
0	41,4 a	41,6 b	38,9 a	20,1 a	17,1 a	19,9 a
80	41,6 a	40,6 a	39,0 a	20,3 a	18,9 b	20,2 a
Dawka azotu; Nitrogen dose (kg·ha ⁻¹)						
0	41,6 b	41,1 a	39,3 a	19,8 b	16,6 a	18,7 a
40	42,5 b	41,2 a	39,0 a	18,7 a	16,6 a	19,8 ab
80	42,3 b	41,1 a	38,9 a	18,7 a	17,6 a	19,8 ab
120	41,6 b	41,4 a	39,0 a	20,8 b	18,1 a	19,7 ab
160	41,3 b	41,2 a	38,7 a	20,2 b	18,0 a	21,1 c
200	40,0 a	40,7 a	38,8 a	23,1 c	19,2 b	20,4 bc



Rys. 2. Plon białka w zależności od nawożenia azotem i siarką (średnia z lat badań)
Fig. 2. Protein yield depending on fertilization with N and S (mean for years of studies)

Dyskusja

Autorzy niniejszej pracy nie stwierdzili istotnego wpływu siarki nawozowej na zawartość tłuszczu w nasionach podobnie jak JANKOWSKI i in. [2008]. Jednakże MUNSHI i in. [1990], McGRATH i ZHAO [1996], PODLEŚNA [2002] oraz AHMAD i in. [2007] najniższą zawartość tłuszczu uzyskali w nasionach z obiektów nienawożonych siarką, kiedy w glebie wystąpił znaczny jej deficyt. Zastosowane, w tych warunkach, nawożenie siarką powodowało wzrost zawartości tłuszczu w nasionach, która ob-

niżała się następnie wraz ze wzrostem plonu. AHMAD i in. [2007] oraz JACKSON [2000] obserwowali wzrost zawartości oleju już po zastosowaniu 10 i 20 kg S·ha⁻¹, a dalszy wzrost nawożenia siarką nie zwiększał jego zawartości. Natomiast AHMAD i in. [2005], MCGRATH i ZHAO [1996] oraz MALHI i in. [2007] uzyskali wzrost zawartości tłuszczu w nasionach w obiektach nawożonych do dawki 40 kg S·ha⁻¹. JANKOWSKI i in. [2008] wykazali także, że w wyniku nawożenia siarką plon tłuszczu wzrastał w granicach 4–11% do dawki 60 kg S·ha⁻¹. W badaniach własnych autorów średni wzrost plonu tłuszczu w latach 2000–2002 wynosił średnio 0,3%. Opierając się na wynikach wspomnianych wyżej autorów można stwierdzić, iż dawka 80 kg S·ha⁻¹, którą zastosowano w doświadczeniu własnym, może być za duża dla uzyskiwania nasion dobrej jakości.

Wzrastające dawki azotu nie powodowały istotnych statystycznie zmian w zawartości tłuszczu, bądź wpływały na ich obniżenie po zastosowaniu więcej niż 80–100 kg N·ha⁻¹, podobnie jak w badaniach STARNERA i in. [1999] i JACKSONA [2000]. Również AHMAD i in. [2007] stwierdzili, iż wzrastające dawki azotu powodowały zmniejszenie zawartości oleju w nasionach podobnie jak w doświadczeniu własnym autorów. Natomiast plon tłuszczu wzrastał, w omawianym doświadczeniu, wraz ze wzrostem dawek azotu do 160, a nawet 200 kg N·ha⁻¹. Potwierdzeniem uzyskanych wyników są badania JACKSONA [2000], w których optymalny plon tłuszczu występował w tym samym przedziale co plon nasion czyli pomiędzy 180–220 kg N·ha⁻¹. Zdaniem w/w autora należy spodziewać się niższej zawartości oleju jeśli rzepak nawożony jest dawką przekraczającą 220 kg N·ha⁻¹. Natomiast STARNER i in. [1999] uzyskali najwyższy plon tłuszczu w obiektach nawożonych 100 kg N·ha⁻¹ a dawki wyższe powodowały spadek plonu nasion jak też plonu oleju.

Autorzy niniejszej pracy stwierdzili tendencję, a w niektórych latach potwierdzony statystycznie wzrost, zawartości białka ogólnego pod wpływem nawożenia siarką podobnie jak AHMAD i in. [2007] oraz JANKOWSKI i in. [2008]. Natomiast HORODYSKI i KRZYWIŃSKA [1979] oraz WIELEBSKI i WÓJTOWICZ [2004] nie uzyskali pozytywnego wpływu siarki na zawartość białka w nasionach rzepaku. Z kolei obserwowany przez JANKOWSKIEGO i in. [2008] wzrost zawartości białka zawsze występował tylko do dawki 60 kg S·ha⁻¹. Wielu autorów podkreśla zależność poziomu zawartości białka od nawożenia azotowo-siarkowego. Zdaniem AHMADA i in. [2007] wzrost zawartości białka po zastosowaniu tych składników wynika z faktu, że azot jest integralną częścią białka a białko nasion rzepaku zawiera relatywnie duże ilości aminokwasów zawierających siarkę. Potwierdzeniem tych sugestii są badania MORTENSENA i ERIKSENA [1994], którzy wykazali, iż wraz ze wzrostem poziomu nawożenia siarką zawartość aminokwasów siarkowych wzrastała a obniżała się w warunkach wyższej dawki azotu. Wymienieni autorzy uważają, że wpływ deficytu siarki na zawartość białka w nasionach rzepaku jest często zróżnicowany. Jednakże zmiany w składzie aminokwasów w nasionach spowodowane brakiem siarki, mogą być przypisane wzrostowi syntezy białka z niską zawartością aminokwasów siarkowych, co pogarsza ich jakość. Zdaniem BARTKOWIAK-BRODY i in. [2005] wysoka zawartość białka w warunkach wysokiego nawożenia N może być spowodowana ujemną korelacją pomiędzy zawartością oleju i białka, wynikającą z obniżania się zawartości oleju wraz ze wzrostem poziomu azotu, podobnie jak w pracy własnej autorów. Należy dodać, iż wyniki zawartości tłuszczu i białka w nasionach rzepaku uzyskane w badaniach własnych mają niższe wartości, w porównaniu do podawanych dla tych odmian przez COBORU

[HEIMANN 2005] ale wartości tych cech przedstawione w pracy SKIBY i in. [2006], w której analizie prowadzono również metodą spektrometrii bliskiej podczerwieni, pozostają na podobnym poziomie do uzyskanych przez autorów niniejszej pracy.

Wnioski

1. Zastosowana dawka siarki nie powodowała wzrostu zawartości tłuszczu i białka w nasionach rzepaku, wpływała natomiast na zwiększenie ich plonu na każdym poziomie nawożenia azotem.
2. Wzrastające nawożenie azotem nie miało istotnego wpływu na zawartość tłuszczu, ale wyższe dawki azotu powodowały wzrost zawartości białka w nasionach oraz wzrost plonu badanych parametrów jakościowych.

Literatura

- AHMAD A., KHAN I., ANSJUM N.A., DIVA I., ABDIN M.Z., IQBAL M. 2005. *Effect of timing of sulfur fertilizer application on growth and yield of rapeseed*. J. Plant Nutrition. 28: 1049–1059.
- AHMAD G., JAN A., ARIF M., JAN M.T., KHATTAK R.A. 2007. *Influence of nitrogen and sulfur fertilization on quality of canola (Brassica napus L.) under rainfed conditions*. J. Zhejiang Univ. Sci. B. 8(10): 731–737.
- BARTKOWIAK-BRODA I., WAŁKOWSKI T., OGRÓDOWCZYK M. 2005. *Przyrodnicze i agrotechniczne możliwości kształtowania jakości nasion rzepaku*. Pam. Puławski 139: 7–26.
- HEIMANN S. 2005. *Zasady oceny odmian i ich wartość gospodarcza*, w: *Technologia produkcji rzepaku*. Muśnicki i in. (Red.), Wieś Jutra, Warszawa: 62–67.
- HORODYSKI A., KRZYWIŃSKA F. 1979. *Wpływ nawożenia siarką na plon i jakość nasion rzepaku ozimego*. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 229: 101–109.
- JACKSON G.D. 2000. *Effects of nitrogen and sulfur on canola yield and nutrient uptake*. Agron. J. 92: 644–649.
- JANKOWSKI K., BUDZYŃSKI W., SZYMANOWSKI A. 2008. *Effect of sulfur on the quality of winter rape seeds*. J. Elementol. 13(4): 521–534.
- MALHI S.S., GAN Y., RANEY J.P. 2007. *Yield, seed quality, sulfur uptake of Brassica oil-seed crops in response to sulfur fertilization*. Agron. J. 99(2): 570–577.
- MCGRATH S.P., ZHAO F.J. 1996. *Sulphur uptake, yield responses and the interactions between nitrogen and sulphur in winter oilseed rape (Brassica napus)*. J. Agric. Sci. 126: 53–62.
- MORTENSEN J., ERIKSEN J. 1994. *Effect of sulphur deficiency on amino acid composition*. Norwegian Journal of Agricultural Sciences, Supplement 15: 135–142.
- MUNSHI S.K., VATS S., DHILLON K.S., SUKHIJA P.S. 1990. *Lipid biosynthesis in seeds of mustard (Brassica juncea) influenced by zinc and sulphur deficiency*. Physiologia Plantarum 80(1): 102–108.
- NOGALA-KAŁUCKA M., GOGLEWSKI M., JAWOREK M., SIGER A., SZULCZEWSKA A. 2002.

Oznaczanie niektórych składników jako wyróżników jakości nasion rzepaku produkowanych w różnych rejonach Polski. Rośliny Oleiste XXIII: 447–459.

PODLEŚNA A. 2002. *Reakcja rzepaku ozimego na zróżnicowane nawożenie siarką. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 481(I): 335–339.

SKIBA K., KACHEL M., TYS J., SZPRINGIEL M., RYBACKI R., STROBEL W. 2006. *Jakość technologiczna nasion rzepaku pochodzących z doświadczeń odmianowo-nawozowych. Inżynieria Rolnicza* 6: 265–273.

STARNER D.E., HAMAMA A.A., BHARDWAJ H.L. 1999. *Canola oil yield and quality as affected by production practices in Virginia*, w: *Perspectives on new crops and new uses*. J. Janick (Ed.), ASHS Press, Alexandria, VA: 254–256.

WIELEBSKI F., WÓJTOWICZ M. 2004. *Wpływ czynników agrotechnicznych na skład chemiczny nasion odmiany mieszańcowej zrestorowanej w porównaniu z odmianą populacyjną i odmianami mieszańcowymi złożonymi. Rośliny Oleiste XXV: 504–519.*

Słowa kluczowe: nawożenie siarką, azot, zawartość tłuszczu, zawartość białka, rzepak ozimy

Streszczenie

Celem doświadczenia była ocena wpływu nawożenia azotowo-siarkowego na zawartość tłuszczu surowego i białka ogólnego w nasionach rzepaku ozimego oraz ich plon. Doświadczenie polowe prowadzono w zmianowaniu czteropoloowym, w dwu powtórzeniach. Pierwszym czynnikiem doświadczenia było nawożenie siarką: 0 i 80 kg S·ha⁻¹ a drugim – nawożenie azotem w dawce: 0, 40, 80, 120, 160 i 200 kg N·ha⁻¹. Rzepak zbierano w dojrzałości pełnej. Nawożenie siarką nie zwiększało zawartości tłuszczu i białka w nasionach rzepaku ozimego, powodowało jednak wzrost ich plonu. Natomiast zastosowane nawożenie azotem nie wpływało na zawartość tłuszczu ale na obiektach z jego wyższymi dawkami stwierdzono wzrost zawartości białka w nasionach.

EFFECT OF SULFUR AND NITROGEN FERTILIZATION ON THE CONTENT OF FAT AND PROTEIN IN WINTER RAPE SEEDS

Anna Podleśna¹, Wacław Strobel²

¹ Institute of Soil Science and Plant Cultivation –
National Research Institute, Puławy

² Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Lublin

Key words: sulfur fertilization, nitrogen, fat content, protein content, winter oilseed rape

Summary

The aim of this experiment was the evaluation of the effect of nitrogen and sulfur fertilization on the concentration of crude fat and total protein in seeds of

winter oilseed rape as well as their yield. A field experiment was conducted at four crop rotation, in two replications. The first experimental factor was the fertilization with sulfur: 0 and 80 kg S·ha⁻¹ and the second – nitrogen fertilization at the doses of: 0, 40, 80, 120, 160 and 200 kg N·ha⁻¹. Oilseed rape was harvested at full maturity. Fertilization with sulfur did not enhance the fat and protein content in seeds, however it caused the increase of their yield. On the other hand, nitrogen fertilization applied in the experiment did not affect fat content but in the objects with its higher doses the increase of protein content in seeds was found.

Dr inż. Anna **Podleśna**
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
Instytut Uprawy, Nawożenia i Gleboznawstwa
Państwowy Instytut Badawczy
ul. Czartoryskich 8
24-100 PUŁAWY
e-mail: ap@iung.pulawy.pl

Chapter 17

Effects of Fertilization with Sulfur on Quality of Winter Wheat: A Case Study of Nitrogen Deprivation

Anna Podlesna(✉) and Grazyna Cacak-Pietrzak

Abstract Experiments with a bread type of winter wheat var. Kobra were performed at a very good rye complex for three years. The first experimental factor (I) was sulfur fertilization: control without sulfur (-S) and 50 kg S ha⁻¹ (+S) and the second (II) – levels of nitrogen fertilization: 0, 30, 60, 90, 120, and 150 kg N ha⁻¹. Plant harvest was performed at full maturity of wheat, and flour and dough technological parameters were analyzed. All levels of nitrogen increased grain yield, while applied sulfur showed effects in the middle range of nitrogen doses. However, sulfur positively affected the quality of flour by decreasing ash content and increasing gluten and protein concentration. Furthermore, these conditions positively affected development, stability, softening, and quality of dough as well as bread volume. Wheat fertilization with S and N affected S content in grain. The N:S ratio ranged from 8 to 10.5:1, and the highest values indicate the best technological properties of winter wheat grain.

1 Introduction

Winter wheat is the main bread cereal in Poland. The most important criterion of wheat cultivation is stable yield and high technological quality. In field cultivation the weather conditions are the basis for proper plant growth and development for profitable production (Johansson and Svensson 1999). However, previous studies showed that agricultural practices played an important role in the development of grain quality. Achremowicz et al. (1993) and Luo et al. (2000) showed that genotype has a strong influence on quality parameters. Plant protection and applied fertilization are the other factors which influence cereal yield and quality (Podolska and Stypula 2002). Nitrogen is known as the most yield-creative factor, and many authors reported its positive effect (Fotyma 1999, Hřivna et al. 1999, Podlesna and Cacak-Pietrzak 2006). Apart from this, Luo et al. (2000) found that nitrogen application

Anna Podlesna

Plant Nutrition and Fertilisation Department, Institute of Soil Science and
Plant Cultivation – National Research Institute, Czartoryskich 8, 24-100 Pulawy, Poland
ap@iung.pulawy.pl

significantly increased the wholemeal and white flour protein percentage, hardness, SDS sedimentation, and midline peak value of the mixograph. According to Flæte et al. (2005), the increase of total N fertilization has been the major strategy recommended for intensive wheat production. However, at high N fertilization levels balanced S application is required to obtain an optimal N/S ratio and SDS sedimentation volume. There are many papers which confirm the important influence of sulfur on the breadmaking quality of flour, but there is little information concerning the need for combined nitrogen and sulfur fertilization for wheat in Poland (Podleśna and Cacak-Pietrzak 2006). According to Motowicka-Terelak and Terelak (1998) over 70% of Polish soils are characterized by low concentration of available sulfur. In addition, light, acid soils prevail in Poland, and for the two last decades, the considerable reduction of gaseous sulfur compounds emitted to the atmosphere has been observed (Podleśna 2002). A certain amount of sulfates are also found at drains and in drainage ditches water (Igras 2004).

The aim of this study was the estimation of winter wheat requirement for sulfur and nitrogen with respect to yield and baking parameters.

2 Methods

The winter wheat grain variety Kobra was grown on a very good rye complex location. Experimental plots were 20 m² in area, and the plant population was 5 million per hectare. The first experimental factor (I) was sulfur fertilization: control without sulfur (-S) and 50 kg S ha⁻¹ (+S) and the second (II) – levels of nitrogen fertilization: 0, 30, 60, 90, 120, and 150 kg N ha⁻¹. The soil was characterized by very low sulfur content (0, 18 mg S-SO₄ 100 g⁻¹ soil) and about 60 kg N per ha (Fotyma and Fotyma 2000). Sulfur was given in the autumn together with phosphorus and potassium. Mineral nitrogen was applied in the spring as ammonium sulfate at the rate of 30 kg N ha⁻¹ in two-week intervals from 18 (8 leaves stage) up to 64-65 (full flowering) according to Zadoks et al. (1974) scale. Winter wheat plants were protected against pests and disease as well as against competition by weeds. Harvest of plants was performed at full maturity. Nitrogen and sulfur concentrations were determined in dried and ground samples of grain. Nitrogen was analyzed by flow spectrophotometry after wet mineralization of samples, and sulfur was determined by the roentgen fluorescence method (Haneklaus and Schnug 1994). The grain N:S ratio was calculated from the N and S concentrations.

The evaluation of milling and baking parameters of wheat grain was performed at the Department of Food Technology, Agricultural University in Warszawa. Grain samples of about 1,5 kg were milled at Quadrumat Senior laboratory mill. On the basis of obtained results the balance of milling was done. The milling efficiency factor K and ash numbers (AN) were calculated according the formulas:

$$K=Wm/Pm$$

$$AN=Pm \cdot 100000/Wm$$

where:

Wm – yield of flour (%)

Pm – content of ash in the flour (%)

The nitrogen concentration in flour was estimated by the use of the Kjeldahl method, and then the total protein content was calculated by multiplying %N and 5.83 value was calculated. The amount and quality of wet gluten after washing on Glutomatic (Polish Norm 93-A-74042/02) and total ash content were determined in the flour (Jakubczyk and Haber 1983). Furthermore, dough density evaluation was done using Farinograph Brabendera. The interpretation of results was carried out according to Brabender/ICC (PN-ISO5530-1:1999) with computer readings on the following features: water absorption, dough development, dough stability, dough softening, and quality number. Laboratory baking was assessed according to the direct method (Jakubczyk and Haber 1983).

The presented data show the mean from 3-year studies. Analysis of variance and regression were made with Statgraphic v. 5.1.

3 Results

3.1 Grain Yield

The results showed that mineral sulfur had a positive effect on grain yield of winter wheat only in the range of 30-90 kg N per ha (Fig. 17.1). The increase of grain yield from 25% to 45%, which conforms to 130-220 kg of grain per ha, was observed. Sulfur applied in the two highest N doses did not show a positive interaction with nitrogen, so the grain yields were about 16% to 33% lower in comparison to yields obtained on plots without sulfur. Nitrogen was very profitable for winter wheat and caused the yield to increase up to the highest dose.

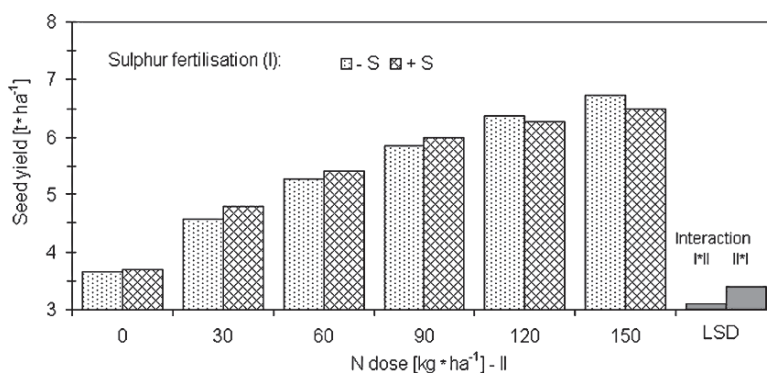


Fig. 17.1 Interactive effect of nitrogen and sulfur on seed yield of winter wheat

3.2 Quality Parameters

Although sulfur had no significant effect on grain yield increase, it positively affected gluten content in flour (Fig. 17.2). The highest increase of gluten content with sulfur was found with the control. Together with nitrogen the increase in gluten concentration was consistently higher. The positive effect of sulfur on gluten had a lowering tendency but was visible up to the highest rate of N. However, mean results of gluten softening indicated values in the range of 17 and 20 mm for –S and +S, respectively.

The protein content in flour of winter wheat grain was highly dependent on applied nitrogen (Fig. 17.3). Its concentration increased linearly together with N levels. Sulfur increased protein content with higher levels of nitrogen.

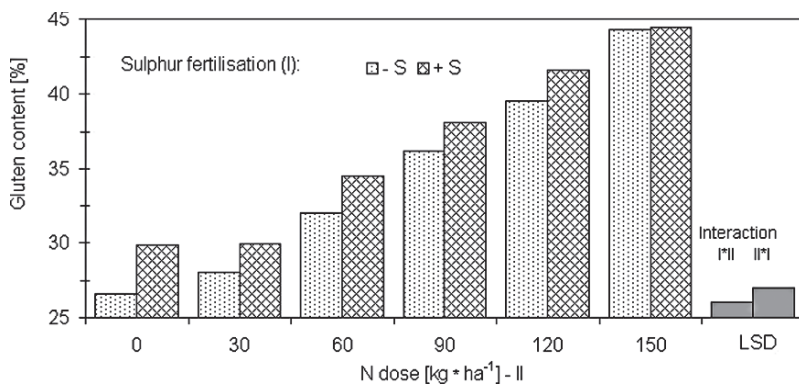


Fig. 17.2 Interactive effect of nitrogen and sulfur on gluten content of winter wheat grain

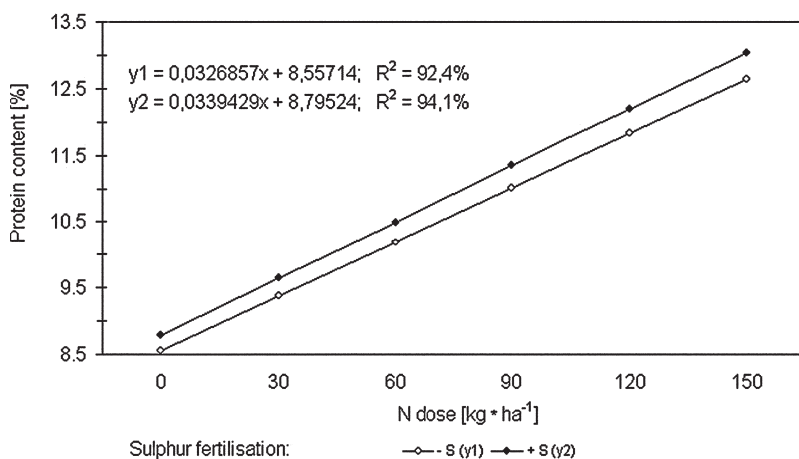


Fig. 17.3 Interactive effect of nitrogen and sulfur on protein content of grain flour of winter wheat

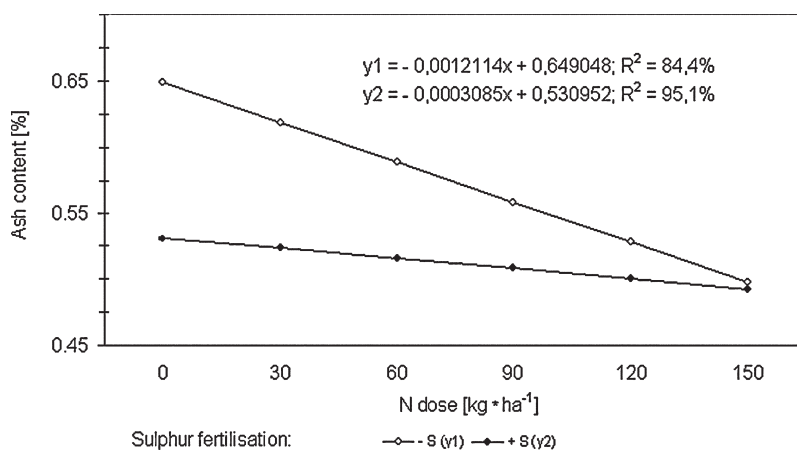


Fig. 17.4 Interactive effect of nitrogen and sulfur on ash content of flour of winter wheat grain

Table 17.1 The results of laboratory milling

Description	Yield of flour (%)	Bran (%)	Shorts (%)	Milling efficiency factor K	Ash number
N dose (kg · ha ⁻¹):					
0	77.6a*	16.2b	5.2a	138a	730c
30	78.0ab	16.2b	5.3a	132a	770d
60	78.8bc	15.4a	5.4a	148bc	677b
90	78.0ab	15.4a	5.5a	153c	655a
120	79.5c	15.0a	5.2a	154c	652a
150	79.1c	15.0a	5.4a	149bc	674b
S fertilization:					
-S	78.7a	15.4a	5.2a	138a	732a
+S	78.3a	15.6a	5.5a	153b	654b

* The data in a column with same letters did not differ significantly.

The highest ash content in the flour was found with no nitrogen and decreased with the increase in nitrogen dose (Fig. 17.4). Considerably higher values of ash content were found in flour in the treatment -S than +S ones.

The results of laboratory milling show that some of these parameters are not dependent on fertilization (Table 17.1). Therefore, differentiated nitrogen doses did not significantly change the bran content in the flour. The applied sulfur did not influence the yield of flour as well as the percent of bran. A more evident effect of nitrogen and sulfur fertilization was found in the case of milling efficiency factor K and ash number.

3.3 *Quality Parameters of Dough*

Most of the tested rheological parameters of dough indicate their significant dependence on applied fertilizers (Table 17.2). All studied features had significantly greater values with increasing nitrogen levels, however, an exception was dough softening. A similar response was noted with sulfur application. In general, fertilization with sulfur caused a significant increase of dough development, dough stability, and quality number of flour.

After the bread was baked, bread volume was found to depend on nitrogen dose (Fig. 17.5). It was greatest in the highest N rate application; however, an additional

Table 17.2 Rheological features of dough

Description	Water absorption (%)	Dough development (min)	Dough stability (min)	Dough softening after 10 min (FU)	Quality number
N dose (kg · ha ⁻¹):					
0	50.4a*	1.4b	1,8a	112e	27a
30	50.7a	1.1a	2,1b	102d	28a
60	51.6b	2.3c	3,0d	84c	38b
90	52.2b	2.8d	3,8e	86c	46c
120	54.0c	2.9d	2,7c	76b	53d
150	55.3d	3.6e	3,0d	64a	56d
S fertilization:					
–S	52.8a	2.2a	2,6a	90b	37a
+S	51.9a	2.5b	2,9b	84a	45b

*Explanations in Table 17.1.

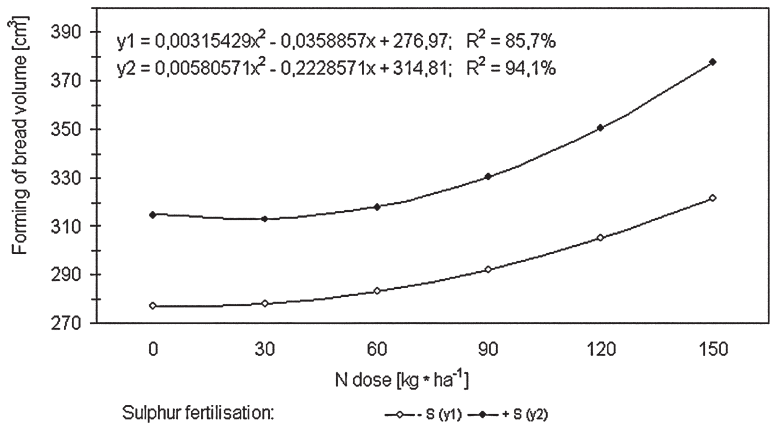


Fig. 17.5 Interactive effect of nitrogen and sulfur on forming of bread volume in winter wheat

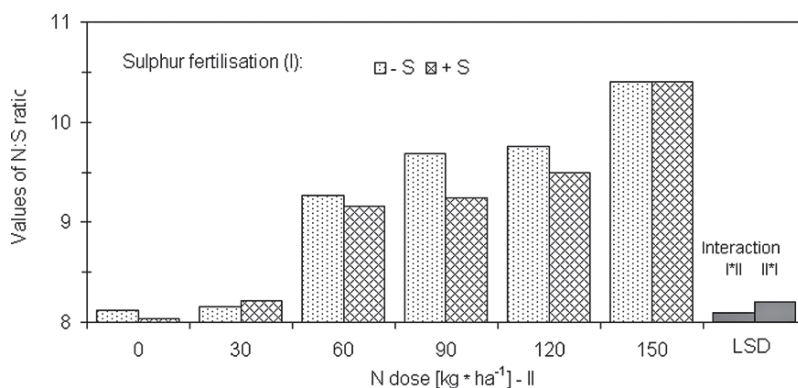


Fig. 17.6 Interactive effect of nitrogen and sulfur on values of N:S ratio in winter wheat

supply of plants with sulfur caused a considerable increase of bread volume at all nitrogen levels in comparison to bread volume without S treatment. The greatest increase was obtained with 150 kg N and 50 kg S per hectare, which was about 20% in comparison to the same N treatment but without sulfur.

3.4 Grain S and N Concentration and N:S Ratio

In general, the higher doses of nitrogen increased sulfur and nitrogen concentrations. Thus the grain N:S ratio was lower than 10:1 (Fig. 17.6). The greatest value of N:S ratio was achieved at the highest levels of nitrogen fertilization irrespective of sulfur dose. The application of sulfur decreased N:S ratio in the range of middle nitrogen levels.

4 Discussion

It is generally known that plants treated with mineral nutrients increase not only in yield but also in grain quality – in their chemical composition as well as nutritive and technological what means its good parameters to bread production (Cacak-Pietrzak et al. 1999, Ceglinska et al. 2005). The earlier reports of Fotyma (1999) and Sticksel et al. (2000) also showed the important role of nitrogen in yield formation. Our results showed that sulfur application also positively affected grain yields in comparison to control. Boreczek (2000) did not find any influence of sulfur-containing fertilizers on yields of winter and spring wheat, while Zhang et al. (1999) obtained wheat yield increase in the range from 3.5% to 14.5% with the use of sulfur. A field experiment performed by Hrivna et al. (1999) confirmed

that sulfur has a positive effect on yields and on some quality indicators of winter wheat grain.

Flour yield is the fundamental parameter used for evaluating grain milling value, and it had a tendency to increase with the increase in nitrogen dose. According to the results of Cacak-Pietrzak (1999) differentiated nitrogen fertilization did not influence the amount of flour (Podlesna and Cacak-Pietrzak 2006). It is worth emphasizing that we obtained higher yields of flour compared to mean values for varieties of winter wheat cultivated in Poland (Achremowicz and Zajac 1993). This may be due to greater grain plumpness and less ash content in the grain. It is known that the higher values of factor K and lower ash number are considered as a better milling value for grain. These relationships were found in our study with sulfur application.

One of the factors that decides the baking value of wheat flour is the amount and quality of gluten. Its presence gives a gluey and plasticity which are very important features of flour. Gluten concentration in flour was highly dependent on nitrogen in our experiment, and this has also been shown in studies performed by Achremowicz and Zajac (1993) and Podlesna and Cacak-Pietrzak (2006). In their research a positive effect of sulfur on higher gluten concentration of wheat flour was found. However, the quality was poor with combined application of high doses of sulfur and nitrogen. The tested flour of spring wheat showed lower softening of gluten with these treatments (Podlesna and Cacak-Pietrzak 2006). In the opinion of Ewart (1978) the positive influence of sulfur is the disulphide bridges formed between groups of cysteine which are responsible for the connection of glutelin fractions.

Protein content in flour is an important parameter of wheat milling value. According to Bechtel et al. (1982) the importance of protein in baking value results from easiness of gluten net creation during the kneading. Gluten net makes easy to keeping of CO₂ produced during dough fermentation and this way porous crumb of bread is forming. Its concentration in our experiment depended on applied nitrogen dose and sulfur fertilization. It is known that nitrogen and sulfur are required in protein biosynthesis by their necessary presence in amino acids. Mortensen and Eriksen (1994) found the decrease of methionine and cysteine concentration in grain with sulfur deficit conditions. In consequence less than 25% of total nitrogen present in the plant was found in a form of protein, whereas with a normal supply of sulfur about 75% of nitrogen was found as protein. The change in baking quality of wheat grain due to sulfur deficiency has been partly attributed to the reduction in the proportion of proteins enriched in sulfur amino acids, which are considered as crucial in formation of rheological properties of bread dough (Castle and Randall 1987). The studies of Uziak and Szymanska (1969) showed that sulfur application positively affected glutamic acid concentration. However, Zhao et al. (1999) found that sulfur application did not affect grain protein concentration but directly increased the gel protein weight in flour as well as the proportion of polymeric proteins.

According to Czubaszek et al. (2005) protein content in flour influences flour water absorption. Water in dough plays important functions as solvent and creates an environment for some reactions of organic and inorganic substances. It also

forms organoleptic properties and is a structure-forming factor (Piesiewicz 2004). Therefore, the greater the amount of water in dough, the softer the bread. The flour water absorption increased significantly with an increasing N rate in six of the seven experiments performed by Zhao et al. (1999). Similar results were obtained previously with spring wheat (Podlesna and Cacak-Pietrzak 2006). Czubaszek et al. (2005) found that dough made with barley flour, which is characterized by greater water absorption, took longer to develop and was more stable, which is in agreement with the results obtained in our experiments. Cacak-Pietrzak et al. (1999) found that flour water absorption and dough development and stability are dependent most of all on amount and quality of gluten contained in flour and its ability to join water. So dough made from flour which has weak gluten is characterized by shorter development and less stability than flours with strong gluten. These parameters are important because they create dough resistance to kneading, which is closely related to dough softening. Longer time of dough resistance increases softening, and in this way flour shows higher technological value. The quality number of flour is also a very positive parameter from the technological point of view, and greater values of this feature indicate better value of flour.

Volume is important in the evaluation of technological properties of wheat grain loaf. The significant increase in loaf volume with nitrogen levels was found in our experiment. The interaction of nitrogen and sulfur supply had a very positive effect on loaf volume. These results confirm the findings of Zhao et al. (1999). These authors observed the increase of loaf volume after application of sulfur. According to Moss et al. (1981) this positive effect of S can be explained by greater S content in the wheat grain, which induces higher baking volumes. Zhao et al. (1999) also reported that grain S status (S concentration and N:S ratio) is an important parameter that affects not only loaf volume but also breadmaking performance of wheat. However, the best N:S ratio ranged from 8 to 10.5:1 in our experiment and but was lower than 17:1 (Luo et al. 2000, Haneklaus et al. 1992). However, higher N fertilization gave significantly higher grain yield and grain N and S content, as well as N:S ratio, compared to results obtained at lower N fertilization as reported recently by Flæte et al. (2005).

5 Conclusions

1. Sulfur showed a positive effect on winter wheat grain yield with moderate doses of nitrogen.
2. The influence of sulfur on flour quality was shown as the increase in gluten content and decrease of ash content.
3. Fertilization of wheat with sulfur and higher doses of nitrogen was profitable for dough quality with respect to dough development, stability, dough softening, and quality of flour.
4. The best technological value of winter wheat is obtainable in Polish conditions when the N:S ratio is greater than 9.5-10:1 but lower than 17:1.

References

- Achremowicz B, Zajac J, Styk B (1993) The effect of nitrogen fertilisation increase on technological quality of some spring and winter wheat. *Roczniki Nauk Rolniczych Ser A110* (1-2): 149-57 (in Polish)
- Bechtel DB, Gaines RL, Pomeranz Y (1982) Protein secretion in wheat endosperm formation of the matrix protein. *Cereal Chem* 59:336-43
- Boreczek B (2000) Balance of sulphur at four field rotation. *Fertilizers Fert* 4(5): 173-84 (in Polish)
- Cacak-Pietrzak G, Ceglinska A, Haber T (1999) The effect of differential nitrogen fertilisation on a technological value of selected varieties of winter wheat. *Pamiętnik Pulawski* 118:45-56 (in Polish)
- Castle SL, Randall PJ (1987) Effects of sulfur deficiency on the protein synthesis and accumulation of proteins in the developing wheat seeds. *Aust J Plant Physiol* 14:503-16
- Ceglinska A, Samborski S, Rozbicki J, Cacak-Pietrzak G, Haber T (2005) Estimation of milling and baking value of winter triticale varieties depending on nitrogen fertilisation. *Pamiętnik Pulawski* 139:39-45 (in Polish)
- Czubaszek A, Subda H, Karolini-Skaradzinska Z (2005) Milling and baking value of several spring and winter barley cultivars. *Acta Sci Pol Technol Aliment* 4(1):53-62 (in Polish)
- Ewart JAD (1978) Glutamin and dough tenacity. *J Sci Food Agric* 29:551-6
- Flåte NES, Hollung K, Ruud L, Sogn T, Færgestad EM, Skarpied HJ, Magnus EM, Uhlen AK (2005) Combined nitrogen and sulphur fertilisation and its effect on wheat quality and protein composition measured by SE-FPLC and proteomics. *J Cereal Sci* 41:357-69
- Fotyma E (1999) Nitrogen uptake and utilization by winter and spring wheat. *Pamiętnik Pulawski* 118:143-52 (in Polish)
- Fotyma E, Fotyma M (2000) Content of mineral nitrogen in soil as an indicator of fertiliser requirements of plants and state of soil environment. *Fertilizers Fert* 4:91-101 (in Polish)
- Haneklaus S, Evans E, Schnug E (1992) Baking quality and sulphur content of wheat. I Influence of grain sulphur and protein concentration of loaf volume. *Sulphur Agric* 16:31-4
- Haneklaus S, Schnug E (1994) Diagnosis of crop sulphate status and application of X-ray fluorescence spectroscopy for the sulphur determination in plant and soil materials. *Sulphur Agric* 18:31-40
- Hřivna L, Richter R, Ryant P (1999) Possibilities of improving the technological quality of winter wheat after sulphur fertilisation. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie* 349:143-50
- Igras J (2004) Mineral element concentrations in drainage water from agricultural area in Poland. Monography and Scientific Dissertations 13, Institute of Soil Sciences and Plant Cultivation, Pulawy (in Polish)
- Jakubczyk T, Haber T (1983) Analysis of cereals and cereal products. Materials for students of Agricultural University in Warszawa (in Polish)
- Johansson E, Svensson G (1999) Influence of yearly variation and fertilizer rate on bread-making quality in Swedish grown wheats containing HMW glutenin subunits 2+12 or 5+10 cultivated during the period 1990-96. *J Agric Sci Camb* 132:13-22
- Luo C, Branlard G, Griffin WB, McNeil DL (2000) The effect of nitrogen and sulphur fertilisation and their interaction with genotype on wheat glutenins and quality parameters. *J Cereal Sci* 31:185-94
- Mortensen J, Eriksen J (1994) Effect of sulphur on amino acid composition. *Norw J Agric Sci, suppl.* 15:135-42
- Motowicka – Terelak T, Terelak H (1998) Sulphur at Polish soils – state and menace. PIOS Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa (in Polish)
- Piesiewicz H (2004) Four types of wheat dough. *Przegląd Piekarski i Cukierniczy* 6:1-2 (in Polish)

17 Effects of Fertilization with Sulfur on Quality of Winter Wheat

365

- Podlesna A (2002) Air pollution by sulfur dioxide in Poland – impact on agriculture. *Phyton* 42 (3):157-64
- Podlesna A, Cacak-Pietrzak G (2006) Formation of spring wheat baking parameters by nitrogen and sulphur fertilisation. *Pamiętnik Pulawski* 142:381-92 (in Polish)
- Podolska G, Stypula G (2002) Yielding and technological value of winter wheat grain in dependence on protection method against diseases and weeds. *Pamiętnik Pulawski* 130 (II):587-96 (in Polish)
- Stickel E, Maidl F-X, Retzer F, Dennert J, Fischbeck G (2000) Efficiency of grain production of winter wheat as affected by N fertilisation under particular consideration of single culm sink size. *Eur J Agron* 13:287-94
- Uziak Z, Szymanska M (1969) The effect of sulphur on nitrogen use by oilseed rape plants. *Annales UMCS, Sectio E, XXIV* 13:187-201 (in Polish)
- Zadoks JC, Chang TT, Konzak GF (1974) A decimal code for growth stages of cereals. *Weed Res* 14:415-21
- Zhang Z, Sum K, Lu A, Zhang X (1999) Study of the effect of sulphur fertilizer application on crops and balance of sulphur in soil. *J Henan Agric Sci* 5:25-7
- Zhao FJ, Salmon SE, Withers PJA, Monaghan JM, Evans EJ, Shewry PR, McGrath SP (1999) Variation in the breadmaking quality and rheological properties of wheat in relation to sulphur nutrition under field conditions. *J Cereal Sci* 30:19-31

Anna Podleśna, Małgorzata Jędrzycka*, Elżbieta Lewartowska*

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy w Puławach

* Instytut Genetyki Roślin Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu

Występowanie chorób grzybowych na rzepaku ozimym w warunkach zróżnicowanego nawożenia siarką i azotem

The occurrence of fungal diseases on winter oilseed rape in the conditions of differentiated sulphur and nitrogen fertilization

Słowa kluczowe: przebieg pogody, stopień porażenia, obrona roślin, SIR (Sulphur Induced Resistance)

Prowadzone doświadczenie polowe miało na celu ocenę działania nawożenia azotowo-siarkowego na zdrowotność rzepaku ozimego. Pierwszym czynnikiem doświadczenia było zróżnicowane nawożenie siarką (-S, +S) a drugim czynnikiem 6 poziomów nawożenia azotem. W okresie trzech lat prowadzenia badań stwierdzono, że występowanie chorób grzybowych na rzepaku zależało głównie od przebiegu pogody oraz nawożenia siarką i azotem. Rzepak nawożony siarką wykazywał na ogół mniejsze porażenie przez choroby grzybowe niż rośliny z obiektów kontrolnych a większe dawki azotu sprzyjały rozszerzaniu się infekcji chorobowych. Stosowane nawożenie siarką nie zabezpieczało całkowicie rzepaku przed chorobami grzybowymi, ale istotnie zmniejszało ich nasilenie. Chorobą, która występowała we wszystkich latach badań była sucha zgnilizna kapustnych powodowana przez grzyb *Leptosphaeria maculans*.

Key words: weather course, infection degree, defence of plants, Sulphur Induced Resistance (SIR)

In pro-ecological system of farming there is still a big problem of protection against diseases, especially in a situation of monoculture and increase of cultivated area. The use of fungicides is to-day a basis for protection system. In the literature we can find some information about the possibility to increase natural plant resistance by proper supply with sulphur and other mineral nutrients. The problem of sulphur deficit has been known in Poland for some years in connection with a considerable decrease of gaseous pollutants which in post-war period were the main source of sulphur for cultivated plants. The application of sulphur fertilizer can have a positive effect on their nutritive requirements and on the increase of plant resistance. The aim of field experiments was to evaluate the influence of nitrogen-sulphur fertilizers on healthiness of winter oilseed rape. The first experimental factor was differentiated sulphur fertilization (-S, +S) and the second — 6 levels of nitrogen fertilization. During vegetation fungicides were used also for the objects with and without sulphur. The observations of plant healthiness were performed just before oilseed rape harvest. In the period of three years of experiment it was found that the occurrence of fungal diseases on oilseed rape was dependent mainly on weather course as well as sulphur and nitrogen fertilization. The oilseed rape sprayed with fungicides and fertilized with sulphur showed lower fungal disease infection than plants from control objects where plants were protected only by fungicides. It was found that sulphur fertilizers used in experiments did not fully protect oilseed rape against fungal diseases but significantly decreased the infection size of the following pathogens: *Pyrenopeziza brassicae*, *Phoma*

lingam, *Perenospora parasitica*, *Erysiphe cruciferarum*, *Alternaria*. However there was a 2001/2002 season in Baborówko where higher infection was found in objects with mineral sulphur than at control ones. Greater nitrogen doses promoted in general the disease infection because of longer duration of green leaves and greater vegetative mass of plants. Stem cancer caused by *Leptosphaeria maculans*/ *Phoma lingam* was a disease which occurred in all years of the research.

Wstęp

Rzepak ozimy jest narażony na infekcje chorobowe w ciągu całego okresu wegetacji, co powoduje że oczekiwania związane z uzyskaniem zadowalającego plonu nie są często spełnione. Wzrost powierzchni uprawy tej rośliny oraz częste występowanie rzepaku po sobie dodatkowo sprzyja porażeniu zasiewów chorobami grzybowymi. Jak podaje Korbas i in. (2001) straty w plonie nasion rzepaku mogą wynosić 10–60% plonu roślin wolnych od grzybów chorobotwórczych. Tymczasem za odczuwalny próg szkodliwości dla agrofagów przyjmuje się już 3–5,5% stratę w plonie (Piekarczyk i Woźny 1986). Aby chronić rzepak przed infekcjami grzybowymi wprowadza się do rejestru nowe, genetycznie odporne odmiany oraz zaleca się przestrzeganie prewencyjnych zabiegów agrotechnicznych (Krzymański 2002). Jednakże obecnie najszerzej stosowaną metodą zmniejszenia szkodliwości chorób rzepaku jest aplikacja środków grzybobójczych. Oprócz wymienionych metod pojawiają się w literaturze informacje o korzystnym oddziaływaniu siarki nawozowej na wzrost tzw. „naturalnej” odporności roślin z rodziny krzyżowych względem stresu biotycznego spowodowanego atakiem szkodników i chorób (Sadowski i in. 2002, Schnug i Ceynowa 1990). Zastosowanie siarki nawozowej stwarzałoby możliwość zmniejszenia ilości stosowanych preparatów chemicznych przy jednoczesnym uzupełnieniu zasobów tego makroelementu, który jest składnikiem niezbędnym dla prawidłowego rozwoju rzepaku.

Celem badań była ocena wpływu zastosowanego nawożenia siarką i azotem na stan zdrowotności roślin rzepaku ozimego w uprawie polowej.

Material i metody

Doświadczenia założono w SD Baborówko (woj. wielkopolskie) i RZD Grabów (woj. mazowieckie) należących do IUNG–PIB w Puławach. Badania prowadzono w trzech sezonach wegetacyjnych, w latach 1999–2002. Połowa obiektów nie otrzymała nawozów siarkowych, a pozostałą część nawożono siarką mineralną. Nawożenie azotem zróżnicowano na 6 poziomów: 0 (kontrola), 40, 80, 120, 160 i 200 kg N/ha. W wariancie bez siarki stosowano zaprawianie nasion preparatem Super Homai 70 DS, trzykrotne opryskiwanie roślin przeciwko szkodnikom oraz w okresie wiosennym dwukrotny oprysk fungicydem Horizon 250 EW. Nawozy N,

Występowanie chorób grzybowych na rzepaku ozimym ...

175

P i K podawano w formie bezsiarkowej. Wariant z siarką obejmował zaprawianie nasion preparatem Super Homai 70 DS oraz trzykrotną aplikację insektycydu (dwukrotnie Bancol 50 WP i jeden raz Bulldock 25 EC lub Fury). Ponadto w tych obiektach stosowano dodatkowo fungicyd Rovral FLO 255 SC w dawce 3,0 l/ha (RZD Grabów) lub Ronilan w dawce 1,5 l/ha (SD Baborówko) oraz w sezonie 2000/2001 i 2001/2002 preparat Siarkol K 85 WP (4 kg/ha). Dawka siarki wynikała z ilości tego składnika wniesionej jesienią wraz z nawozami NPK i wynosiła średnio 90 kg S/ha. Doświadczenie prowadzono w dwu powtórzeniach w układzie bloków losowanych. Obiektem badawczym były odmiany populacyjne rzepaku ozimego: Kana (RZD Grabów) i Lisek (SD Baborówko). Obserwacje porażenia roślin prowadzono na obu wariantach nawożenia siarką i następujących poziomach nawożenia N: sezon 1999/2000 — 0, 120 i 200 kg N/ha, sezon 2000/2001 — 0, 80, 120 i 200 kg N/ha oraz w sezonie 2001/2002 — na wszystkich 6 poziomach azotu. Wyniki pochodzą z obserwacji 100 losowo wybranych roślin z każdego poziomu nawożenia i obu powtórzeń. Wszystkie obserwacje wykonywane były przez te same osoby w obu miejscowościach, tuż przed zbiorem rzepaku. Wyjątkiem był sezon 2000/2001 w SD Baborówko, gdzie jesienią wystąpiła infekcja powodowana przez grzyb *Peronospora parasitica*. Analizę wariancji wykonano przy pomocy programu Statgraphics 5.1.

Wyniki

Warunki pogodowe występujące w latach prowadzenia badań przedstawiono w tabeli 1. Należy zaznaczyć, że średnie miesięczne temperatury miały podobny układ w obu stacjach. Natomiast generalnie wyższe opady stwierdzono w RZD Grabów, szczególnie w dwu pierwszych sezonach wegetacyjnych oraz niewiele wyższe w sezonie 2001/2002. Jednak w okresie wczesnej wiosny, od marca do maja, w Baborówko stwierdzono mniej opadów w porównaniu do analogicznego okresu w Grabowie, gdzie najwyższe opady wystąpiły w okresie dojrzewania roślin. Opady zanotowane dla SD Baborówko przewyższały dane z Grabowa, zwłaszcza w okresie od stycznia aż do maja. Ponadto styczeń 2002 roku charakteryzował się w ZD Baborówko dodatnimi temperaturami. Również następne miesiące (luty, marzec) były cieplejsze niż w poprzednich latach.

Tabela 1

Przebieg warunków meteorologicznych — *Meteorological conditions course*

Miesiąc <i>Month</i>	1999/2000		2000/2001		2001/2002	
	temperatura <i>temperature</i> [°C]	opady <i>rainfall</i> [mm]	temperatura <i>temperature</i> [°C]	opady <i>rainfall</i> [mm]	temperatura <i>temperature</i> [°C]	opady <i>rainfall</i> [mm]
SD Baborówko						
IX	17,1	27,0	12,8	45,6	12,2	123,3
X	8,8	47,8	12,0	16,0	12,3	26,0
XI	3,0	26,4	6,3	48,6	3,3	60,2
XII	-1,9	39,2	2,3	46,6	-1,5	21,8
I	-0,1	30,4	-0,1	25,4	0,7	51,0
II	3,5	44,0	0,6	19,2	4,7	44,6
III	4,3	96,0	2,3	41,4	6,0	47,2
IV	11,8	14,0	7,9	41,8	8,6	40,6
V	16,3	60,0	14,2	12,0	16,1	43,8
VI	17,3	41,0	14,6	75,4	16,5	32,0
VII	16,1	61,6	19,7	25,6	20,1	28,4
RZD Grabów						
IX	15,0	33,8	11,6	77,4	12,1	102,2
X	8,0	65,7	10,9	10,9	10,7	29,2
XI	1,1	35,9	5,9	46,2	1,9	25,2
XII	0,1	23,1	1,3	44,5	-5,4	12,6
I	-1,9	37,7	-0,8	36,9	-1,1	37,7
II	2,0	40,0	-1,3	20,8	3,3	52,3
III	3,2	74,5	0,2	64,4	4,3	30,6
IV	11,8	62,3	8,1	107,5	8,4	25,5
V	15,0	63,9	14,0	13,9	17,0	22,1
VI	17,3	24,0	15,2	67,4	17,4	104,4
VII	17,1	181,9	20,3	206,4	21,0	105,0

W pierwszym roku prowadzenia obserwacji w obu miejscowościach wystąpiły na rzepaku objawy mączniaka, czerni krzyżowych na łuszczykach oraz suchej zgnilizny kapustnych (tab. 2 i 3). W obiektach nawożonych siarką zmniejszyło się nasilenie jasnej plamistości liści wywołanej przez grzyb *Pyrenopeziza brassicae*, suchej zgnilizny kapustnych powodowanej przez *P. lingam* (SD Baborówko) oraz mączniaka prawdziwego, który powodowany jest przez *E. cruciferarum* i czerni krzyżowych wywołanej przez *Alternaria* spp. (RZD Grabów). Zwiększyło się

Występowanie chorób grzybowych na rzepaku ozimym ...

177

Tabela 2

Procent roślin rzepaku porażonych przez patogeny grzybowe w SD Baborówko

Percent of oilseed rape plants infected with fungal pathogens in Baborówko

Nawożenie <i>Fertilization</i>	1999/2000				2000/2001	
	<i>Erysiphe cruciferarum</i>	<i>Pyrenopeziza brassicae</i>	<i>Alternaria</i> spp. na łuszczykach on siliques	<i>Phoma lingam</i>	<i>Phoma lingam</i>	<i>Peronospora parasitica</i> (jesień — fall)
	% roślin porażonych — <i>percent of infected plants</i>					
Siarka — <i>Sulfur</i>						
-S	73,7 a*	58,0 b	19,3 a	13,0 b	20,9 b	69,9 b
+S	70,0 a	50,3 a	21,7 b	10,7 a	15,9 a	53,3 a
Azot — <i>Nitrogen</i> [kg/ha]						
0	68,5 a	40,0 a	10,0 a	8,5 a	19,3 b	52,3 a
80	—	—	—	—	14,9 a	58,8 b
120	70,0 a	57,0 b	25,5 b	10,5 a	17,8 b	66,3 c
200	77,0 b	65,5 c	26,0 b	16,5 b	21,4 c	69,0 d

* liczby w kolumnach oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie
numbers in columns marked with the same letters did not differ significantly

Tabela 3

Procent roślin rzepaku porażonych przez patogeny grzybowe w RZD Grabów

Percent of oilseed rape plants infected with fungal pathogens in Grabów

Nawożenie <i>Fertilization</i>	1999/2000				2000/2001		
	<i>Erysiphe cruciferarum</i>	<i>Alternaria</i> na łuszczykach <i>on siliques</i>	<i>Phoma lingam</i>	<i>Verticillum</i> spp.	<i>Phoma lingam</i>	<i>Botritis cinerea</i>	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>
	% roślin porażonych <i>percent of infected plants</i>					stopień porażenia <i>disease severity of infected plants</i>	
Siarka — <i>Sulfur</i>							
-S	72,3 b*	42,7 b	11,8 a	3,7 a	12,0 b	1,5 b	0,25 a
+S	62,9 a	29,7 a	15,3 b	5,7 b	9,3 a	1,0 a	1,25 b
Azot — <i>Nitrogen</i> [kg/ha]							
0	63,0 a	19,5 a	6,0 a	3,0 a	6,8 a	1,0 a	0,0 a
80	—	—	—	—	15,0 c	1,0 a	1,0 b
120	69,0 b	38,0 b	12,0 b	5,0 b	10,0 b	2,0 b	2,0 c
200	69,5 b	51,0 c	23,5 c	6,0 b	10,8 b	1,0 a	0,0 a

* objaśnienia pod tabelą 2 — *explanations under Table 2*

równocześnie porażenie przez suchą zgniliznę kapustnych i zgniliznę łądyg rzepaku zwaną verticiliozą. Wzrost dawek azotu powodował wzrost rozmiaru wszystkich infekcji chorobowych rzepaku. Niezależnie od nawożenia największe porażenie, wyrażone w procentach roślin porażonych, było spowodowane przez grzyb *E. cruciferarum*.

W sezonie 2000/2001 stwierdzono mniej chorób grzybowych na rzepaku. Jednakże jesienią 2001 roku wystąpiła w SD Baborówko znaczna infekcja mączniaka rzekomego wywołana przez grzyb *P. parasitica*. W obiektach nawożonych siarką stwierdzono istotnie mniejsze porażenie tym patogenem, natomiast rozmiary infekcji wzrastały wraz ze wzrostem dawek nawożenia azotowego. W obu miejscowościach na rzepaku nawożonym siarką stwierdzono mniejszy procent roślin porażonych przez suchą zgniliznę kapustnych, a także mniejsze porażenie przez szarą pleśń powodowaną przez *B. cinerea*. Przeciwny efekt uzyskano dla infekcji wywołanej przez grzyb *S. sclerotiorum*. W przypadku wymienionych chorób wpływ dawek azotu był niejednoznaczny.

W ostatnim okresie wegetacyjnym wystąpiło więcej chorób grzybowych na badanych odmianach populacyjnych rzepaku (tab. 4 i 5). Należy zaznaczyć również, że w Baborówku większe porażenie chorobami stwierdzono w obiektach nawożonych siarką. Nie było ponadto wyraźnej tendencji charakteryzującej wpływ dawek azotu na rozmiar infekcji. Natomiast w RZD Grabów zastosowanie siarki istotnie zmniejszyło nasilenie wszystkich chorób grzybowych (tab. 5). Wystąpiło też, podobnie jak w Baborówku, znaczne porażenie roślin przez suchą zgniliznę kapustnych. Rozmiar infekcji zwiększał się w obiektach wyżej nawożonych azotem oraz stwierdzono większy stopień porażenia tą chorobą ocenianych roślin. Pozostałe choroby rzepaku nie stanowiły większego zagrożenia bowiem średni stopień porażenia łądyg a zwłaszcza łuszczyn przez czern krzyżowych świadczył o niewielkim zagrożeniu tą chorobą. Również stopień porażenia roślin przez szarą pleśń, zgniliznę twardzikową i verticiliozę przyjmował małe wartości.

Dyskusja

Chociaż odporność roślin jest kontrolowana genetycznie to może w znacznym stopniu podlegać działaniu czynników środowiska. W tym względzie dużą rolę odgrywają warunki pogodowe panujące w ciągu całego roku. Potwierdzają to szczegółowe badania Mączyńskiej i in. (2001) oraz Kurowskiego i Budzyńskiego (2003), którzy stwierdzili, że ciepła jesień umożliwia rozwój wielu chorób rzepaku, a duża ilość opadów wiosną i w okresie kwitnienia rzepaku sprzyja dalszemu ich rozwojowi. Obserwacje prowadzone przez tych autorów stwierdzają występowanie czerni krzyżowych na organach wegetatywnych i łuszczynach oraz zgnilizny twardzikowej i szarej pleśni na przełomie 1999 i 2000 roku. Podobne warunki

Występowanie chorób grzybowych na rzepaku ozimym ...

179

Tabela 4

Porażenie rzepaku odmiany Lisek przez choroby grzybowe w SD Baborówko (2001/2002)
Infestation of Lisek oilseed rape by fungal diseases in Baborówko (2001/2002)

Nawożenie <i>Fertilization</i>	<i>Phoma lingam</i>		<i>Alternaria</i> spp.		<i>Botritis cinerea</i>	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>
			łodygi <i>stems</i>	łuszczyzny <i>siliques</i>		
	% roś. por. <i>% infected plants</i>	stopień porażenia <i>disease severity of infected plants</i>				
Siarka — <i>Sulfur</i>						
-S	37,7 a	1,28 a	0,29 a	0,42 a	0,16 a	0,68 a
+S	41,8 b	1,54 b	0,34 b	0,61 b	0,21 b	0,65 a
Azot — <i>Nitrogen</i> [kg/ha]						
0	23,0 a	0,83 a	0,32 b	0,44 ab	0,20 a	0,27 a
40	41,5 d	1,62 c	0,25 a	0,50 b	0,14 a	0,63 b
80	45,5 e	1,68 c	0,38 b	0,63 c	0,20 a	0,81 d
120	49,3 f	1,77 c	0,25 a	0,50 b	0,14 a	0,59 b
160	38,8 b	1,23 b	0,32 b	0,38 a	0,28 b	0,71 c
200	40,3 c	1,33 b	0,38 b	0,63 c	0,16 a	0,99 e

* objaśnienia pod tabelą 2 — *explanations under Table 2*

Tabela 5

Porażenie rzepaku odmiany Kana przez choroby grzybowe w RZD Grabów 2001/2002
Infestation of Kana oilseed rape by fungal diseases in Grabów (2001/2002)

Nawożenie <i>Fertilization</i>	<i>Phoma lingam</i>		<i>Alternaria</i> spp.		<i>Botritis cinerea</i>	<i>Sclerotinium sclerotiorum</i>	<i>Verticillium</i> spp.
			łodygi <i>stems</i>	łuszczyzny <i>siliques</i>			
	% roś. por. <i>% infected plants</i>	stopień porażenia <i>disease severity of infected plants</i>					
Siarka — <i>Sulfur</i>							
-S	40,8 a*	1,59 b	0,57 b	0,40 b	0,06 b	0,08 b	2,08 b
+S	37,4 b	1,42 a	0,48 a	0,31 a	0,04 a	0,03 a	1,43 a
Azot — <i>Nitrogen</i> [kg/ha]							
0	24,8 a	0,90 a	0,44 ab	0,32 a	0,04 bc	0,00 a	0,97 b
40	39,0 b	1,42 b	0,32 a	0,44 b	0,09 cd	0,01 b	2,40 c
80	44,8 d	1,68 bc	0,69 c	0,44 b	0,07 d	0,08 ab	3,42 d
120	41,0 c	1,60 bc	0,57 bc	0,32 a	0,00 a	0,15 b	0,00 a
160	43,3 d	1,53 bc	0,57 bc	0,32 a	0,01 ab	0,08 ab	2,25 c
200	44,3 d	1,90 c	0,57 bc	0,32 a	0,08 d	0,02 ab	1,50 bc

* objaśnienia pod tabelą 2 — *explanations under Table 2*

meteorologiczne wystąpiły w tym sezonie w miejscach prowadzenia doświadczenia, stąd na obu odmianach stwierdzono czerń krzyżowych oraz znaczne nasilenie mączniaka rzekomego i mączniaka prawdziwego. Stwierdzono też stosunkowo niewielkie porażenie przez suchą zgniliznę kapustnych, która występuje powszechnie na terenie całego kraju (Jędrzycka i in. 1994, 1997). Według obserwacji prowadzonych w roku 2000 średnie porażenie tą chorobą w kraju było o 1,9% niższe niż średnia wieloletnia natomiast dla województwa wielkopolskiego i lubelskiego wynosiło odpowiednio 5,8 i 4,3% (Walczak i in. 2001). Mniejsze opady i niższa temperatura w okresie zimy i wczesnej wiosny spowodowały prawdopodobnie mniejsze nasilenie chorób w sezonie 2000/2001 w przeciwieństwie do roku następnego 2001/2002, kiedy w SD Baborówko zanotowano stosunkowo wysokie temperatury i dużo opadów w okresie jesienno-wiosennym. W RZD Grabów w omawianym okresie wystąpiły nieco inne warunki pogodowe. Grudzień i styczeń charakteryzował się ujemnymi temperaturami a od kwietnia do lipca temperatury były stosunkowo wysokie (8,4–21,0°C). Pomimo niewielkich różnic w obu miejscowościach wystąpiły te same choroby rzepaku. O ile jednak w większości występujących chorób stwierdzono obniżenie ich nasilenia w obiektach z siarką mineralną, to w ostatnim roku prowadzenia badań w SD Baborówko uzyskano efekt przeciwny. Można przypuszczać, że znaczne opady występujące od września 2001 aż do maja 2002 roku spowodowały wymycie składników pokarmowych podanych zarówno przed siewem nasion, jak również azotu podawanego regularnie po ruszeniu wegetacji. Dotyczyć to mogło także siarki siarczanowej, która jak wiadomo łatwo ulega przemieszczeniu poza zasięg systemu korzeniowego roślin. O nietypowym przebiegu wzrostu i rozwoju rzepaku w SD Baborówko mogą świadczyć wyjątkowo niskie plony nasion (średnio 1,7 t/ha) i słomy (średnio 2,9 oraz 3,2 t/ha, odpowiednio dla obiektów -S i +S) uzyskane w roku 2002. Znacznie zmniejszone jest również pobranie przez te rośliny większości makroelementów (dane nie publikowane). Te informacje mogą wskazywać na wystąpienie innego czynnika, który osłabił wzrost i rozwój rzepaku jeszcze w okresie jesieni. Mogło to być znaczne (około 50–60%) porażenie młodych roślin przez mączniaka rzekomego kapustnych, który dostaje się do roślin przez szparki oddechowe. Jak wiadomo, złe funkcjonowanie szparek oddechowych obok ograniczenia powierzchni asymilacyjnej, spadku zawartości chlorofilu lub degeneracji chloroplastów jest uważane za główną przyczynę zmniejszenia aktywności fotosyntetycznej roślin (Grzesiuk i in. 1999). Obniżona aktywność fotosyntetyczna przy wzrastającej intensywności oddychania mogła znacznie zmniejszyć przyrost masy rzepaku oraz jego zapotrzebowanie na składniki pokarmowe. Rośliny rzepaku były w tych warunkach słabsze i łatwiej ulegały infekcjom innych chorób. Natomiast większe porażenie roślin nawożonych siarką może wynikać ze współdziałania azotu i siarki w intensyfikacji procesów metabolicznych. Dostępność siarki (i azotu) spowodowała pewien przyrost masy organów wegetatywnych rzepaku w stosunku do roślin

Występowanie chorób grzybowych na rzepaku ozimym ...

181

nie nawożonych tym składnikiem. Rośliny osłabione po jesiennej infekcji oraz zimie, które wytwarzały dodatkowo większe i dłużej funkcjonujące liście miały osłabione mechanizmy obronne i były bardziej narażone na infekcje.

Następnym elementem środowiska oddziałującym na poziom odporności roślin uprawnych jest nawożenie mineralne (Marschner 1995). Liczne badania potwierdzają, że odpowiednia koncentracja siarki w roślinach wywołuje szereg zmian, które prowadzą do wzrostu odporności względem inwazji patogenów grzybowych (Schnug i Ceynowa 1990). Można zatem przyjąć, że mniejsze porażenie rzepaku przez choroby wynikało z dodatkowego nawożenia siarką, bowiem ten składnik jest obecny w glukozynolanach, których zawartość w rzepaku zależy od dostępności siarki (Horodyski i Krzywińska 1979). Wykazano doświadczalnie, że produkty rozpadu tych związków cechuje wysoka aktywność biologiczna, co przejawia się znaczną toksycznością m.in. w stosunku do grzybów patogennych (Schnug i Ceynowa 1990). Stwierdzono, że produkty rozpadu glukozynolanów są efektywne przeciwko *L. maculans*, *P. parasitica*, *P. brassicae* i *Alternaria* spp. (Osbourn 1996). Z badań Booth i Walker (1997) prowadzonych w Anglii wynika jednak, że wzrastający poziom glukozynolanów w rzepaku nie może zastąpić działania fungicydów, ale może wpłynąć na obniżenie smakowitości i wzrostu toksyczności zaatakowanej rośliny. Zmusza to szkodniki do poszukiwania mniej toksycznych źródeł pokarmu (Waligórska i Krzymańska 1993). Dzięki temu uszkodzenia przybierają mniejsze rozmiary, a to zmniejsza wrota zakażenia i ryzyko rozprzestrzeniania się chorób. Wcześniejsze prace Podleśnej (2003, 2004) potwierdzają wyższą koncentrację siarki w rzepaku nawożonym tym składnikiem, co może pośrednio wskazywać na wyższą zawartość glukozynolanów.

Patogeny grzybowe wywołują różne reakcje obrony biochemicznej w roślinie, w których uczestniczy siarka (Gullner i Kőmives 2001). W ostatnich latach stwierdzono, że ważną rolę we wszystkich reakcjach obronnych roślin odgrywa glutation (GSH), który powstaje m.in. z cysteiny (Rennenberg 1997). Biochemiczne funkcje glutationu w zainfekowanych roślinach to przede wszystkim produkcja wtórnych metabolitów roślinnych, tj. ligniny (wzmocnienie ścian komórkowych) czy fitoaleksyn. Wspomniane fitoaleksyny to związki o szerokim spektrum działania, które jednak nie występują w zdrowych tkankach roślinnych, ale są syntetyzowane w komórkach usytuowanych niedaleko miejsca infekcji. Fitoaleksyny obecne w roślinach krzyżowych mają co najmniej jeden atom siarki i wykazują różne rodzaje aktywności przeciwko chorobom grzybowym (Soledade i in. 1998). Jednakże zdaniem Benta (1996) tego rodzaju substancje mogą ograniczyć kolonizację ale często nie blokują całkowicie choroby. Potwierdzałoby to uzyskane przez nas wyniki, które wskazują tylko (choć często istotne) zmniejszenie rozmiaru infekcji w obiektach nawożonych siarką w porównaniu do obiektów kontrolnych. W Niemczech opracowano model SIR (Sulphur Induced Resistance) służący do oceny odporności roślin uprawnych na choroby grzybowe indukowanej dobrym stanem ich zaopatrzenia w siarkę (Salac i in. 2003).

W literaturze ostatnich lat można znaleźć informacje o oddziaływaniu siarki nawozowej na wzrost koncentracji i pobrania przez rzepak siarki, azotu, potasu oraz wapnia (Lośák i in. 2000, Podleśna 2004). Dotyczy to zwłaszcza organów wegetatywnych, które są przez dłuższy okres rozwoju rośliny narażone na atak czynników chorobotwórczych. Wraz ze wzrostem dawki azotu stwierdzono w doświadczeniu wyraźny wzrost porażenia rzepaku przez *E. cruciferarum*, *P. brassicae*, *Alternaria* spp., *P. lingam* oraz *Verticillium* spp. w dwu pierwszych latach badań. W sezonie 2001/2002 sytuacja jest bardziej skomplikowana, szczególnie jeśli chodzi o wyniki uzyskane w SD Baborówko. Jankowski i Budzyński (1997) oraz Kurowski i Budzyński (2003) także obserwowali tendencję do większego porażenia przez *B. cinerea* rzepaku nie chronionego, nawożonego większymi dawkami azotu. W badaniach Sadowskiego i in. (2002) stwierdzono silniejsze objawy *E. cruciferarum* i *P. parasitica* na poletkach nawożonych wyższymi dawkami azotu. Natomiast lepsze zaopatrzenie roślin w azot skutkowało mniejszym ich porażeniem przez *S. sclerotiorum* (Jankowski i Budzyński 1997), podczas gdy nasze wyniki uzyskane w SD Baborówko mają tendencję przeciwną. Zdaniem Marschnera (1995) takie zróżnicowanie reakcji na nawożenie azotem wynika ze specyfiki samego czynnika chorobotwórczego. Z jednej strony azot zwiększa wzrost roślin oraz proporcję młodych liści do starych. Jednocześnie w roślinach dobrze odżywionych azotem wzrasta koncentracja aminokwasów, a spada aktywność enzymów uczestniczących w metabolizmie fenoli. Tymczasem odpowiednia ilość związków fenolowych w roślinie jest ważna, ponieważ pełnią one rolę ochronną przed infekcją mikroorganizmów. Wiele z nich ma charakter fitoaleksyn (Strzałka 1998). Stąd rośliny wysoko nawożone azotem są atrakcyjniejsze dla patogenów i szkodników przy słabszych mechanizmach obronnych.

Znaczna rola w tworzeniu odporności roślin względem chorób grzybowych przypada bez wątpienia wapniowi (Marschner 1995), którego koncentracja wzrastała w organach wegetatywnych rzepaku nawożonego siarką (Podleśna 2004). Po pierwsze wapń jest składnikiem niezbędnym dla stabilizacji membran. Po drugie składniki zawierające wapń są potrzebne do tworzenia stabilności ścian komórkowych, co polega na silnym hamowaniu przez jony Ca^{2+} aktywności enzymów rozpuszczających środkowe płytki ściany komórkowej skórki. Dzięki temu wiele grzybów i bakterii nie może wtargnąć do tkanki roślinnej.

Przedstawione hipotezy i wyniki badań naukowych dotyczące wpływu nawożenia na odporność rzepaku wskazują czynniki związane z powstawaniem naturalnej obrony roślin przed czynnikami chorobotwórczymi. Należy jednak pamiętać, że o ile pewne oddziaływania pomiędzy rośliną i patogenem są rozpoznane w badaniach laboratoryjnych, to w warunkach uprawy polowej zjawisko to jest bardziej złożone.

Występowanie chorób grzybowych na rzepaku ozimym ...

183

Wnioski

- Występowanie chorób grzybowych rzepaku zależało od lokalizacji doświadczenia, przebiegu pogody i zastosowanego nawożenia azotowo-siarkowego.
- Corocznie w obu stacjach występowała sucha zgnilizna kapustnych powodowana przez grzyb *Leptosphaeria maculans*.
- Rzepak, w którym stosowano fungicydy i równocześnie nawożono siarką wykazywał na ogół mniejsze porażenie przez główne choroby grzybowe w porównaniu do obiektów chronionych tylko fungicydami.
- Większe dawki azotu powodowały z reguły wzrost rozmiaru infekcji chorobowych rzepaku.

Literatura

- Bent A.F. 1996. Plant disease resistance genes: function and structure. *Plant Cell*, 8: 1757-1771.
- Booth E., Walker K. 1997. The effectiveness of foliar glucosinolate content raised by sulphur application on disease control in oilseed rape. In: *Sulphur metabolism in higher plants*. Ed. W.J. Cram et al., Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands: 327-329.
- Grzesiuk S., Koczowska I., Górecki R.J. 1999. Fizjologiczne podstawy odporności roślin na choroby. Wyd. ART w Olsztynie.
- Gullner G., Kömives T. 2001. The role of glutathione and glutathione-related enzymes in plant-pathogen interactions. In: *Significance of glutathione to plant adaptation to the environment*. Ed. D. Grill et al., Kluwer Academic Publishers, The Netherlands: 207-239.
- Horodyski A., Krzywińska F. 1979. Wpływ nawożenia siarką na plon i jakość rzepaku ozimego. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 229: 101-109.
- Jankowski K., Budzyński W. 1997. Nawożenie azotem a stopień uszkodzeń rzepaku ozimego przez szkodniki. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 439: 273-280.
- Jędrzycka M., Lewartowska E., Fencel I. 1994. Properties of *Phoma lingam* (Tode ex Fr.) Desm. isolates from Poland. I. Pathogenicity characterisation. *Phytopathologia Polonica*, 7 (XIX): 71-79.
- Jędrzycka M., Rouxel T., Balesdent M.H., Mendes-Pereira E., Bertrand J. 1997. Charakterystyka molekularna polskich szczepów grzyba *Leptosphaeria maculans* (Desm.) Ces. et de Not. *Rośliny Oleiste – Oilseed Crops*, XVIII (2): 305-314.
- Korbas M., Wałkowski T., Gwiazdowski R. 2001. Progi szkodliwości chorób rzepaku ozimego. *Progress in Plant Protection – Postępy w Ochronie Roślin*, vol. 41 (1): 286-290.
- Krzymański J. 2002. Kierunki prac w hodowli rzepaku. *Wiś Jutra*, 2: 5-7.
- Kurowski T.P., Budzyński W. 2003. Wpływ zróżnicowanego nawożenia azotem i ochrony przed szkodnikami na zdrowotność rzepaku jarego. *Rośliny Oleiste – Oilseed Crops*, XXIV (2): 455-463.
- Lošák T., Hřivná L., Richter R. 2000. Effect of increasing doses of nitrogen and sulphur on yields, quality and chemical composition of winter rape. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 472: 481-487.

- Marschner H. 1995. Relationships between mineral nutrition and plant diseases and pests. In: Mineral nutrition of higher plants. Academic Press: 436-460.
- Mączyńska A., Głazek M., Krzyżińska K., Banachowska J. 2001. Porażenie przez grzyby chorobotwórcze roślin rzepaku ozimego w latach 1999 i 2000. Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, XXII (1): 127-138.
- Osborn A.E. 1996. Performed antimicrobial compounds and plant defence against fungal attack. Plant Cell, 8: 1821-1831.
- Piekarczyk K., Woźny J. 1986. Progi ekonomicznej szkodliwości chorób i szkodników roślin uprawnych. Inst. Ochr. Roślin, Poznań: 3-9.
- Podleśna A. 2003. Wstępna ocena potrzeb nawożenia siarką rzepaku ozimego. Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, XXIV: 641-649.
- Podleśna A. 2004. Wpływ nawożenia siarką na zawartość i pobranie składników pokarmowych przez rzepak ozimy. Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, XXV: 627-636.
- Rennenberg H. 1997. Molecular approaches to glutathione biosynthesis. In: Cram et al (Eds.). Sulphur metabolism in higher plants. Molecular, ecophysiological and nutritional aspects. Buckhuys Publishers, Leiden.
- Sadowski Cz., Batur A., Lenc L., Trzciniński J. 2002. 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. Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, XXIII: 391-408.
- Salac I., Bloem E., Haneklaus S., Schnug E. 2003. Sulphur Induced Resistance (SIR). Nawozy i Nawożenie, 4 (17): 206-212.
- Schnug E., Ceynowa J. 1990. Phytopathological aspects of glucosinolates in oilseed rape. J. Agron. Crop Sci., 165: 319-328.
- Soledade M., Pedras C., Khan A.Q., Taylor J.L. 1998. The phytoalexin amalexin is not metabolized by *Phoma lingam*, *Alternaria brassicae* or phytopathogenic bacteria. Plant Sci., 139: 1-8.
- Strzałka K. 1998. Przemiany związków organicznych i energii u roślin. Procesy anaboliczne. W: Podstawy fizjologii roślin. Red. J. Kopcewicz i S. Lewak, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa: 285-340.
- Walczak F., Grendowicz L., Jakubowska M., Skorupska A., Strugała N., Trawa A., Wójtowicz A. 2001. Szkodliwość ważniejszych agrofagów roślin uprawnych w Polsce w 2000 roku i stan zachwaszczenia upraw roślin rolniczych. Progress in Plant Protection – Postępy w Ochronie Roślin, vol. 41 (1): 330-349.
- Waligórska D., Krzymańska J. 1993. Aktywność biologiczna glukozynolanów wyizolowanych z liści rzepaku. Post. Nauk Rol., 5: 151-156.

WSKAZÓWKI DLA AUTORÓW

W serii wydawniczej IUNG „**Monografie i Rozprawy Naukowe**” publikowane są recenzowane prace o charakterze monografii i oryginalne rozprawy naukowe (w tym prace habilitacyjne) z zakresu agronomii oraz ochrony i kształtowania środowiska rolniczego.

Wydruk tekstu do recenzji czcionką 11 p., z odstępem 1,5-wierszowym.

Przygotowanie do druku:

- tekst i tabele w programie Word, wersja 6.0 lub wyższa
- czcionka – Times New Roman
- układ pracy: spis treści, wstęp, metodyka, omówienie wyników i dyskusja, wnioski lub podsumowanie, literatura, streszczenie
- objaśnienia tabel, podpisy i opisy do rysunków oraz streszczenie pracy wraz ze słowami kluczowymi w językach polskim i angielskim

tekst

- czcionka – 11 p. (spis pozycji literatury – 9 p.)
- wcięcie akapitowe – 0,5 cm

tabele

- podział na wiersze i kolumny (z funkcji tworzenia tabel)
- szerokość dokładnie 13 cm (tabele w pionie) lub 19 cm (tabele w poziomie)
- czcionka 9 p., pojedyncze odstępy międzywierszowe
- umieszczone w oddzielnych plikach

rysunki

- czarno-białe
- wykresy w programie Word lub Excel
- wymiary w zakresie 13 cm × 19 cm
- dołączony wydruk w odpowiednich wymiarach, bardzo dobrej jakości, na białym papierze lub na folii
- w podpisach czcionka 9 p.
- na dyskietce w oddzielnych plikach

jednostki miary

- system SI
- jednostki zapisywać potęgowo (np. t·ha⁻¹)

literatura

- spis literatury w układzie alfabetycznym wg nazwisk autorów, w kolejności: nazwisko (pismo rozstrzelone), pierwsza litera imienia, tytuł pracy, miejsce publikacji: tytuł wydawnictwa (wg ogólnie przyjętych skrótów tytułów czasopism), rok, numer (pismo pogrubione), strony
- cytowanie w tekście – jako nazwisko autora (autorów) i rok wydania (w nawiasach okrągłych).

Pracę do recenzji należy składać w 2 egzemplarzach. Po recenzji oryginalny egzemplarz recenzowany i ostateczną wersję pracy, uwzględniającą uwagi recenzenta i redaktora, należy dostarczyć do Redakcji w 1 egzemplarzu oraz na dyskietce (lub przesłać e-mailem) na adres:

Dział Upowszechniania i Wydawnictw
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
e-mail: kmikulska@iung.pulawy.pl

W serii wydawniczej IUNG „**Monografie i Rozprawy Naukowe**” ukazały się następujące pozycje:

1. Adam Harasim – *Kompleksowa ocena płodozmianów z różnym udziałem roślin zbożowych i okopowych*. Puławy, 2002.
2. Stanisław Wróbel – *Określenie potrzeb nawożenia buraka cukrowego mikroelementami*. Puławy, 2002.
3. Janusz Podleśny – *Studia nad oddziaływaniem światła laserowego na nasiona, wzrost i rozwój roślin oraz plonowanie łubinu białego (*Lupinus albus* L.)*. Puławy, 2002.
4. Czesław Józefaciuk, Anna Józefaciuk, Eugeniusz Nowocień, Rafał Wawer – *Przeciwerozyjne zagospodarowanie zlewni wyżynnej potoku Grodarz z uwzględnieniem ograniczania występowania powodzi*. Puławy, 2002.
5. Jerzy Księżak – *Dynamika gromadzenia składników pokarmowych w organach roślin tradycyjnych i samokończących odmian bobiku w okresie od kwitnienia do dojrzałości pełnej*. Puławy, 2002.
6. Franciszek Pistelok – *Analiza zależności pomiędzy zanieczyszczeniem ze źródeł komunalnych a jakością powierzchniowych wód płynących na obszarach silnie zurbanizowanych na przykładzie zlewni Górnej Wisły*. Puławy, 2002.
7. Ewa Stanisławska-Głubiak – *Analiza wybranych czynników determinujących efekty dolistnego nawożenia molibdenem w uprawie rzepaku ozimego*. Puławy, 2003.
8. Kazimierz Noworolnik – *Wpływ wybranych czynników agrotechnicznych na plonowanie jęczmienia jarego w różnych warunkach siedliska*. Puławy, 2003.
9. Teresa Doroszevska – *Krzyżowanie oddalone i transformacja genetyczna w uzyskiwaniu odporności tytoniu (*Nicotiana tabacum* L.) na wirusa Y ziemniaka (PVY)*. Puławy, 2004.
10. Eugeniusz K. Chylek – *Uwarunkowania procesu modernizacji rolnictwa i obszarów wiejskich w Polsce*. Puławy, 2004.
11. Zbigniew Samoń – *Studia nad metodami energooszczędnego suszenia chmielu*. Puławy, 2004.
12. Ryszard Weber – *Zmienność plonowania odmian pszenicy ozimej w zależności od przedplonu i sposobu uprawy roli*. Puławy, 2004.
13. Janusz Igras – *Zawartość składników mineralnych w wodach drenarskich z użytków rolnych w Polsce*. Puławy, 2004.
14. Mariusz Kucharski – *Odporność chwastów na herbicydy z grupy inhibitorów fotosyntezy PSII na polach uprawnych południowo-zachodniej Polski*. Puławy, 2005.
15. Maria J. Król – *Azospirillum – asocjacyjne bakterie wiążące wolny azot*. Puławy, 2006.
16. Jerzy Grabiński – *Studia nad potencjałem allelopatycznym żyta ozimego*. Puławy, 2006.
17. Krzysztof Domaradzki – *Efektywność regulacji zachwaszczenia zbóż w aspekcie ograniczenia dawek herbicydów oraz wybranych czynników agroekologicznych*. Puławy, 2006.

18. Anna Stochmal – *Flawonoidy lucerny siewnej (Medicago sativa L.) – budowa chemiczna, właściwości spektralne, zawartość w zależności od odmiany i terminu zbioru*. Puławy, 2007.
19. Tomasz Stuczyński – *Assessment and modelling of land use change in Europe in the context of soil protection*. Puławy, 2007.
20. Jolanta Korzeniowska – *Potrzeby nawożenia pszenicy cynkiem, miedzią i borem w warunkach glebowo-klimatycznych Polski*. Puławy, 2008.
21. Maria J. Król, Janusz Smagacz – *Rozkład resztek pozbiorowych w glebie*. Puławy, 2008.
22. Agnieszka Klimkowicz-Pawlas – *Oddziaływanie wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych na siedliskową funkcję gleby*. Puławy, 2009.
23. Janusz Czaban – *Fitogeniczne dodatki do paszy świń ze szczególnym uwzględnieniem ich roli jako zamienników antybiotykowych stymulatorów wzrostu*. Puławy, 2009.
24. Maria J. Król – *Bakterie endofityczne*. Puławy, 2009.
25. Ryszard Weber – *Przydatność uprawy konserwującej w rolnictwie zrównoważonym*. Puławy, 2010.
26. Józefa Harasim, Adam Harasim – *Produkcyjność mieszanek pastwiskowych z udziałem koniczyny białej (Trifolium repens L.) w różnych warunkach siedliskowych*. Puławy, 2010.
27. Maria J. Król – *Bakterie utleniające siarkę elementarną i redukujące siarczany*. Puławy, 2010.
28. Andrzej Doroszewski – *Skład spektralny promieniowania jako czynnik kształtujący pokrój i plon pszenicy*. Puławy, 2011.
29. Jerzy Bieńkowski – *Wielokryterialna analiza możliwości zrównoważonego rozwoju gospodarstw rolniczych z uwzględnieniem czynników środowiskowych i ekonomicznych*. Puławy, 2011.
30. Hanna Gołębiowska – *Dynamika występowania flory segetalnej w uprawie kukurydzy na Dolnym Śląsku w latach 1972–2008 i obecne możliwości jej regulacji*. Puławy, 2011.
31. Maria J. Król – *Przemiany mikrobiologiczne żelaza w glebie*. Puławy, 2011.
32. Franciszek Woch, Krzysztof Wierzbicki, Andrzej Eymontt, Anna Dziadkiewicz-Ilkowska, Alina Syp, Jerzy Kopiński, Czesław Pietruch, Mirosław Nierubca, Antoni Miklewski, Piotr Maśloch – *Efektywność gospodarcza i ekonomiczna scalania gruntów w Polsce*. Puławy, 2011.
33. Maria J. Król – *Przemiany mikrobiologiczne fosforu w glebie*. Puławy, 2012.
34. Adam Harasim – *Ocena produkcji roślinnej na gruntach ornych w gospodarstwie rolniczym w ujęciu długookresowym*. Puławy, 2012.
35. Mariusz Matyka – *Produkcyjne i ekonomiczne aspekty uprawy roślin wieloletnich na cele energetyczne*. Puławy, 2013.
36. Beata Feledyn-Szewczyk – *Wpływ użytkowania gruntów na różnorodność gatunkową flory segetalnej*. Puławy, 2013.