



UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNO-PRZYRODNICZY  
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH  
W BYDGOSZCZY

## **ROZPRAWY NR 144**

Bożena Barczak

# **SIARKA JAKO SKŁADNIK POKARMOWY KSZTAŁTUJĄCY WIELKOŚĆ I JAKOŚĆ PŁONÓW WYBRANYCH ROŚLIN UPRAWNYCH**

BYDGOSZCZ – 2010

REDAKTOR NACZELNY  
prof. dr hab. inż. Janusz Prusiński

REDAKTOR DZIAŁOWY  
prof. dr hab. inż. Małgorzata Zalewska

OPINIODAWCY  
prof. dr hab. Barbara Filipek-Mazur  
prof. dr hab. Wiera Sądej

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE  
mgr Dorota Ślachciak, inż. Edward Gołata

© Copyright  
Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego  
Bydgoszcz 2010

ISSN 0209-0597

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego  
ul. Ks. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz, tel. 52 3749482, 3749426  
e-mail: [wydawucz@utp.edu.pl](mailto:wydawucz@utp.edu.pl) <http://www.wu.utp.edu.pl>

---

Wyd. I. Nakład 120 egz. Ark. aut. 7,9. Ark. druk. 8,25.  
Oddano do druku i druk ukończono w listopadzie 2010 r.  
Zakład Poligraficzny ARGONEX S.J.  
ul. Przemysłowa 34, 85-758 Bydgoszcz, tel. 52 348 93 11

## Spis treści

Wykaz skrótów i symboli .....	5
1. WSTĘP .....	7
2. PRZEGLĄD LITERATURY .....	9
2.1. Bilans siarki w agroekosystemach .....	9
2.2. Fizjologiczna rola siarki .....	14
2.3. Oddziaływanie siarki na plon roślin uprawnych .....	15
2.3.1. Wpływ siarki na wielkość plonu .....	15
2.3.2. Wpływ siarki na jakość plonu .....	16
2.3.3. Badania nad diagnostyką potrzeb nawożenia roślin siarką .....	18
3. HIPOTEZA BADAWCZA I CELE BADAŃ .....	20
4. MATERIAŁ I METODY BADAŃ .....	22
4.1. Charakterystyka doświadczenia polowego .....	22
4.1.1. Teren badań i warunki glebowe .....	22
4.1.2. Czynniki badań i warunki agrotechniczne doświadczenia .....	23
4.1.3. Charakterystyka odmian badanych gatunków roślin .....	24
4.2. Metody analiz chemicznych gleby i roślin .....	25
4.3. Badania biologiczne wartości odżywczej ziarna jęczmienia jarego .....	28
4.4. Metody statystyczne opracowania wyników .....	30
4.5. Warunki pogodowe w okresie prowadzenia badań polowych .....	30
5. OMÓWIENIE I DYSKUSJA WYNIKÓW .....	34
5.1. Plon nasion i słomy .....	34
5.1.1. Wpływ sposobu aplikacji i formy siarki na plon badanych gatunków roślin .....	34
5.1.2. Wpływ dawki siarki .....	38
5.1.2.1. Wpływ dawki siarki na wielkość plonu ziarna i słomy jęczmienia jarego .....	39
5.1.2.2. Wpływ dawki siarki na wielkość plonu nasion i słomy łubinu wąskolistnego .....	41
5.1.2.3. Wpływ dawki siarki na wielkość plonu nasion i słomy gorzycy białej .....	43
5.1.3. Wpływ warunków hydrotermicznych .....	46
5.2. Związki azotu w plonie badanych gatunków roślin .....	47
5.2.1. Zawartość azotu ogólnego i białkowego .....	47
5.2.2. Udział azotu białkowego w azocie ogólnym .....	53
5.2.3. Plon białka ogólnego .....	53
5.2.4. Skład frakcyjny białka .....	57
5.2.4.1. Zawartość N-albumin i N-globulin .....	60
5.2.4.2. Zawartość N-prolamin i N-glutelin .....	60
5.2.4.3. Zawartość N-niebiałkowego .....	61
5.2.5. Zawartość azotu azotanowego(V) .....	63
5.2.6. Skład aminokwasowy białka .....	65

5.3. Siarka w plonie badanych gatunków roślin .....	74
5.3.1. Zawartość siarki całkowitej i siarczanowej(VI) .....	74
5.3.2. Udział siarki siarczanowej(VI) w siarce ogólnej .....	81
5.3.3. Stosunek azotu ogólnego do siarki ogólnej .....	83
5.3.4. Zależność pomiędzy plonem ziarna jęczmienia jarego oraz nasion łubinu wąskolistnego i gorzycy białej a elementami ich składu chemicznego .....	86
5.4. Stosunki jonowe w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu wąskolistnego i gorzycy białej .....	89
5.5. Zawartość glukozyolanów w nasionach gorzycy białej .....	94
5.6. Zawartość kwasów tłuszczowych w nasionach gorzycy białej .....	100
5.7. Badania biologiczne .....	105
6. PODSUMOWANIE .....	110
7. WNIOSKI .....	113
LITERATURA .....	115
STRESZCZENIA .....	128

## Wykaz skrótów i symboli

### List of abbreviations and symbols

BV	–	wartość biologiczna Biological Value
CS	–	wskaźnik aminokwasu ograniczającego Chemical Score
EAAI	–	zintegrowany wskaźnik aminokwasów egzogennych Essential Amino Acid Index
HPLC	–	wysokosprawna chromatografia cieczowa High Performance Liquid Chromatography
$k$	–	współczynnik Sielianinowa Sielianinov's coefficient
MTN	–	masa tysiąca nasion
TSW	–	Thousand Seeds Weight
MTZ	–	masa tysiąca ziaren
TGW	–	Thousand Grain Weight
$N_{og.}$	–	azot ogólny
$N_{total}$	–	total nitrogen
$N_b$	–	azot białkowy
$N_{prot.}$	–	protein nitrogen
$N_{spoz.}$	–	zawartość azotu spożytego z dietą doświadczalną content of nitrogen consumed with the experimental diet
$N_k$	–	zawartość azotu w kale content of nitrogen in faeces
$N_{met.k}$	–	zawartość azotu metabolicznego w kale content of metabolic nitrogen in faeces
$N_m$	–	zawartość azotu w moczu content of nitrogen in urine
$N_{end.m}$	–	zawartość azotu endogennego w moczu content of endogenous nitrogen in urine
$N-NO_3^-$	–	azot azotanowy(V) nitrate nitrogen(V)
n.i.	–	różnice nieistotne
n.s.	–	non-significant differences
NIR	–	najmniejsza istotna różnica
LSD	–	Least Significant Difference

NPU	–	wykorzystanie białka netto Net Protein Utilization
NPR	–	retencja białka netto Net Protein Retention
PER	–	współczynnik wydajności wzrostowej Protein Efficiency Ratio
PER <sub>stand</sub>	–	standardowy współczynnik wydajności wzrostowej Protein Efficiency Ratio Standard
$r$	–	współczynnik korelacji liniowej coefficient of linear correlation
S <sub>og.</sub>	–	siarka ogólna
S <sub>total</sub>	–	total sulphur
S <sub>SO<sub>4</sub></sub>	–	siarka siarczanowa(VI) sulfate sulphur(VI)
TD	–	strawność rzeczywista True Digestibility
V%	–	współczynnik zmienności variation coefficient

## 1. WSTĘP

Siarka jest składnikiem niezbędnym dla życia roślin ze względu na jej rolę i udział w procesach życiowych wszystkich organizmów żywych, których prawidłowy rozwój nie jest możliwy bez pokrycia zapotrzebowania na ten pierwiastek (Marska i Wróbel 2000, Motowicka-Terelak i Terelak 2000, Kopcewicz i Lewak 2005, Podleśna 2005, Jakubus 2006).

Mimo niezbędności siarki dla prawidłowej wegetacji roślin jej nadmiar w środowisku jest zjawiskiem niepożądanym. Pierwiastek ten, szeroko rozpowszechniony w przyrodzie, wiele lat postrzegano przez pryzmat niekorzystnych skutków oddziaływania jego związków na glebę i roślinę (Motowicka-Terelak i Dudka 1991, Pyś i Pucek 1993, Sołek-Podwika i in. 2005). W Europie przez długie lata utrzymywał się dodatni bilans tego składnika w agroekosystemach, wynikający w dużej mierze z wysokiej emisji  $\text{SO}_2$  do atmosfery (Motowicka-Terelak i Terelak 2000). W ostatnich latach wskutek podjętych działań proekologicznych, a także zmiany asortymentu nawozów mineralnych oraz ograniczenia nawożenia obornikiem, w wielu krajach stwierdzono niedobory tego pierwiastka w produkcji roślinnej (Schnug i Haneklaus 1994, Singh 1994, Haneklaus i in. 2000, McGrath i in. 2003, Stern 2005, Morris 2007). W warunkach Polski, przy dominującym udziale gleb lekkich i bardzo lekkich, w sytuacji, gdy tradycyjne źródła siarki ulegają ograniczeniu, pojawiają się coraz liczniejsze sygnały o niedoborach tego pierwiastka w glebie (Grzebisz i Przygocka-Cyna 2000, Motowicka-Terelak i Terelak 2000, Wielebski i in. 2000). Można sądzić, że jego postępujący deficyt może być czynnikiem ograniczającym efektywność nawożenia, w szczególności nawożenia azotem.

Zachwianie bilansu siarki w agroekosystemach spowodowało wzrost zainteresowania problemem oddziaływania tego składnika na wielkość i jakość plonów roślin uprawnych. Stosunkowo dużo badań prowadzono nad rzepakiem, zaliczanym do roślin siarkolubnych (Asare i Scarisbrick 1995, Cyna i Grzebisz 2003, Lośak i Richter 2003, Szulc i in. 2003), natomiast tylko nieliczne publikacje dotyczą gatunków o mniejszych potrzebach pokarmowych w stosunku do siarki, mianowicie – zbóż i roślin bobowatych.

Mniej poznanym obszarem jest oddziaływanie nawożenia siarką, zwłaszcza u roślin uprawianych na cele paszowe oraz jako surowce dla przemysłu rolno-spożywczego, na jedno z najważniejszych kryteriów wartości biologicznej plonów – zawartość i jakość białka. Dotychczasowe badania nie rozstrzygają jednoznacznie kierunku zmian jakości białka roślinnego w warunkach zróżnicowanego zaopatrzenia roślin w ten składnik. W krajach Unii Europejskiej, podobnie jak w Polsce, występuje duży deficyt surowców białkowych pochodzenia roślinnego (Prusiński i Kotecki 2006). Roczne zapotrzebowanie naszego kraju na wysokobiałkowe komponenty zaspokajające potrzeby paszowe wynosi około 1 mln ton. Zapotrzebowanie to jest w 80% pokrywane przez import prawie 2 mln ton śruty sojowej, którą otrzymuje się przede wszystkim ze zmodyfi-

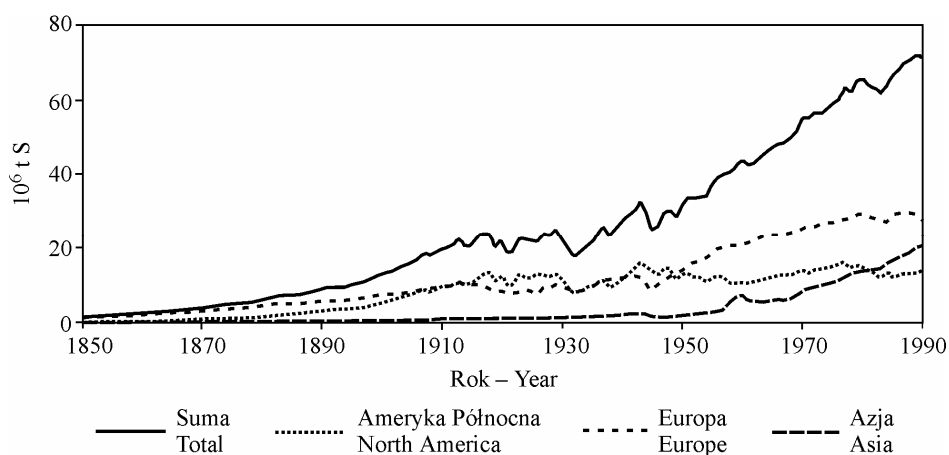
kowanych genetycznie odmian soi (Święcicki i in. 2007). Ze względu na rolę białka w żywieniu, jak również na jego wpływ na wartość technologiczną pło-  
nów, ważne jest oznaczanie nie tylko ogólnej zawartości białka, ale i jego składu  
aminokwasowego oraz frakcyjnego. Oznaczając zawartość i skład białka nie  
uwzględnia się jednak faktu, że w zależności od stopnia przyswajalności amino-  
kwasów, jego wykorzystanie w żywieniu może być różne. Teoretycznie ko-  
rzystna zmiana składu aminokwasowego białka nie musi znaleźć pełnego od-  
zwierciedlenia w praktycznych efektach żywieniowych, z uwagi na ograniczoną  
przyswajalność niektórych aminokwasów, np. lizyny (Kotlarz 2000, Lubowicki  
i in. 2000). Wielu autorów (Rutkowska 1981, Jones i in. 1982, Lubowicki i in.  
1997, Barczak 1999) uważa, że wskazana jest biologiczna weryfikacja wyników  
chemicznej oceny białka na drodze doświadczeń ze zwierzętami, nie uwzględ-  
niającej takich czynników, jak strawność i przyswajalność białka. Metody che-  
miczne w powiązaniu z biologicznymi pozwalają w sposób kompleksowy osza-  
cować wartość odżywczą białka.



## 2. PRZEGLĄD LITERATURY

### 2.1. BILANS SIARKI W AGROEKOSYSTEMACH

Naturalny obieg siarki w przyrodzie w połowie XIX wieku został zakłócony w wyniku postępującej rewolucji przemysłowej, skutkiem której było pojawienie się antropogenicznych źródeł tego pierwiastka (Stern 2005). Proces ten nasilił się, przyjmując niepokojące rozmiary zwłaszcza w drugiej połowie XX wieku w konsekwencji rozwoju przemysłu, motoryzacji i energetyki, a także zwiększonego zużycia węgla w sektorze komunalno-bytowym (Schnug 1991, Przybylski 2001, Walker i Dawson 2003). Największe tempo zmian wystąpiło w latach 1950-1980 (rys. 1). Kontynentem, na którym w latach osiemdziesiątych XX wieku emisja siarki w największym stopniu obciążała środowisko, była Europa. W Europie Zachodniej największe ilości siarki do biosfery odprowadzono w 1974 roku (13,7 mln ton), a we Wschodniej – w 1987 (21,5 mln ton) (Ceccotti i in. 1998, Lefohn i in. 1999).



Rys. 1. Emisja siarki w Europie, Azji i Ameryce Północnej w latach 1850-1990 (Lefohn i in. 1999)

Fig. 1. Sulphur emissions in Europe, Asia and North America over 1850-1990 (Lefohn et al. 1999)

Według szacunków amerykańskiej Agencji ds. Ochrony Środowiska (EPA), w Polsce w 1980 roku emisja SO<sub>2</sub> wynosiła blisko 4 mln ton, co stanowiło 2 mln ton czystej siarki. Nasz kraj pod tym względem zajmował trzecie miejsce w Europie, po NRD i Wielkiej Brytanii (Lefohn i in. 1999). Emisja SO<sub>2</sub> w Polsce w latach 1970-1980 stanowiła aż 10% emisji tego związku w skali Europy (Jakubus 2006). Do systematycznego zwiększania emisji SO<sub>2</sub> w tych latach przyczyniał się intensywny rozwój przemysłu wydobywczego, chemicznego oraz eksploatacja bogatych złóż siarki rodzimej i jej przetwórstwo, a także ros-

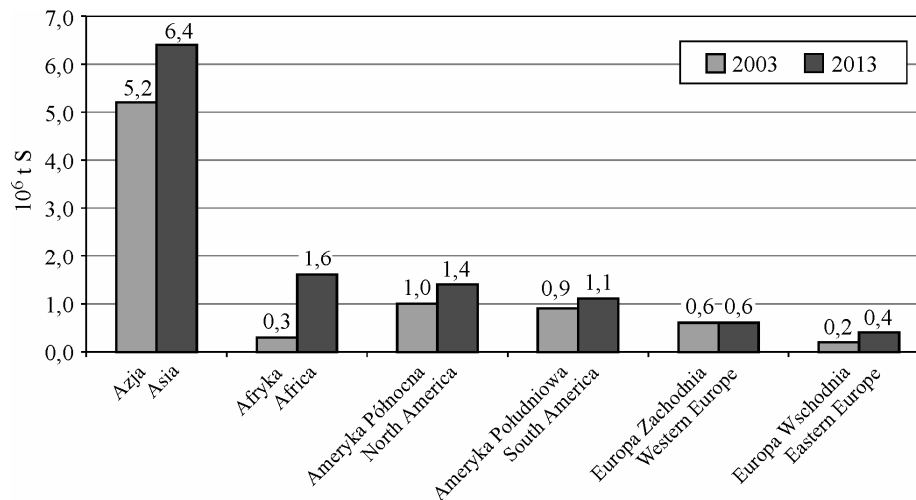
jące potrzeby energetyczne (Motowicka-Terelak i Terelak 2000). Nie bez znaczenia był też utrzymujący się w Polsce bardzo wysoki (najwyższy w Europie), wynoszący 64,9%, udział węgla wśród wszystkich źródeł energii (McGrath i in. 2003). Warto podkreślić, że eksploatowany na Górnym Śląsku węgiel cechuje się stosunkowo wysoką, dochodzącą do 4% zawartością siarki (Blaschke 1999). Szacuje się, że w połowie lat 80. XX wieku depozycja siarki do gleby w postaci tzw. kwaśnych deszczy (opadów, kondensatów, osadów) oraz suchego opadu (zaabsorbowanej siarki gazowej, opadu aerozolu) wynosiła średnio 60-80 kg S·ha<sup>-1</sup> (Motowicka-Terelak i Dudka 1991). Stan permanentnej i długotrwałej emisji związków siarki z zanieczyszczonej tym składnikiem atmosfery do gleby utrzymywał się w Polsce do pierwszej połowy lat 90. XX wieku. Zawartość siarki siarczanowej(VI) w poziomie próchnicznym gleb wahała się w bardzo szerokim zakresie: od 1 do 500 mg·kg<sup>-1</sup> s.m., tj. od ilości śladowych do wielokrotnie przekraczających naturalną zawartość w glebie (Motowicka-Terelak i Terelak 1998). Ta ilość siarki, dostająca się do gleby z atmosfery, zaspokajała potrzeby roślin o dużych wymaganiach pokarmowych względem tego pierwiastka i kilkakrotnie przewyższała potrzeby roślin o umiarkowanych lub niskich wymaganiach (Haneklaus i in. 2000). Nie zwracano więc uwagi na potrzebę nawożenia siarką, a emisję jej związków kojarzono raczej ze skażeniem środowiska niż z ich wymaganiami pokarmowymi (Przybylski 2001, Sołek-Podwika i in. 2005).

Wskutek postępującej degradacji środowiska, w wyniku przede wszystkim emisji związków siarki ze źródeł antropogenicznych, zaostrzono normy dotyczące jego ochrony. Uchwalony w 1994 r. w Oslo II Protokół Siarkowy określił indywidualną ścieżkę redukcji emisji związków siarki dla każdego z jego sygnatariuszy. Zgodnie z podjętymi ustaleniami, Polskę zobowiązano do ograniczenia rocznej emisji ditlenku siarki do 2010 r. o 66% w stosunku do stanu z 1980 roku. Nałożono ponadto obowiązek 90% skuteczności odsiarczania nowo uruchamianych źródeł spalania oraz stosowania paliw o zawartości siarki poniżej 0,05% w środkach transportu. Limit dopuszczalnej emisji SO<sub>2</sub> w 2010 roku dla naszego kraju wynosił 1397 tys. ton (<http://zb.eko.pl/zb/65powietrz.htm>).

Konsekwencją podjętych działań proekologicznych jest postępujący od kilkunastu lat niedobór siarki w glebie (rys. 2). Zjawisko zachwiania bilansu siarki w środowisku odnotowano m.in. w zachodniej części Kanady (Janzen i Bettany 1984), w krajach Ameryki Środkowej (Raun i Barreto 1992) i w niektórych rejonach USA (Girma i in. 2005). Szacunkowe dane wskazują, że również w większości krajów Europy Zachodniej średni opad siarki z atmosfery jest mniejszy niż wymagania pokarmowe większości gatunków roślin (Schnug 1991, Singh 1994, McGrath i in. 2003, Zhao i in. 2003). W Europie depozycja siarki obniżyła się z poziomu przekraczającego w latach 70. XX wieku 100 kg S·rok<sup>-1</sup>·ha<sup>-1</sup> do 5-20 kg S·rok<sup>-1</sup>·ha<sup>-1</sup> w roku 1995 (Riley i in. 2000).

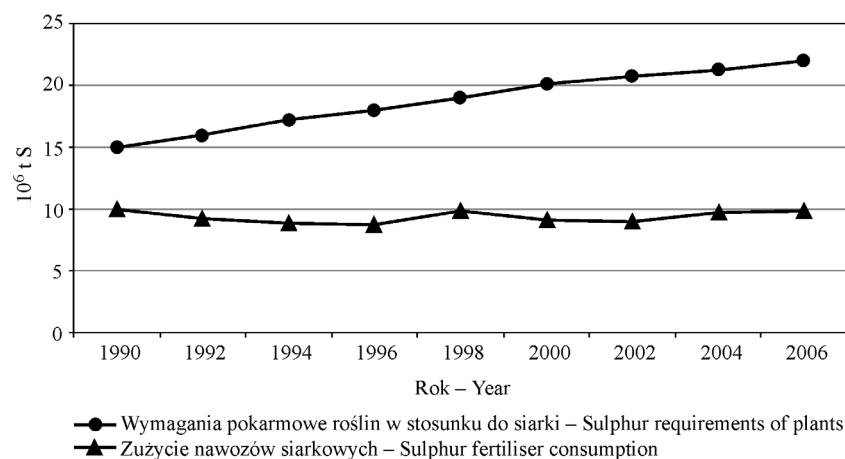
Według prognoz Światowego Instytutu Siarkowego (*The Sulphur Institute* – TSI) w Waszyngtonie, globalny deficyt siarki, który w 2003 r. szacowany był na 9,6 mln ton rocznie, w roku 2013 wzrośnie aż do 11,9 mln ton (Morris

2007). Wysoki poziom emisji ditlenku siarki utrzymuje się jedynie w Chinach i Indiach, w których ze względu na dynamicznie rozwijającą się gospodarkę następuje gwałtowny wzrost zużycia energii, przede wszystkim ze źródeł konwencjonalnych (Cofala i in. 2004). Sytuacja ta powoduje stale zwiększającą się rozbieżność pomiędzy zapotrzebowaniem na siarkę ze strony rolnictwa a ograniczonymi możliwościami przemysłu nawozowego. Jest to tendencja utrzymująca się od początku lat 90. XX wieku w skali globalnej (rys. 3).



Rys. 2. Deficyt siarki w glebach na poszczególnych kontynentach w latach 2003 i 2013 (Morris 2007)

Fig. 2. Sulphur deficit in soils on respective continents in 2003 and 2013 (Morris 2007)

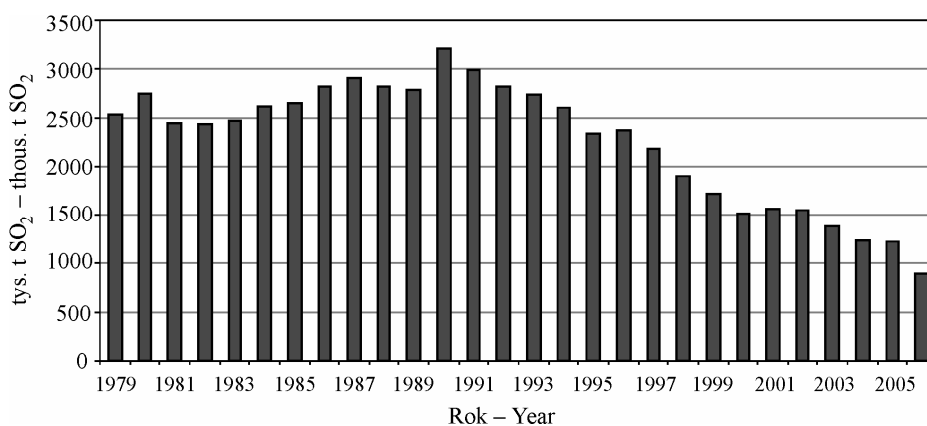


Rys. 3. Wymagania pokarmowe roślin względem siarki oraz zużycie nawozów zawierających ten składnik w skali światowej (Morris 2007)

Fig. 3. Sulphur requirements of plants and sulphur fertiliser consumption in the world (Morris 2007)

Rocznie na świecie stosuje się w rolnictwie około 10 mln ton siarki w postaci nawozów. Jest to ilość, która zdecydowanie nie zaspokaja zapotrzebowania roślin na ten składnik (Morris 2007).

Ograniczenie emisji  $\text{SO}_2$  nastąpiło również w Polsce (rys. 4); sprzyjała temu recesja gospodarcza w latach 80. XX wieku oraz przemiany ustrojowe, które nastąpiły w ostatniej dekadzie poprzedniego stulecia. Ograniczono zużycie energii oraz zaczęto stosować coraz doskonalsze metody odsiarczania paliw. Duże znaczenie miało zmniejszenie aktywności przemysłowej w byłych krajach: NRD i Czechosłowacji.



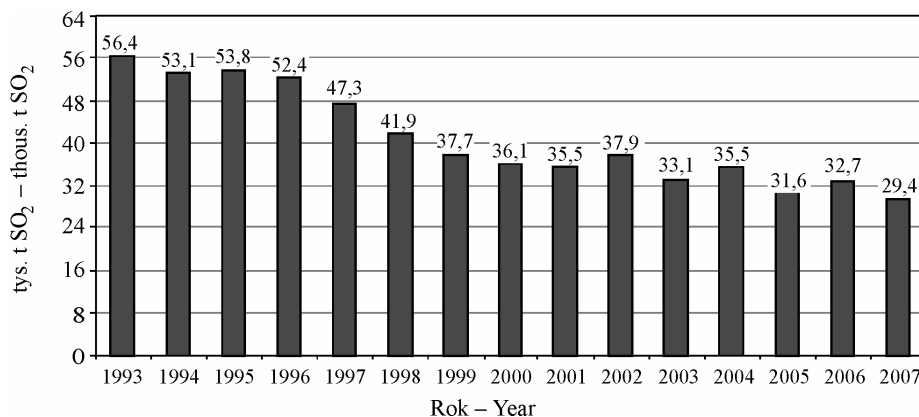
Rys. 4. Emisja  $\text{SO}_2$  w Polsce w latach 1979-2006 (Rocznik Statystyczny...2009)

Fig. 4. Emissions of  $\text{SO}_2$  in Poland over 1979-2006 (Rocznik Statystyczny...2009)

Obserwowane w naszym kraju zachwianie bilansu siarki w glebie jest również wynikiem występującego w latach 90. XX wieku zmniejszenia zużycia nawozów mineralnych, a także zmiany ich asortymentu. W 1990 roku zużycie NPK wynosiło  $182 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ , natomiast w 2000 –  $85,8 \text{ kg NPK} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Rocznik Statystyczny... 2009). Ważną rolę odegrał fakt ograniczenia produkcji nawozów zawierających siarkę jako składnik dodatkowy lub balastowy (Grześkowiak 2005). Szacuje się, że w ostatnich latach w Polsce z nawożeniem mineralnym wnosi się rocznie do gleb średnio  $10 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Szulc 2008). Zmniejszeniu zużycia nawozów mineralnych towarzyszy ograniczenie stosowania nawozów naturalnych, zwłaszcza obornika (Wielebski i in. 2000). Do postępującego niedoboru siarki przyczynia się też postęp odmianowy i intensyfikacja produkcji roślinnej, skutkujące zwiększonym pobraniem tego składnika. Pewne znaczenie w tym względzie ma występujący w ostatnich latach w naszym kraju wzrost udziału rzepaku, gatunku o wysokim zapotrzebowaniu na siarkę, w ogólnej strukturze zasiewów, w związku z możliwością wykorzystania jego nasion do produkcji biopaliw (wzrost powierzchni uprawy z 437 tys. ha w 2000 r. do 771 tys. ha w 2008 r. – Rocznik Statystyczny... 2009).

W Polsce w 1980 r. emisja  $\text{SO}_2$  w przeliczeniu na 1 ha wynosiła około 130 kg S, a w połowie lat 90. XX wieku obniżyła się do 33 kg siarki (Wielebski i in. 2000). Na początku XXI wieku wynosiła średnio  $11,5 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$  (od około  $6 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$  w woj. podlaskim do prawie  $20 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$  w woj. śląskim) (Grzebisz i Przygocka-Cyna 2000). Suma opadu mokrego i suchego siarki w latach 2000-2003, średnio dla obszaru Polski, zawierała się w przedziale  $2,00\text{-}12,27 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$  i w ciągu czterech lat zmniejszyła się o ponad połowę (Szulc 2008). Te tendencje utrzymują się również na terenie województwa kujawsko-pomorskiego. W punkcie pomiarowym w Chrzastowie k. Nakła w latach 2000-2003 opad siarki zmniejszył się z  $17,40$  do  $8,13 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  (Szulc 2008).

Szacuje się, że w naszym kraju ponad połowa gleb (53% użytków rolnych) charakteryzuje się niską zasobnością w siarkę siarczanową(VI) (Terelak i in. 1995). Najwięcej gleb o niskiej zawartości  $\text{S-SO}_4^{2-}$  występuje w północnej i północno-wschodniej części Polski. W województwie kujawsko-pomorskim 71% gleb cechuje niska zasobność w omawiany składnik, co jest konsekwencją przede wszystkim zmniejszającej się w ostatnich latach w tym rejonie emisji ditlenku siarki (rys. 5).



Rys. 5. Emisja  $\text{SO}_2$  w województwie kujawsko-pomorskim (Stan środowiska... 2008)

Fig. 5. Emissions of  $\text{SO}_2$  in the Kujawy and Pomorze Province (Stan środowiska... 2008)

Obecnie symptomy niedoboru siarki obserwuje się u wielu gatunków roślin, również u zbóż, ale najwyraźniej uwidaczniają się one u gatunków o dużych wymaganiach względem siarki (Schnug 1991, Grzebisz i Fotyma 1996, Wielebski i in. 2000, Jakubus 2006, Szulc 2008).

Niedobór siarki w agroekosystemach może wystąpić zwłaszcza w produkcji roślinnej o intensywnym nawożeniu azotem, w przypadku uprawy roślin o dużym zapotrzebowaniu na siarkę czy lokalizacji upraw na glebach lekkich o słabym kompleksie sorpcyjnym, w dużym oddaleniu od ośrodków przemysłowych i ruchliwych dróg. W takiej sytuacji zachodzi obawa, że stosowane tradycyjnie nawożenie NPK nie będzie zbilansowane, a deficyt siarki może ograniczać wy-

korzystanie pozostałych składników, w tym przede wszystkim azotu. Ograniczenie imisji związków siarki do gleby, jakkolwiek korzystne zjawisko, może przyczyniać się do niedoborów tego składnika u roślin, szczególnie u gatunków siarkolubnych z rodzin: *Brassicaceae* i *Liliaceae*. Według wielu autorów (Schnug 1991, Wielebski i in. 2000, Walker i Dawson 2003, Zhao i in. 2003, Kaczor i Zuzanska 2009), niedostatek siarki w produkcji roślinnej stał się w Europie jednym z ważniejszych problemów współczesnego rolnictwa. Według waszyngtońskiego Światowego Instytutu Siarki, istnieje groźba, że rosnący deficyt siarki stanie się czynnikiem limitującym możliwość zapewnienia globalnego bezpieczeństwa żywnościowego (Morris 2007).

## 2.2. FIZJOLOGICZNA ROLA SIARKI

Zainteresowanie siarką wynika z jej znaczenia w metabolizmie żywych organizmów, których prawidłowy rozwój byłby niemożliwy bez pokrycia zapotrzebowania na ten składnik. Wchodzi ona w skład aminokwasów, peptydów, białek, sulfolipidów, olejków gorczycznych i czosnkowych, witamin i układów redukcyjnych: glutationu i ferrodoksyny (Motowicka-Terelak i Terelak 2000, Kopcewicz i Lewak 2005, Podleśna 2005, Jakubus 2006). Do najważniejszych związków zawierających siarkę należą aminokwasy białkowe (metionina, cysteina i cystyna), odgrywające istotną rolę w tworzeniu struktury drugo- i trzeciorzędowej białek, która umożliwia utrzymanie przestrzennej konformacji białka. Do związków zawierających siarkę zalicza się również glukozynolany. Są to metabolity wtórne, naturalnie występujące tioglikozydy, powszechnie obecne w roślinach z rodzaju *Brassicaceae* i *Liliaceae* (Drozdowska 1994, Bloem i in. 2001).

Siarka podnosi odporność roślin na stresowe warunki środowiska, pełniąc ważną rolę w systemie ich ochrony przed szkodnikami i chorobami (Schnug i Haneklaus 1994, Walker i Booth 1994, Przybylski 2001, Jędrzycka i in. 2002). Istnieje model oceny odporności roślin (SIR – *Sulphur Induced Resistance*) na czynniki biotyczne, która jest determinowana stanem ich odżywienia siarką (Salac i in. 2003). Wyjątkowe znaczenie w tym kontekście mają produkty hydrolizy glukozynolanów, wykazujące znaczną toksyczność w stosunku do bakterii, wirusów, owadów, grzybów patogennych i innych roślin (Walker i Booth 1994, Blake-Kalff i in. 1998, Jędrzycka i in. 2002, Sadowski i in. 2002) i spełniające często funkcje repelentów, atraktantów lub związków modyfikujących zachowanie szkodników (Oleszek 1995). Inną rolę pełnią fitochelatyny – oligopeptydy zawierające siarkę – syntetyzowane przez rośliny w warunkach nadmiaru metali ciężkich, mające zdolność ich kompleksowania (Podleśna 2005). Również glutation ma zdolność tworzenia trwałych połączeń z metalami. Zwraca się uwagę, że rośliny z rodziny *Brassicaceae*, wyróżniające się wysoką zawartością siarki, mogą odgrywać rolę w fitoremediacji, jako tzw. hiperakumulatory (Salt i in. 1998, cyt. za Jakubus 2006).

Wielu autorów (Zhao i in. 1999c, d, Ganeshamurthy i Reddy 2000, Podleśna 2005) zwraca uwagę na rolę siarki w procesie wiązania azotu atmosferycznego

przez bakterie brodawkowe roślin bobowatych. Kluczowe znaczenie w tym procesie mają: ferrodoksyna oraz nitrogenaza, zawierające klaster metalosiarkowe: żelazo-siarkowy i molibdeno-żelazo-siarkowy (Kopcewicz i Lewak 2005).

## **2.3. ODDZIAŁYWANIE SIARKI NA PLON I JAKOŚĆ ROŚLIN UPRAWNYCH**

### **2.3.1. WPŁYW SIARKI NA WIELKOŚĆ PLONU**

Zaopatrzenie roślin uprawnych w siarkę korzystnie oddziałuje na wielkość ich plonów. Wysoką efektywność plonotwórczą omawianego pierwiastka można jednak osiągnąć tylko w warunkach jego niedoboru (Walker i Booth 1994, Wielebski i Wójtowicz 2003, Jakubus i Tobiła 2005, Szulc 2008).

Obecnie badania dotyczące ograniczania i zapobiegania niedoborom siarki skupiają się na ogół na gatunkach o dużym zapotrzebowaniu na ten składnik. Dotyczy to zwłaszcza gatunków roślin z rodzin: *Brassicaceae* i *Liliaceae*, w których zawartość siarki może wynosić nawet 2% s.m. (McGrath i Zhao 1996, Fimes i in. 2000, Lośak i in. 2000, Krauze i Bowszys 2001, Zukałova i in. 2001a, b, Szulc i in. 2003, Bloem i in. 2004). Najwięcej badań prowadzi się nad rzepakiem, gatunkiem o największym znaczeniu gospodarczym wśród roślin oleistych uprawianych w Polsce. Dowodzą one wysokiej, ekonomicznie uzasadnionej efektywności plonotwórczej stosowania siarki w agrotechnice tego gatunku. Znacznie mniej badań przeprowadzono nad gorczycą (Ahmad i Abdin 1999, Budzyński i Jankowski 2001, Kulczycki 2007), której udział w strukturze zasiewów jest o wiele mniejszy niż rzepaku, a także zbóż (Withers i in. 1997, Potarzycki 2004a, b, Zhao i in. 2006). Nieliczne tylko opracowania dotyczą roślin bobowatych (Motowicka-Terelak i Dudka 1991, Sator i in. 2002), ziemniaka (Klikocka 2004a), traw (Millard i in. 1985, Richards 1990) i warzyw (Hłušek i in. 1999, Bloem i in. 2004, Smatanova i in. 2004, Lośak 2005). Sporadyczne są doniesienia o braku plonotwórczego oddziaływania siarki (Świderska-Ostapiak i Stankowski 2002) lub nawet o obniżeniu plonu rzepaku ozimego po jej zastosowaniu (Cyna i Grzebisz 2003, Wielebski i Wójtowicz 2003), co miało miejsce w przypadku badań przeprowadzanych na glebach o wystarczającej w stosunku do zapotrzebowania roślin ilości siarki przyswajalnej lub w wyjątkowo niekorzystnym układzie warunków pogodowych.

O wielkości plonu roślin uprawnych decyduje m.in. współdziałanie siarki i innych składników nawozowych. Wśród badań podejmujących ten problem najczęściej dotyczy wpływu interakcji siarki i azotu (Goźliński 1970a, Byers i Bolton 1979, Aulakh i in. 1980, Griffiths i in. 1995, Ahmad i Abdin 1999, Phillips i Mullins 2004, Podleśna i Cacak-Pietrzak 2006, Przygocka-Cyna i Grzebisz 2006). W warunkach niedoboru siarki w glebie obniżona jest plonotwórcza efektywność azotu, a intensyfikacja nawożenia tym składnikiem pogłębia deficyt siarki, który z kolei hamuje pobieranie azotu przez rośliny, ograniczając ich wzrost i rozwój (Janzen i Bettany 1984, Lośak i in. 2000). Taki stan rzeczy

tłumaczy fakt, że przyswajanie azotu przez roślinę jest ściśle związane z jej zaopatrzeniem w siarkę, gdyż przy stosowaniu wysokich dawek azotu jego wykorzystanie z nawozów przez rośliny oraz efektywność rolnicza i fizjologiczna są znacznie większe w warunkach nawożenia siarką (Byers i Bolton 1979, Griffiths i in. 1995, Fotyma 2003, Potarzycki 2004b, Podleśna 2005). Zdaniem niektórych autorów (Potarzycki 2004b), deficyt siarki nie tyle ogranicza działanie azotu, wyrażające się wytworzeniem przez rośliny zbożowe większej biomasy organów wegetatywnych, co zmniejsza intensywność przemieszczania asymilatów do ziarniaków. Badania Eriksena i in. (2001) wykazały, że w warunkach dobrego zaopatrzenia jęczmienia jarego w siarkę, 70% całkowitej zawartości azotu przemieszcza się z liści do kłosów, natomiast niedobór siarki redukuje intensywność tego procesu o połowę.

Warto podkreślić, że zboża na wyprodukowanie jednej tony ziarna pobierają, według Zhao i in. (2003), 2-3 kg siarki, a według Inala i in. (2003) – 3-4 kg tego składnika, przy czym siarka stanowi 9-15% ilościowego zapotrzebowania roślin na azot. W Szwecji zaleca się na każde 10 kg azotu nawozowego zastosowanego w agrotechnice zbóż aplikację 1 kg siarki (Bertilsson 1994, Walker i Dawson 2003).

Według Motowickiej-Terelak i Terelaka (1998), właściwe zaopatrzenie roślin w siarkę ma znaczenie nie tylko produkcyjne, ale i ekologiczne. W warunkach niedoboru tego składnika w glebie azot nawozowy nie wykazuje optymalnego działania, a wprowadzenie jego dodatkowych dawek nasila ten deficyt, powodując dalszą redukcję plonów oraz pogorszenie ich jakości. Efektywne wykorzystanie azotu przez rośliny ma istotne znaczenie również dla ochrony środowiska, bowiem w warunkach niedoboru siarki może dochodzić do jego strat w wyniku przenikania azotanów(V) do wód gruntowych, a także do ulatniania form gazowych ( $\text{NO}_x$ ) do atmosfery (Schnug i Haneklaus 1994, Griffiths i in. 1995).

Warto nadmienić, że stwierdzono dodatnie współdziałanie nie tylko siarki z azotem, ale także siarki z potasem (Kaczor i Łaszcz-Zakorczmenna 2003) oraz siarki z wapniem i magnezem (Aulakh i Dev 1978, Brodowska i Kaczor 2002, Kaczor i Brodowska 2003). W przeciwieństwie do wymienionych makroskładników, fosfor i siarka wykazują ujemne współdziałanie (Aulakh i Pasricha 1977). Zastosowanie kombinacji tych składników działało antagonistycznie, obniżając w nasionach w porównaniu z obiektem kontrolnym zawartość fosforu, siarki oraz białka w fasoli.

### **2.3.2. WPLYW SIARKI NA JAKOŚĆ PLONU**

Znaczenie siarki dla prawidłowego wzrostu i rozwoju roślin jest wszechstronne, ale najważniejsza rola wynika z obecności tego pierwiastka w białkach. Nawożenie tym składnikiem zwiększa zawartość białka w ziarnie zbóż, szczególnie u tzw. odmian chlebowych, wpływając na wzrost ilości glutenu i poprawę parametrów decydujących o wartości wypiekowej mąki oraz jej przydatności do



wytwarzania makaronu (Haneklaus i in. 1992, Zhao i in. 1997b, 1999b, Hrivna i in. 1999, Podleśna i in. 2003, Cacak-Pietrzak i in. 2004). Badania Zhao i in. (1997a, b) dowodzą, że wartość technologiczna mąki była silniej skorelowana z zawartością w ziarnie pszenicy siarki niż azotu. Znane są doniesienia o korzystnym wpływie siarki na wydajność i jakość słoju browarnych odmian jęczmienia (Zhao i in. 2006). W licznych badaniach prowadzonych z rzepakiem (Rotkiewicz i in. 1996, Ahmad i Abdin 2000, Krauze i Bowszys 2000, Kaczor i Kozłowska 2002) wykazano, że stosowanie siarki powoduje na ogół podniesienie wydajności oleju rzepakowego i zawartości w nim nienasyconych kwasów tłuszczowych. Niektóre z publikacji wskazują na brak takiego wpływu (McGrath i Zhao 1996, Kaczor i Kozłowska 2002, Lośak i Richter 2003) lub nawet na negatywne oddziaływanie tego składnika na kumulację tłuszczu w nasionach roślin oleistych (Szulc i in. 2001). Zastosowanie siarki w nawożeniu ziemniaka skutkuje wzrostem zawartości skrobi, karotenu, witaminy C i jednoczesnym ograniczeniem udziału cukrów redukujących oraz azotanów(V) w bulwach (Klikocka 2004a). W korzeniu buraka cukrowego pod wpływem nawożenia siarką wykazano zwiększenie zawartości cukru i obniżenie udziału  $\alpha$ -aminokwasów (Hoffmann i in. 2004), a w ziarnie jęczmienia browarnego – zwiększenie aktywności enzymatycznej słoju oraz obniżenie zawartości szkodliwych  $\beta$ -glukanów (Zhao i in. 2006). Nawożenie siarką soi powodowało wzrost liczby i masy brodawek odpowiedzialnych za proces wiązania azotu atmosferycznego, co wpłynęło na wyższą zawartość białka w nasionach (Ganeshamurthy i Reddy 2000). Zdaniem Brodowskiej i Kaczora (2002, 2003), stosowanie tego składnika optymalizuje relacje ilościowe pomiędzy jonami w biomacie jarych odmian rzepaku i pszenicy.

Siarka jest niezbędnym składnikiem pokarmowym nie tylko dla roślin, ale również dla ludzi i zwierząt. Wpływa na smak, zapach i inne cechy organoleptyczne płodów rolnych, a także na ich wartość przetwórczą i żywieniową (Podleśna 2005). Zapotrzebowanie organizmów zwierzęcych na ten składnik pokrywają organiczne związki siarki. Są to przede wszystkim białka, w których skład wchodzi siarkowe aminokwasy egzogenne, a także zawierające siarkę witaminy. Zwierzęta nie mają zdolności syntetyzowania tych związków, muszą więc być one dostarczone z paszą. Siarkę mineralną, dzięki bakteriom bytującym w żwaczku, wykorzystują jedynie zwierzęta przeżuwające (Podleśna 2005). Jej niedobór obniża wartość pastewną gatunków roślin z rodziny *Fabaceae* przez zahamowanie syntezy aminokwasów siarkowych, negatywnie wpływając na efekty żywieniowe (Zhao i in. 1999d). Na pozytywne oddziaływanie siarki na wartość odżywczą roślin pastewnych wskazują znacznie wyższe przyrostyienne masy jagniąt karmionych paszą z roślin, w agrotechnice których zastosowano ten składnik (Jones i in. 1982). Zależność tę potwierdzają wyniki badań Allawaya i Thompsona (1996), (cyt. za Podleśną 2005), zgodnie z którymi niższa wartość stosunku N:S w paszach dla zwierząt nieprzeżuwających jest pod względem żywieniowym korzystniejsza. Uziak i Szymańska (1987) również zwracają uwagę, że nawożenie siarką słonecznika i seradeli wpłynęło pozytywnie na zawartość

łatwo ulegających hydrolizie węglowodanów w biomacie tych roślin i ich stosunek do białka ogólnego – co było korzystne dla jakości paszy. Zdaniem Jonesa i in. (1982) pod wpływem siarki poprawia się strawność i smakowitość pobieranej przez zwierzęta paszy. Warto jednak wspomnieć, że pasza nie powinna zawierać zbyt dużej ilości glukozydów alkenowych, których zawartość wzrasta w wyniku nawożenia siarką (Wielebski 1997, Wielebski i Muśnicki 1998, Wathélet 2004). Związki te trafiają w trakcie pozyskiwania oleju do śruty rzepakowej i makuchów, wykorzystywanych jako wysokobiałkowe pasze treściwe (Podleśna 2005). Glukozyd alkenowy uważane są za substancje antyżywniowe, gdyż produkty ich rozkładu mają niekorzystny wpływ na zdrowie jako substancje o działaniu goitrogennym (wolotwórczym) oraz powodującym uszkodzenia wątroby i nerek (Halkier i Gershenzon 2006). Żywnienie zwierząt śrutą bogatą w te związki hamuje ich rozwój i produktywność (Zduńczyk 1995, Rotkiewicz i in. 2000).

### **2.3.3. BADANIA NAD DIAGNOSTYKĄ POTRZEB NAWOŻENIA ROŚLIN SIARKĄ**

Podjmuje się wiele prób wyznaczenia indeksów diagnostycznych, których wartości określałyby warunki optymalnego odżywiania roślin siarką, bądź występowania objawów utajonych lub ostrych jej niedoborów (Spencer i Freney 1980, Schnug i Haneklaus 1994, McGrath i Zhao 1996, Kalembasa i Godlewska 2004, Potarzycki i Grzebisz 2007, Szulc 2008). Zdaniem Withersa i in. (1995) oraz Zukałovej i in. (2001b), w celu wiarygodnego prognozowania dostępności siarki dla roślin, obok wykonania analizy glebowej, niezbędne jest oznaczenie zawartości tego składnika w liściach, w fazie kwitnienia. Boreczek (2001), a także Szulc (2008) uważają, że stosowane w tym celu testy roślinne mają więcej zalet niż testy glebowe, gdyż są prostsze i bardziej wiarygodne, pozwalają też na dokonanie szybszej diagnozy, umożliwiając bardziej skuteczną interwencję nawozową. Testy glebowe są mniej precyzyjnym narzędziem do oznaczania potrzeb nawozowych roślin względem siarki z uwagi na dużą dynamikę tego składnika w glebie, wynikającą z możliwości deponowania pierwiastka w danym ekosystemie ze źródeł zewnętrznych (Kalembasa i Godlewska 2004, Szulc 2008). Do najczęściej branych pod uwagę wskaźników niedoboru siarki w roślinach zalicza się: jej zawartość ogólną, zawartość formy siarczanowej(VI), stosunek ilościowy tych form oraz proporcję N:S (Jakubus 2006, Grzebisz i Przygocka-Cyna 2007, Potarzycki i Grzebisz 2007, Szulc 2008). Zdaniem Spencera i Freneya (1980), podczas wegetacji w mniejszym stopniu niż inne parametry zmienia się wartość stosunku N:S, który jest miarodajnym wskaźnikiem zaopatrzenia roślin w siarkę. Na podstawie jego wartości oznaczonej w liściach jęczmienia można prognozować plon ziarna (Grzebisz i Przygocka-Cyna 2007). Do innych wniosków doprowadziły badania Bella i in. (1995), według których reakcją roślin na niedobór siarki w warunkach dużej podaży azotu jest zmiana szlaku biosyntezy argininy oraz wzmożona synteza amidów. Kormoker i in.

(1991) (cyt. za Boreczek 2001) proponują, by w celach diagnostycznych wykorzystać jako indeksy zawartość glutaminy i asparaginy – amidów, które kumulują się w korzeniach roślin rozwijających się w warunkach deficytu siarki. Z kolei Blake-Kalff i in. (2003), wskazując na stałość stosunku zawartości jabłczanów do siarczanów(VI) w organach wegetatywnych roślin przy prawidłowym zaopatrzeniu w siarkę, uznał tę proporcję za najlepszy miernik potrzeb roślin w stosunku do siarki.

Nie ma wśród autorów zgody, co do oceny przydatności tych wskaźników diagnostycznych, z uwagi na ich zmienność w kolejnych fazach wzrostu i rozwoju roślin, a także ze względu na oddziaływanie nawożenia na ich wartość (Schnug i in. 1993, Zhao i in. 1997a, Blake-Kalff i in. 2003, Kalembasa i Godlewska 2004). Przedmiotem kontrowersji jest też reprezentatywność różnych części rośliny, a także wybór do tego celu odpowiedniej fazy jej rozwoju.

### 3. HIPOTEZA BADAWCZA I CELE BADAŃ

Hipoteza badawcza zakładała, że siarka jest jednym z ważnych składników pokarmowych kształtujących wielkość i jakość plonu wybranych roślin uprawnych. Założono ponadto, że sposób aplikacji siarki, jej forma oraz dawka oddziałują na zawartość oraz skład frakcyjny i aminokwasowy białka ziarna i nasion nie tylko gatunków roślin powszechnie uważanych za siarkolubne (łubinu wąskolistnego, gorzycy białej), ale także jęczmienia jarego, przedstawiciela grupy roślin o niewielkich wymaganiach w stosunku do tego składnika. Dodatkowo przyjęto, że w przypadku jęczmienia jarego oddziaływanie siarki na wartość biologiczną białka powinno znaleźć potwierdzenie nie tylko w badaniach chemicznych, ale i w doświadczeniach żywieniowych prowadzonych na zwierzętach.

Wśród celów ogólnych badań wymienić należy:

- określenie zależności między zaopatrzeniem wybranych gatunków roślin uprawnych (jęczmienia jarego, łubinu wąskolistnego, gorzycy białej) w siarkę a wielkością ich plonu oraz zawartością związków determinujących jego jakość, w szczególności – zawartością białka,
- wskazanie optymalnych dla wielkości i jakości plonów badanych gatunków: sposobu aplikacji siarki, jej formy oraz dawki,
- zweryfikowanie w badaniach żywieniowych wartości biologicznej białka ziarna jęczmienia jarego przeprowadzonej na podstawie analiz chemicznych,

Szczególne cele przeprowadzonych badań dotyczyły oddziaływania siarki na:

- zawartość azotu ogólnego i białkowego w nasionach badanych gatunków roślin oraz skład frakcyjny i aminokwasowy białka, ze szczególnym zwróceniem uwagi na mierniki jego wartości biologicznej: zintegrowany wskaźnik aminokwasów egzogennych (EAAI) oraz wskaźnik aminokwasu ograniczającego (CS),
- przyswajalność i strawność białka ziarna jęczmienia jarego, decydujące (obok składu aminokwasowego i frakcyjnego) o jego wartości odżywczej, obliczone na podstawie badań żywieniowych na szczurach laboratoryjnych,
- zawartość siarki siarczanowej(VI) i całkowitej, a także wartość stosunku N:S jako wskaźników zaopatrzenia roślin w siarkę,
- wartości proporcji ilościowych między makroskładnikami (K, Mg, Ca, Na) i ich równowagę jonową,
- zawartość metabolitów wtórnych: glukozyzolanów i kwasów tłuszczowych w nasionach gorzycy jako ważnych wyróżników jakości gatunków roślin oleistych z rodziny *Brassicaceae*.

Zrealizowanie celów badań może mieć znaczenie:

- poznawcze – ze względu na poszerzenie wiedzy na temat możliwych współzależności między nawożeniem siarką a zawartością związków determinujących wielkość i jakość plonów roślin,

- aplikacyjne – gdyż uzasadni rolę siarki jako integralnego elementu systemu nawożenia oraz pozwoli określić optymalny dla wielkości i jakości plonu wybranych gatunków roślin sposób aplikacji tego składnika, jego formę i dawkę.

## 4. MATERIAŁ I METODY BADAŃ

### 4.1. CHARAKTERYSTYKA DOŚWIADCZENIA POLOWEGO

#### 4.1.1. TEREN BADAŃ I WARUNKI GLEBOWE

Podstawą badań było ściśle doświadczenie polowe prowadzone w płodozmianie z trzema gatunkami roślin: jęczmieniem jarym (*Hordeum vulgare* L.), łubinem wąskolistnym (*Lupinus angustifolius* L.) i gorczycą białą (*Sinapis alba* L.). Doświadczenie przeprowadzono w latach 2004-2007 w Terenowej Stacji Badawczej w Wierzchucinku (53°26' N, 17°79' E), należącej do Wydziału Rolnictwa i Biotechnologii Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy. Stacja usytuowana jest około 25 km w kierunku północno-zachodnim od Bydgoszczy, w zlewni rzeki Brdy, na południowo-wschodniej krawędzi Pojezierza Krajeńskiego, na terenie Wysoczyzny Krajeńskiej.

Doświadczenie założono w trzech powtórzeniach, metodą losowanych podbloków w układzie zależnym (split-plot), na glebie płowej typowej, wytworzonej z gliny właściwej, o składzie piasku gliniastego mocnego (18% części spławianych), należącej do kategorii agronomicznej – gleba lekka, kompleks żytńi dobry, klasa bonitacyjna IIIb (według międzynarodowej klasyfikacji FAO-UNESCO uznawana jako *Albic Luvisols*). Gleba charakteryzowała się kwaśnym odczynem i średnią zasobnością w przyswajalne formy fosforu, potasu i magnezu (tab. 1). Zawartość formy siarczanowej(VI)  $S-SO_4^{2-}$  kwalifikuje ją do gleb o niskiej zasobności tego składnika (Lipiński i in. 2003).

Tabela 1. Wybrane właściwości chemiczne gleby w poziomie próchnicznym (0-25 cm) przed założeniem doświadczenia polowego w 2004 roku

Table 1. Selected chemical properties of soil in humus layer (0-25 cm) prior to the plot experiment in 2004

Właściwości chemiczne gleby Chemical properties of soil	Jednostka Unit	Wartość Value
pH <sub>KCl</sub>	–	5,3
Hh	mmol(+):kg <sup>-1</sup>	18,55
C <sub>org.</sub>	g:kg <sup>-1</sup>	6,33
N <sub>og.</sub>	g:kg <sup>-1</sup>	0,71
S <sub>og.</sub>	g:kg <sup>-1</sup>	0,259
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg:kg <sup>-1</sup>	18,9
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg:kg <sup>-1</sup>	2,06
P	mg:kg <sup>-1</sup>	67,4
K	mg:kg <sup>-1</sup>	207,4
Mg	mg:kg <sup>-1</sup>	51,2
S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg:kg <sup>-1</sup>	9,4

#### 4.1.2. CZYNNIKI BADAŃ I WARUNKI AGROTECHNICZNE DOŚWIADCZENIA

W doświadczeniu polowym uwzględniono następujące czynniki:

- czynnik I rzędu – sposób aplikacji substancji zawierających siarkę (dolistnie, przedsięwzięcie dogłębowo),
- czynnik II rzędu – forma siarki (siarka elementarna w postaci Siarkolu Extra 80 WP, siarka jonowa w postaci siarczanu(VI) sodu),
- czynnik III rzędu – dawka siarki (w  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ : 0, 20, 40 (20+20), 60 (20+20+20)).

Opryski roślin roztworami Siarkolu Extra 80 WP oraz siarczanu(VI) sodu o stężeniu 3,3% wykonywano w następujących fazach wegetacji roślin, oznaczonych za pomocą kodów obowiązującej w UE skali BBCH (Adamczewski i Matysiak 2002):

a) jęczmień jary:

- dawka 20  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$  – jednorazowo w fazie późnego krzewienia (BBCH: 26-29),
- dawka 40  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$  – w dwóch terminach: w fazie późnego krzewienia (BBCH: 26-29) (20  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) oraz podczas pełni strzelania w źdźbło (BBCH: 33-39) (20  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ ),
- dawka 60  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$  – w fazie późnego krzewienia (BBCH: 26-29) (20  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), podczas pełni strzelania w źdźbło (BBCH: 33-39) (20  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) oraz podczas pełni kłoszenia (BBCH: 54-58) (20  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ );

b) łubin wąskolistny:

- dawka 20  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$  – jednorazowo w fazie niezupełnie zwartych międzyrzędzi (BBCH: 30-33),
- dawka 40  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$  – w dwóch terminach: w fazie niezupełnie zwartych międzyrzędzi (BBCH: 30-33) (20  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) oraz na początku kwitnienia (BBCH: 50-53) (20  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ ),
- dawka 60  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$  – w trzech stadiach wegetacji: w fazie niezupełnie zwartych międzyrzędzi (BBCH: 30-33) (20  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), na początku kwitnienia (BBCH: 50-53) (20  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) oraz podczas pełni kwitnienia (BBCH: 65-67) (20  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ );

c) gorczyca biała:

- dawka 20  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$  – jednorazowo przed zawiązywaniem pąków (BBCH: 45-50) (20  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ ),
- dawka 40  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$  – w dwóch terminach: przed zawiązywaniem pąków (BBCH: 45-50) (20  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) oraz na początku kwitnienia (BBCH: 53-59) (20  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ ),
- dawka 60  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$  – w trzech fazach: przed zawiązywaniem pąków (BBCH: 45-50) (20  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), na początku kwitnienia (BBCH: 53-59) (20  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) oraz podczas pełni kwitnienia (BBCH: 64-67) (20  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ ).

W pierwszym roku badań polowych (2004 r.) jęczmień jary uprawiano po ziemniaku, a łubin wąskolistny i gorzycę białą – po jęczmieniu jarym. Liczba

wszystkich poletek wynosiła 144; powierzchnia każdego z nich stanowiła 18 m<sup>2</sup>, a do zbioru – 15 m<sup>2</sup>.

Po zbiorze przedplonu wykonywano typowe uprawki pożniwne, a na przełomie października i listopada – orkę przedzimową. Zastosowano przedsięwzięcie jednolite nawożenie azotem, fosforem i potasem: azot wysiano w dawce 70 kg N·ha<sup>-1</sup> w postaci saletry amonowej, fosfor – w dawce 70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·ha<sup>-1</sup> (32 kg P·ha<sup>-1</sup>) w formie 40% superfosfatu potrójnego, a potas – w dawce 105 kg K<sub>2</sub>O·ha<sup>-1</sup> (63 kg K·ha<sup>-1</sup>) jako 60% sól potasową. Drugą dawkę azotu pod jęczmień jary (35 kg N·ha<sup>-1</sup>) i gorczycę (70 kg N·ha<sup>-1</sup>) wysiano pogłównie, odpowiednio: w fazie strzelania w źdźbło i na początku pąkowania. Pod łubin nie stosowano nawożenia azotem, a przed wysiewem nasion tego gatunku nie zaprawiano ich nitraginą.

Występujące szkodniki oraz chwasty zwalczano metodami chemicznymi zgodnymi z zaleceniami Instytutu Ochrony Roślin (Zalecenia... 2004). Przeciw chwastom we wszystkich latach badań stosowano następujące herbicydy: Mustang 306 SE lub Mocarz 75 WG (pod jęczmień jary), Afałon 50 WP (pod łubin), Trifluorotox 480 EC (pod gorczycę), a dodatkowo w 2007 r. na łubin zastosowano Fusilade Forte 150 EC przeciwko perzowi właściwemu (*Elymus repens* (L.) Goud.). Gorczycę w każdym z lat badań opryskiwano przeciw słodzikowi rzepakowemu (*Meligethes aeneus*) insektycydami Nurelle Max 515 EC lub Mospilan 20 SP. W każdym z sezonów wegetacyjnych jęczmień jary opryskiwano grzybobójczym preparatem Alert 375 SC. Z chwastów dwuliściennych przed zbiorami w każdym z lat badań występowała komosa biała (*Chenopodium album* L.), rumian polny (*Anthemis arvensis* L.) i miotła zbożowa (*Apera spica-venti* L.), jednak ich nasilenie było niewielkie i nie wpływało na dojrzewanie oraz na plonowanie uprawianych roślin. W latach 2004-2006 nie obserwowano objawów chorób u żadnej z testowanych odmian, niezależnie od zastosowanych czynników badań. W 2007 roku łubin został zaatakowany przez grzyby z rodzaju *Fusarium*, które powodowały więdnienie roślin oraz przedwczesne zamieranie stożków wzrostu, prowadzące do zahamowania ich rozwoju w okresie kwitnienia. Korzenie zainfekowanych roślin miały w przekroju brunatną barwę. Stopień porażenia roślin był na tyle duży, że w tym roku zdecydowano się zrezygnować z badań łubinu i nie pobrano prób do analiz.

#### 4.1.3. CHARAKTERYSTYKA ODMIAN BADANYCH GATUNKÓW ROŚLIN

Dobór testowanych gatunków roślin w badaniach był podyktowany ich różnicowanymi wymaganiami w stosunku do siarki.

W doświadczeniu polowym uprawiano trzy gatunki roślin:

- 1) jęczmień jary (*Hordeum vulgare* L.) z rodziny *Poaceae* (wiechlinowate), odmiany Antek, reprezentujący grupę gatunków o niewielkich wymaganiach w stosunku do siarki. Jest to odmiana pastewna o niskiej tolerancji na mączniaka prawdziwego (7,2 w skali dziesięciostopniowej) i dużej – na rdzę



jęczmienia (7,7 w skali dziewięciostopniowej). Rośliny osiągają średnią wysokość (74 cm), charakteryzują się przeciętną (6,2 w skali dziewięciostopniowej) odpornością na wyleganie. Ich masa tysiąca ziaren (MTZ) jest wysoka (47,9 g), a wyrównanie ziarna dobre (88%). Odmiana wykazuje średnią tolerancję na zakwaszenie gleb (Lista odmian... 2001);

- 2) łąbin wąskolistny (*Lupinus angustifolius* L.) z rodziny *Fabaceae* (bobowate), odmiany Elf, należący do gatunków o średnim zapotrzebowaniu na ten składnik. Odmiana Elf jest przydatna do uprawy na nasiona paszowe, jej cechy predestynują ją do uprawy na glebach kompleksu żytniego bardzo dobrego. Rośliny charakteryzują się niewielką wysokością (58 cm) i dużą (8,7 w skali dziewięciostopniowej) odpornością na wyleganie. Odmiana ta wykazuje bardzo małą skłonność do pęknięcia strąków i osypywania nasion, cechuje ją też niska masa tysiąca nasion (MTN) – 129 g, niewielka zawartość alkaloidów (0,040% s.m.) i średnia podatność na fuzariozę (7,6 w skali dziewięciostopniowej) (Lista odmian... 2001);
- 3) gorczyca biała (*Sinapis alba* L.) z rodziny *Brassicaceae* (kapustowate), odmiany Barka, zaliczana do gatunków, które pobierają najwięcej siarki. Odmiana Barka jest przydatna do uprawy na nasiona, ale można ją także uprawiać w międzyplonie ścierniskowym z przeznaczeniem na zielony nawóz. Wykazuje zdolność ograniczania populacji mątwika burakowego. Zalicza się ją do odmian wytrzymałych na wczesny siew, o późnym terminie zakwitania. Odmianę tę charakteryzuje średnia zawartość kwasu erukowego i glukozynolanów. Wykazuje przeciętną (6,3 w skali dziewięciostopniowej) odporność na wyleganie (Lista odmian... 2001).

## 4.2. METODY ANALIZ CHEMICZNYCH GLEBY I ROŚLIN

W próbkach zbiorczych materiału glebowego (tworzonego z czterech powtórzeń) pobranych przed założeniem doświadczenia polowego oznaczono:

- kwasowość wymienną pH w 1 mol·dm<sup>-3</sup> KCl – metodą potencjometryczną,
- kwasowość hydrolityczną (Hh) – metodą Kappena,
- zawartość węgla organicznego – metodą Tiurina,
- zawartość azotu ogółem – metodą Kjeldahla,
- zawartość azotu amonowego – metodą Kjeldahla po ekstrakcji siarczanem(VI) potasowo-glinowym,
- zawartość siarki ogółem i siarczanowej(VI) – metodą optycznej spektrometrii emisyjnej (*ICP OES – Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*) ze wzbudzeniem w plazmie indukcyjnie sprzężonej na aparacie firmy Thermo Elementar – IRIS Advantage,
- zawartość azotu azotanowego(V) – metodą kolorymetryczną z kwasem fenylo-disulfonowym,
- zawartość przyswajalnego fosforu i potasu – metodą Egnera-Riehma (DL),
- zawartość przyswajalnego magnezu – metodą Schachtschabela.

Bezpośrednio po zbiorze roślin określono wielkość plonu ziarna jęczmienia jarego oraz nasion gorzycy białej i łubinu wąskolistnego (przy wilgotności 14%) oraz wielkość plonu słomy tych gatunków. W ziarnie i nasionach z wszystkich obiektów doświadczalnych w dwóch powtórzeniach oznaczono zawartości:

- azotu ogólnego ( $N_{og}$ ) – metodą Kjeldahla,
- azotu białkowego ( $N_b$ ) – metodą destylacyjną po wytrąceniu białka kwasem trichlorooctowym,
- siarki ogólnej ( $S_{og}$ ) i siarczanowej(VI) ( $S_{SO_4}$ ) – metodą optycznej spektrometrii emisyjnej (*ICP OES – Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*) ze wzbudzeniem w plazmie indukcyjnie sprzężonej na aparacie firmy Thermo Elementar – IRIS Advantage, po uprzedniej mineralizacji prób w mieszaninie stężonych kwasów: siarkowego(VI) i chlorowego(VII) w stosunku 4:1 (siarka ogólna) oraz ekstrakcji siarczanów(VI) 2% kwasem octowym,
- fosforu – metodą kolorymetryczną z użyciem molibdenianu amonu, z wykorzystaniem kolorimetru DR-2000,
- magnezu – metodą absorpcyjnej spektrometrii atomowej (ASA),
- wapnia, potasu, sodu – metodą emisyjnej spektrometrii atomowej z wykorzystaniem fotometru płomieniowego Flapho-4,
- azotanów(V) – metodą kolorymetryczną z kwasem fenylodisulfonowym z wykorzystaniem kolorimetru DR-2000,
- skład aminokwasowy białka – metodą wysokosprawnej chromatografii cieczowej (HPLC) po hydrolizie w środowisku kwasu chlorowodorowego o stężeniu  $6 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  w temperaturze  $105^\circ\text{C}$ . Detekcję aminokwasów prowadzono na fotometrze fluoroscencyjnym po ich aldehydacji o-ftaldialdehydem.

W nasionach gorzycy oznaczono ponadto zawartość:

- kwasów tłuszczowych (erukowego, oleinowego, linolowego, linolenowego, palmitynowego, eikozenowego) po przeprowadzeniu ich w estry metylowe, za pomocą wysokosprawnej chromatografii cieczowej HPLC według PN-EN ISO 5509:2001,
- glukozyzolanów (sumę całkowitą, sumę form alkenowych, progoitryny, sinalbiny, glukobrassycyny, 4-OH glukobrassycyny) po przeprowadzaniu ich w pochodne silytowe disulfoglukozyzolanów, stosując rozdział na chromatografie gazowym firmy Hewlett Packard, według metody Raneya (Raney i Mc Gregor 1990).

W ziarnie jęczmienia jarego oznaczono udział frakcji białkowych metodą Michaela-Blume'a (1960) w modyfikacji Łoginowa i in. (1971). W celu ich wyodrębnienia stosowano trzystopniową ekstrakcję. Frakcję I (azotowe związki niebiałkowe i albuminy) wydzielono za pomocą wody destylowanej, frakcję II (globuliny) – 5% roztworem  $K_2SO_4$ , frakcję III (gluteliny i prolaminy) – roztworem NaOH o stężeniu  $0,1 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  w 70% etanolu. Albuminy oddzielano od azotowych związków niebiałkowych, strącając je 20% roztworem kwasu trichlorooctowego. Gluteliny separowano od prolamin przez obniżenie wartości pH.

W tym celu dodano roztwór kwasu chlorowodorowego o stężeniu  $0,1 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  do uzyskania punktu izoelektrycznego ( $\text{pH } 5,5 \pm 0,1$ ), w wyniku czego nastąpiło wytrącenie glutelin. Ilościowe oznaczenie azotu w poszczególnych frakcjach białkowych przeprowadzono metodą Kjeldahla.

Dane zamieszczone w pracy są w przypadku jęczmienia jarego i gorczyicy białej średnimi z czterech lat badań, natomiast łubinu – z trzech lat.

Na podstawie oznaczonego składu aminokwasowego białka ziarna i nasion badanych gatunków roślin obliczono wartości następujących wskaźników:

– zintegrowanego wskaźnika aminokwasów egzogennych EAAI (*Essential Amino Acid Index*):

$$\text{EAAI} = \left( \frac{c_1}{c_{01}} \times 100 \times \frac{c_2}{c_{02}} \times 100 \times \dots \times \frac{c_n}{c_{0n}} \times 100 \right)^{\frac{1}{n}}$$

gdzie:

$c_1, c_2, \dots, c_n$  – zawartość kolejnych aminokwasów egzogennych w badanym białku,

$c_{01}, c_{02}, \dots, c_{0n}$  – zawartość kolejnych aminokwasów egzogennych w białku wzorcowym, za które przyjęto białko jaja kurzego (Oser 1951);

– wskaźnika aminokwasu ograniczającego CS (*Chemical Score*):

$$\text{CS} = \frac{c_i}{c_{0i}} \times 100$$

gdzie:

$c_i$  – zawartość kolejnych aminokwasów egzogennych w badanym białku,

$c_{0i}$  – zawartość kolejnych aminokwasów egzogennych w białku wzorcowym, za które przyjęto białko jaja kurzego (Mitchell i Block 1946).

Na podstawie uzyskanych wyników obliczono plon białka ogólnego zebrany z nasionami ( $N_{\text{og}} \times \text{plon nasion} \times 6,25$ ), a także udziały: azotu białkowego w ogólnej jego zawartości ( $N_b : N_{\text{og}}$ ), siarki siarczanowej(VI) w siarce ogólnej ( $S_{\text{SO}_4} : S_{\text{og}}$ ) oraz stosunki zawartości azotu ogólnego do siarki ogólnej ( $N_{\text{og}} : S_{\text{og}}$ ).

Przeprowadzone oznaczenia chemiczne zawartości makroskładników w nasionach wszystkich objętych badaniami gatunków roślin były podstawą do obliczenia następujących stosunków równoważnikowych:  $\text{K}^+/\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$  i  $(\text{K}^+ + \text{Na}^+)/(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ . W obliczeniach korzystano ze wzoru:

$$M_{\text{gR}} = \frac{M}{n}$$

gdzie:

- $M_{gR}$  – masa gramorównoważnika pierwiastka,
- $M$  – masa molowa pierwiastka,
- $n$  – liczba ładunków jonu pierwiastka.

#### 4.3. BADANIA BIOLOGICZNE WARTOŚCI ODŻYWCZEJ ZIARNA JĘCZMIENIA JAREGO

Z uwagi na fakt, że jęczmień jary uprawia się przede wszystkim do celów paszowych, podjęto badania żywieniowe weryfikujące wartość odżywczą białka ziarna tego gatunku. Badania przeprowadzono w laboratorium Katedry Żywności Zwierząt i Żywności Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie metodą bilansu azotowego oraz metodą wzrostową (McLaughlan 1975, cyt. za Rutkowską 1981) na białych szczurach rasy Vistar, pochodzących z wystandaryzowanej hodowli z Centrum Medycyny Doświadczalnej Akademii Medycznej w Białymstoku. Młode zwierzęta (21-25 dni), o masie  $70 \pm 5$  g, skompletowano w grupy doświadczalne po 6 osobników w grupie. Zwierzęta umieszczono pojedynczo w klatkach metabolicznych zaopatrzonych w poidła i karmniki. Klatki umożliwiały dobry rozdział i zbieranie ekskrementów. Zwierzętom podawano diety doświadczalne zawierające badane ziarno jęczmienia jarego, które pochodziło z obiektów doświadczalnych o zróżnicowanym nawożeniu siarką. Udział testowanego ziarna jęczmienia w diecie był ustalony tak, by znajdująca się w niej ilość białka z ziarna wynosiła 10,0%. Składnikami prób doświadczalnych były również: olej sojowy, mieszanka mineralna i witaminowa oraz skrobia kukurydziana w ilościach pokrywających zapotrzebowanie na składniki pokarmowe i energię. Równolegle wprowadzono grupę kontrolną otrzymującą białko kazeiny. Po czterech dniach aklimatyzacji zwierząt, rozpoczęto test wzrostowy w standardowych warunkach temperatury ( $21^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ) i wilgotności powietrza (70%), który trwał 28 dni. Na początku i na końcu doświadczenia dokonano pomiarów masy ciała zwierząt doświadczalnych w celu określenia jej przyrostów. Od drugiego tygodnia trwania eksperymentu przez kolejnych 7 dni prowadzono badania oceny biologicznej wartości białka. W tym celu ściśle kontrolowano masę spożytej paszy, a także wydalanego kału i moczu przez ilościowe ich zbieranie w kolbach i konserwację 50% roztworem kwasu siarkowego(VI). Po zakończeniu testu przeprowadzono ich mineralizację na mokro, co pozwoliło oznaczyć ilość niestrawionego białka. Na podstawie wzorów Kłobukowskiego i in. (1993) dokonano korekty strawności, która uwzględniała ilość azotu pochodzenia metabolicznego zawartego w kale (1) oraz azotu endogenego zawartego w moczu (2):

$$N_{\text{met.k}} = \frac{-63,96 + 1,32a}{1000} \quad (1)$$

$$N_{\text{end.m}} = \frac{-32,5 + 1,71a}{1000} \quad (2)$$

gdzie:

a – masa ciała szczura w dniu rozpoczęcia badań bilansowych.

W wyniku przeprowadzenia oceny biologicznej białka na podstawie bilansu azotu obliczono następujące wskaźniki:

1) strawności rzeczywistej białka TD (*True Digestibility*):

$$TD = \frac{N_{\text{spoz.}} - (N_k - N_{\text{met.k}})}{N_{\text{spoz.}}} \times 100\%$$

2) wartości biologicznej białka BV (*Biological Value*):

$$BV = \frac{[N_{\text{spoz.}} - (N_k - N_{\text{met.k}}) - (N_m - N_{\text{end.m}})]}{N_{\text{spoz.}} - (N_k - N_{\text{met.k}})} \times 100\%$$

gdzie:

$N_{\text{spoz.}}$  – ilość azotu spożytego z dietą doświadczalną,

$N_k$  – ilość azotu w kale,

$N_{\text{met.k}}$  – ilość azotu metabolicznego wydalonego z kałem,

$N_m$  – ilość azotu w moczu,

$N_{\text{end.m}}$  – ilość azotu endogenego wydalonego z moczem,

3) wykorzystania białka netto NPU (*Net Protein Utilization*) (inaczej – retencji azotu), które stanowi miarę ilości azotu z testowanego białka zatrzymanego w organizmie zwierząt i zużytego do budowy białka tkanek:

$$NPU = TD \times BV$$

gdzie:

TD – wskaźnik strawności rzeczywistej białka,

BV – wskaźnik wartości biologicznej białka.

Na podstawie przyrostów masy ciała zwierząt obliczono wartości następujących wskaźników:

1) współczynnik wydajności wzrostowej PER (*Protein Efficiency Ratio*):

$$PER = \text{przyrost masy ciała (g)} / \text{spożycie białka (g)}$$

2) standardowy współczynnik wydajności wzrostowej  $PER_{\text{stand}}$  (*Protein Efficiency Ratio Standard*), skorygowany wobec oznaczonego równolegle PER kazeiny:

$$PER_{\text{stand.}} = [\text{przyrost masy ciała (g)} / \text{spożycie białka (g)}] \times K$$

gdzie:

K – iloraz standardowego PER kazeiny, wynoszącego 2,5, oraz PER kazeiny w danym doświadczeniu.

#### **4.4. METODY STATYSTYCZNE OPRACOWANIA WYNIKÓW**

Wielkość plonów oraz wyniki badań chemicznych i biologicznych z poszczególnych lat poddano analizie wariancji dla doświadczeń trzyczynnikowych w układzie losowanych podbloków w modelu mieszanym. Przeprowadzono też syntezę dla doświadczeń wielokrotnych obejmujących cztery lata badań dla jęczmienia jarego i gorczycy białej oraz trzy lata badań dla łubinu wąskolistnego. Do oceny istotności różnic średnich obiektowych zastosowano test rozstępu Tukeya na poziomie istotności  $p = 0,05$ . W celu określenia zależności i związków między badanymi cechami obliczono wartości współczynników korelacji liniowej oraz przeprowadzono analizę regresji, obliczając równania regresji prostoliniowej lub wielomianowej drugiego stopnia. Analizę korelacji i regresji wykonano dla średnich obiektowych z wszystkich lat badań (48 średnich obiektowych rocznie dla każdego z badanych gatunków).

#### **4.5. WARUNKI POGODOWE W OKRESIE PROWADZENIA BADAŃ POŁOWYCH**

Obszar Terenowej Stacji Badawczej UTP w Wierzchucinku w latach 1949-2007 charakteryzuje średnia roczna temperatura powietrza wynosząca  $7,8^{\circ}\text{C}$  i opady z reguły nieprzekraczające 450 mm, z czego na okres wegetacyjny przypada około 300 mm (dane Stacji Badawczej UTP zlokalizowanej w Mochelku). Zwykle w drugiej połowie maja występują wiosenne przymrozki. Prace polowe zaczynają się w pierwszych dniach kwietnia, a okres wegetacji trwa na ogół 205-230 dni.

Średnia temperatura powietrza w sezonach wegetacyjnych w latach 2004-2007, obejmujących okres od marca do sierpnia włącznie, była na ogół zbliżona do średniej wieloletniej temperatury z ostatnich 55 lat dla tego obszaru (tab. 2). Okres od maja do lipca w 2004 r. oraz czerwiec w 2005 r. charakteryzowały się nieco niższą temperaturą powietrza niż średnia wieloletnia, natomiast w lipcu 2005 r. oraz w drugiej i trzeciej dekadzie czerwca, a zwłaszcza w lipcu 2006 r., temperatura była znacznie wyższa od średniej. Z kolei w 2007 r. we wszystkich miesiącach sezonu wegetacyjnego, oprócz lipca, temperatura powietrza była wyższa od temperatury typowej dla obszaru prowadzenia badań. Warto podkreślić, że po krótkim okresie ciepłej i słonecznej pogody w III dekadzie kwietnia 2007 r., w pierwszych dniach maja nastąpiło gwałtowne ochłodzenie z ujemnymi temperaturami w nocy, co opóźniło wschody roślin o około dwa tygodnie.

Rozkład opadów w okresie wiosenno-letnim był wyraźnie zróżnicowany w poszczególnych latach badań (tab. 2).



Sumy opadów pięciu miesięcy (od marca do lipca) w latach 2004-2006 były porównywalne ze średnią wieloletnią wynoszącą 217,7 mm. Natomiast w roku 2007 suma ta była znacznie wyższa (różnica w stosunku do średniej z okresu wieloletniego – 131,1 mm, co stanowiło 60,2%). W czerwcu i lipcu 2005 i 2006 ilość opadów była znacznie niższa od średniej dla tego obszaru. W latach 2004 i 2007, po suchej ostatniej dekadzie kwietnia, w pierwszej połowie maja pojawiły się stosunkowo obfite opady. W czerwcu i lipcu 2007 r. ilość opadów była znacznie wyższa od średniej wieloletniej – różnica sumy opadów dla tych dwóch miesięcy w stosunku do średniej z lat 1949-2007 wynosiła 86,0 mm. Zwraca uwagę zwłaszcza suma opadów, jakie wystąpiły w czerwcu 2007 roku. Była ona blisko dwukrotnie wyższa od średniej wieloletniej dla tego miesiąca.

W celu przedstawienia pełniejszej charakterystyki warunków meteorologicznych panujących w okresie badań obliczono wartości współczynnika hydrotermicznego Sielianinowa:

$$k = \frac{P}{0,1 \Sigma t}$$

gdzie:

- P – miesięczna suma opadów atmosferycznych (mm),
- $\Sigma t$  – miesięczna suma dobowych temperatur powietrza  $> 0^{\circ}\text{C}$ .

Przyjmuje się następujące wartości graniczne współczynnika hydrotermicznego Sielianinowa (Skowera i Puła 2004):

- $k < 0,4$  warunki skrajnie suche,
- $0,4 < k < 0,7$  warunki bardzo suche,
- $0,7 < k < 1,0$  warunki suche,
- $1,0 < k < 1,3$  warunki dość suche,
- $1,3 < k < 1,6$  warunki optymalne,
- $1,6 < k < 2,0$  warunki dość wilgotne,
- $2,0 < k < 2,5$  warunki wilgotne,
- $2,5 < k < 3,0$  warunki bardzo wilgotne,
- $3,0 < k$  warunki skrajnie wilgotne.

Obliczone wartości współczynnika Sielianinowa (tab. 3), a także opracowane klimatogramy (rys. 6) potwierdzają duże zróżnicowanie warunków pogodowych w poszczególnych latach badań.

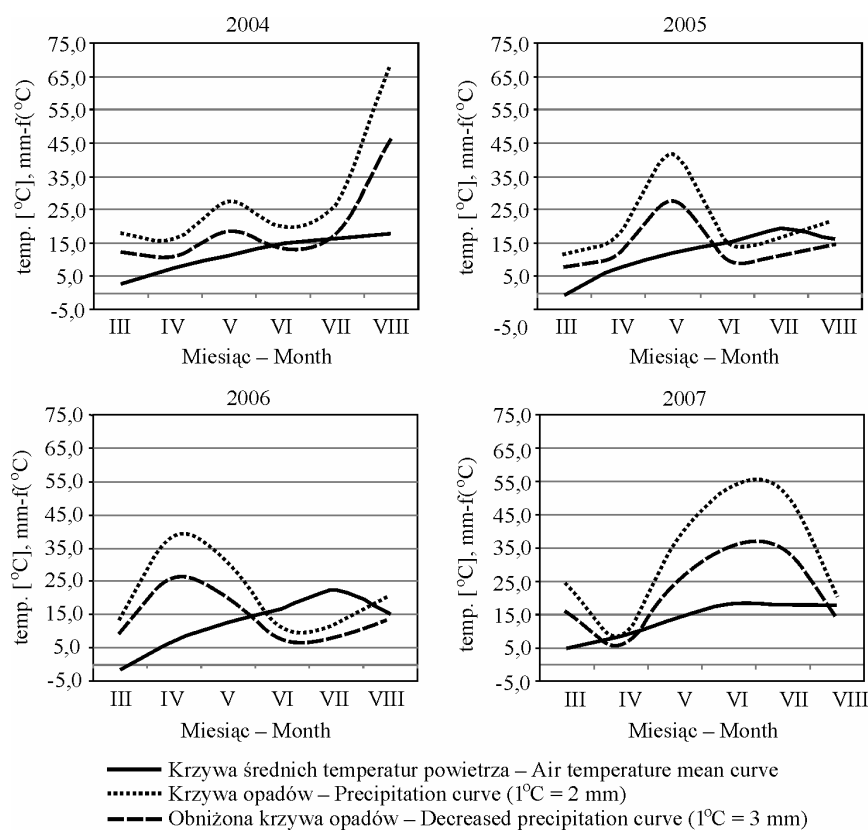
Największe wahania temperatury i opadów wystąpiły w sezonie wegetacyjnym 2006 roku, w którym odnotowano największy w całym okresie badań deficyt wody. W czerwcu tego roku współczynnik Sielianinowa osiągnął średnią wartość 0,43, a w lipcu – 0,35. Jednocześnie w kwietniu omawiany wskaźnik osiągnął najwyższą średnią wartość ( $k = 3,62$ ), co wskazywało na wystąpienie skrajnie wilgotnych warunków.



Tabela 3. Wartości współczynnika Sielianinowa w czasie prowadzenia badań  
 Table 3. Sielianinov's coefficient values throughout the research period

Rok – Year	Miesiąc – Month				
	kwiecień April	maj May	czerwiec June	lipiec July	sierpień August
2004	1,43	1,56	0,90	1,05	2,50
2005	1,57	2,18	0,68	0,56	0,85
2006	3,62	1,55	0,43	0,35	2,51
2007	0,69	1,71	1,93	1,88	0,76

Bardziej stabilny pod względem warunków termiczno-opadowych był rok 2005, który wyróżniał się na tle pozostałych lat badań niskimi opadami w okresie od czerwca do sierpnia. Na klimatogramach (rys. 6) obszar poniżej krzywej temperatur wyznaczony przez krzywą opadów odpowiada okresowi suchemu, a przez obniżoną krzywą opadów – okresowi półsuchemu. Z ich analizy wynika, że w 2005 roku wystąpiła półsusza, a w 2006 roku – susza.



Rys. 6. Klimatogramy dla poszczególnych lat badań  
 Fig. 6. Climatograms for respective research years

## 5. OMÓWIENIE I DYSKUSJA WYNIKÓW

### 5.1. PLON NASION I SŁOMY

Nawożenie roślin powinno być rozpatrywane jako zrównoważony system oparty na bilansie składników pokarmowych, uwzględniający ich pobranie przez rośliny z gleby oraz z nawozów. Można sądzić, że wysoka efektywność plonotwórcza nawozów jest możliwa przy zachowaniu odpowiednich proporcji nie tylko między podstawowymi składnikami pokarmowymi: azotem, fosforem, potasem, wapniem i magnezem, ale także siarką, której postępujący niedobór obserwuje się od początku lat 90. XX wieku w wielu regionach Polski (Terelak i in. 1995, Grzebisz i Przygocka-Cyna 2000, Jakubus 2006, Szulc 2008).

W przeprowadzonych badaniach plon ziarna jęczmienia jarego (*Hordeum vulgare* L.) oraz nasion gorczycy białej (*Sinapis alba* L.) (średnio z czterech lat badań) i łubinu wąskolistnego (*Lupinus angustifolius* L.) (średnio z trzech lat), wynosił w  $t \cdot ha^{-1}$  odpowiednio: 5,53, 2,36 i 2,61 (tab. 4), kształtując się dla każdego gatunku nieco poniżej potencjału plonotwórczego uprawianych odmian (odpowiednio: 5,75, 2,54 i 2,99 w  $t \cdot ha^{-1}$  – Lista odmian... 2001).

Pod względem wielkości plonu słomy wyróżniała się gorczyca (średnio –  $7,81 t \cdot ha^{-1}$ ), natomiast plony słomy jęczmienia jarego i łubinu były niższe i wynosiły średnio: 5,46 i  $3,51 t \cdot ha^{-1}$  (tab. 5).

#### 5.1.1. WPLYW SPOSOBU APLIKACJI I FORMY SIARKI NA PLON BADANYCH GATUNKÓW ROŚLIN

Sposób aplikacji siarki wpływał istotnie tylko na wielkość plonu ziarna jęczmienia jarego i nasion gorczycy oraz plonu słomy łubinu. Podobnie jak w badaniach Withersa i in. (1997), wyższe plony nasion tych gatunków uzyskano stosując doglebowe nawożenie siarką. Różnice wynosiły odpowiednio:  $0,20 t \cdot ha^{-1}$  (3,7%) i  $0,10 t \cdot ha^{-1}$  (4,3%) (tab. 4). Na wyższą efektywność siarki stosowanej przedsięwzięcie w porównaniu z aplikacją pogłówną, w tym dolistną, w uprawie rzepaku jarego zwracają uwagę także Krauze i Bowszys (2001). Nawożenie dolistne ma wiele zalet: dużą szybkość działania składników pokarmowych podanych z cieczą roboczą, możliwość uniknięcia sorpcji biologicznej i chemicznej tych pierwiastków w glebie, jak również możliwość stosowania nawozów wraz ze środkami ochrony roślin. Jednakże poważną wadą tego sposobu aplikacji składników nawozowych jest uzależnienie od warunków pogodowych, a także ryzyko poparzenia liści, zwłaszcza wtedy, gdy roztwory mają zbyt wysokie stężenia (Podleśna 2005). Phillips i Mullins (2004) wykazali, że dodatek siarki w postaci  $Na_2SO_4$  do roztworu mocznika w dolistnym nawożeniu pszenicy jarej powodował wyraźny, szczególnie w późniejszych fazach rozwoju rośliny, wzrost udziału uszkodzonych liści.

Tabela 4. Plon ziarna jęczmienia jarego oraz nasion łubinu i gorczycy [ $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ] – średnie z lat badań  
 Table 4. Yield of spring barley grain and lupin and mustard seeds [ $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ] – means for the experiment years

Dawka – Dose [ $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ ] (III)	Sposób aplikacji – Application method (I)										Forma – Form (II)		Średnia Mean
	dolistne nawożenie – foliar fertiliser					dogłębne nawożenie – soil fertiliser					Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean				
Jęczmień jary – Spring barley													
0	5,20	5,23	5,21	5,38	5,36	5,37	5,29	5,29	5,29	5,29	5,29	5,29	5,29
20	5,37	5,45	5,41	5,54	5,69	5,62	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45	5,51
40	5,51	5,65	5,58	5,70	5,84	5,77	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,68
60	5,45	5,64	5,55	5,72	5,79	5,76	5,59	5,59	5,59	5,59	5,59	5,59	5,65
Średnia – Mean	5,38	5,49	5,43	5,58	5,67	5,63	5,48	5,48	5,48	5,48	5,48	5,48	5,53
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – 0,10; II – 0,10; III – 0,20; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.;													
II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.													
Łubin wąskolistny – Narrow-leaf lupin													
0	2,37	2,32	2,34	2,37	2,36	2,36	2,37	2,37	2,37	2,37	2,37	2,37	2,35
20	2,49	2,51	2,50	2,67	2,72	2,69	2,58	2,58	2,58	2,58	2,58	2,58	2,60
40	2,79	2,88	2,83	2,64	2,64	2,68	2,71	2,71	2,71	2,71	2,71	2,71	2,76
60	2,67	2,75	2,71	2,71	2,76	2,74	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,72
Średnia – Mean	2,58	2,61	2,60	2,60	2,64	2,62	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,61
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 0,130; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.;													
II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.													
Gorczyca biała – White mustard													
0	2,14	2,14	2,14	2,17	2,14	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15
20	2,14	2,31	2,22	2,27	2,37	2,34	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,28
40	2,41	2,49	2,45	2,39	2,41	2,46	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40	2,43
60	2,45	2,46	2,46	2,59	2,65	2,65	2,52	2,52	2,52	2,52	2,52	2,52	2,56
Średnia – Mean	2,29	2,35	2,30	2,35	2,39	2,40	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,36
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – 0,08; II – 0,04; III – 0,12; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – 0,11; III × I – 0,13;													
II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.													

n.i. – n.s. – różnice nieistotne – non-significant differences

Tabela 5. Plon słomy badanych gatunków roślin [t·ha<sup>-1</sup>] – średnie z lat badań  
 Table 5. Straw yield of the plant species researched [t·ha<sup>-1</sup>] – means for the experiment years

Dawka – Dose [kg S·ha <sup>-1</sup> ] (III)	Sposób aplikacji – Application method (I)						Forma – Form (II)		Średnia Mean
	dolistne nawożenie – foliar fertiliser			doglebowe nawożenie – soil fertiliser			Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean			
0	5,19	5,21	5,20	Jęczmień jary – Spring barley			5,09	5,18	5,14
20	5,61	5,43	5,52	4,98	5,16	5,07	5,41	5,41	5,41
40	5,65	5,78	5,72	5,21	5,38	5,30	5,67	5,69	5,68
60	5,45	5,51	5,48	5,68	5,59	5,64	5,60	5,59	5,60
Średnia – Mean	5,48	5,48	5,48	5,75	5,67	5,71	5,44	5,47	5,46
NIR <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 0,20; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – 0,25; III × I – 0,27;									
II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.									
Łubin wąskolistny – Narrow-leaf lupin									
0	3,28	3,15	3,21	3,17	3,13	3,15	3,23	3,14	3,19
20	3,90	3,77	3,84	3,34	3,16	3,25	3,62	3,47	3,54
40	4,02	3,87	3,95	3,37	3,28	3,33	3,70	3,58	3,64
60	4,02	3,80	3,91	3,57	3,30	3,44	3,80	3,55	3,68
Średnia – Mean	3,81	3,65	3,73	3,37	3,22	3,30	3,59	3,44	3,51
NIR <sub>0,05</sub> : I – 0,26; II – 0,10; III – 0,24; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – 0,29; III × I – 0,28; II × III – n.i.–n.s.;									
III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.									
Gorczyca biała – White mustard									
0	7,68	7,74	7,71	7,65	7,69	7,67	7,66	7,71	7,69
20	7,72	7,79	7,76	8,00	7,86	7,93	7,86	7,82	7,84
40	7,76	7,69	7,72	7,58	7,90	7,74	7,67	7,79	7,73
60	7,75	7,89	7,82	7,89	8,32	8,11	7,82	8,10	7,96
Średnia – Mean	7,73	7,78	7,75	7,78	7,94	7,86	7,75	7,86	7,81
NIR <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – n.i.–n.s.; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.;									
II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.									

n.i. – n.s. – różnice nieistotne – non-significant differences

Niektórzy autorzy (Motowicka-Terelak i Dudka 1991) zwracają uwagę na ryzyko stosowania dolistnie wyższych dawek siarki, które wprawdzie nie wywołują widocznych objawów oparzeń, ale zakłócają procesy fizjologiczne, zwłaszcza fotosyntezę i transpirację, co w konsekwencji może negatywnie wpływać na wielkość plonu.

W badaniach własnych większy plonotwórczy wpływ przedsięwziętego dogłębowego stosowania siarki w porównaniu z jej aplikacją dolistną był prawdopodobnie konsekwencją uzależnienia efektywności zabiegu od nie zawsze sprzyjających warunków pogodowych. Poza tym przez liście można na ogół wprowadzić tylko niewielką ilość składników pokarmowych w stosunku do potrzeb rośliny. Dotyczy to zwłaszcza siarki, pierwiastka znacznie wolniej pobieranego drogą dolistną niż azot, magnez, potas i bor (Wielebski 2000, Podleśna 2005). Zdaniem Bootha i in. (1995), tylko 2% siarki z oprysków może być bezpośrednio pobrane przez liście. Pozostała jej część trafia do gleby, gdzie jest przekształcana przez mikroorganizmy i stopniowo uruchamiana. Można mieć wątpliwości, czy w przeprowadzonych badaniach  $20 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$  zastosowane dolistnie w fazie kwitnienia (jako trzecia część dawki  $60 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) zostało wykorzystane przez rośliny. Chcąc uniknąć poparzeń liści, do dolistnej aplikacji przygotowywano roztwory o dużych rozcieńczeniach (3,3%), co oznaczało konieczność użycia stosunkowo dużej ilości wody. Można się spodziewać, że pewna część składnika trafiała do gleby i mogła, biorąc pod uwagę późną fazę wegetacji, nie zostać wykorzystana. Wydaje się, że za podstawowy sposób dostarczenia siarki należy uznać jej przedsięwzięte stosowanie dogłębowe.

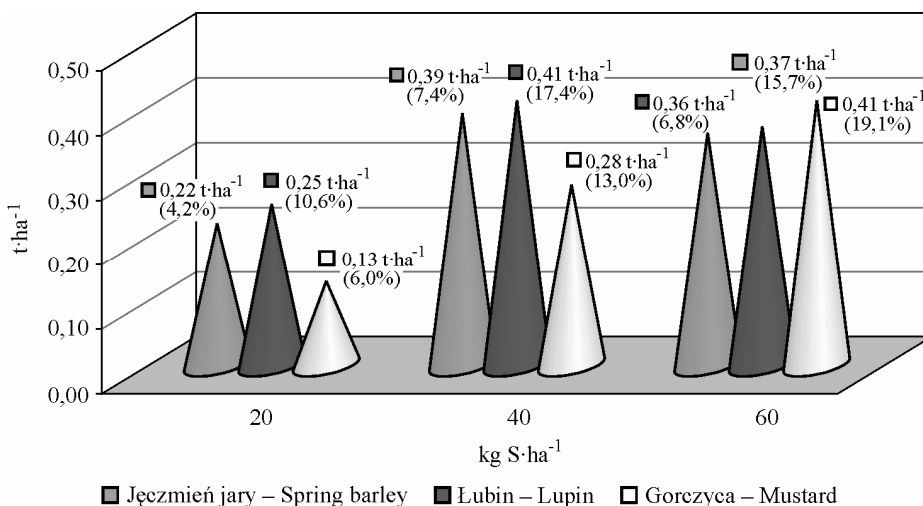
Przeprowadzone badania wykazały istotny, lecz niewielki wpływ formy siarki na kształtowanie plonu ziarna jęczmienia jarego i nasion gorczycy (tab. 4) oraz słomy łubinu (tab. 5). W przypadku plonów nasion tych gatunków korzystniejszą od formy elementarnej siarki okazała się forma jonowa, zastosowana w postaci  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Odpowiednie różnice wynosiły:  $0,10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  (1,8%) i  $0,07 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  (3,0%) (tab. 4). Siarka w formie pierwiastkowej jest nierozpuszczalna w wodzie, co może stanowić jej zaletę z uwagi na zmniejszenie ryzyka strat składnika przez wymywanie. Z drugiej strony istnieje konieczność jej biologicznego utleniania z udziałem bakterii z rodzaju *Thiobacillus* do formy siarczanowej(VI), dostępnej dla roślin (Jakubus 2006), co sprawia, że siarka w postaci pierwiastkowej działa wolniej niż w formie jonowej (Kaczor i Zuzańska 2009). Proces tej transformacji mikrobiologicznej zależy od wielu czynników, m.in. od aktywności populacji mikroorganizmów w glebie, stopnia rozdrobnienia siarki nawozowej (Kulczycki 2007) oraz warunków wilgotnościowo-termicznych (Motowicka-Terelak i Terelak 2000). Doświadczenie polowe, będące podstawą badań własnych, było prowadzone w warunkach na ogół niskich opadów, co może tłumaczyć niższą efektywność plonotwórczą formy elementarnej siarki niż postaci jonowej. Korzystniejsze działanie formy jonowej w porównaniu z pierwiastkową potwierdzają też badania Mitchella i Mullinsa (1990), Brodowskiej (2003) oraz Girmy i in. (2005) nad pszenicą oraz Szulca i in. (2003) – nad rzepakiem jarym. Kulczycki (2007) w badaniach nad gorczycą, podobnie jak Kaczor i Bro-

dowska (2003) – nad rzepakiem jarym, nie wykazali natomiast istotnych różnic w oddziaływaniu różnych form siarki na wielkość plonu, a Cyna i Grzebisz (2003) uzyskali niższe plony rzepaku ozimego w warunkach nawożenia siarczanową(VI) formą tego składnika niż po zastosowaniu siarki elementarnej.

Brak jednoznacznego rozstrzygnięcia w literaturze przedmiotu co do optymalnego sposobu aplikacji i formy stosowania siarki w agrotechnice roślin uprawnych wynika ze zróżnicowanych siedliskowych i pogodowych warunków prowadzenia badań. Wydaje się, że stosowanie siarki elementarnej, formy w porównaniu z siarczanami(VI) mniej podatnej na wymywanie, powinno być preferowane na glebach lekkich. W takich warunkach stopniowe uwalnianie siarczanów(VI) z tych nawozów stanowi ich zaletę. Badania własne prowadzone na piasku gliniastym mocnym nie wykazały wyraźnej przewagi którejkolwiek z badanych form pod względem efektywności plonotwórczej. Stwierdzono nieco korzystniejsze działanie formy jonowej, jednak różnice w porównaniu z formą elementarną były niewielkie i nie zawsze istotne statystycznie.

### 5.1.2. WPŁYW DAWKI SIARKI

Spośród badanych czynników najbardziej znaczący wpływ na plon nasion i słomy wszystkich badanych gatunków roślin, z wyjątkiem słomy gorczycy, miała dawka siarki. Na rysunku 7 przedstawiono w liczbach bezwzględnych i względnych działanie dawek siarki na wielkość plonów nasion z uwzględnieniem istotności różnic, niezależnie od sposobu jej aplikacji i formy.



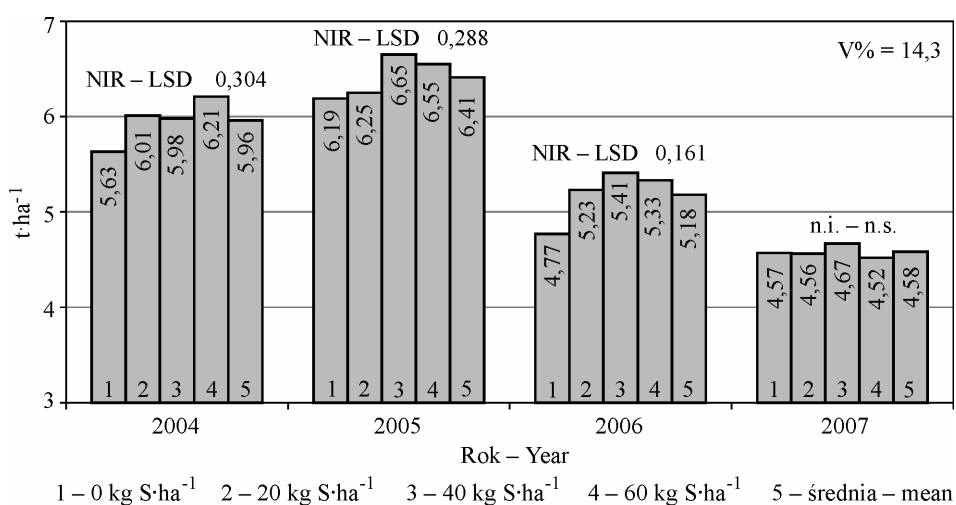
Rys. 7. Przyrost plonu ziarna jęczmienia jarego oraz nasion łubinu i gorczycy pod wpływem zastosowanych dawek siarki w porównaniu z obiektem kontrolnym – średnie dla lat badań

Fig. 7. Increase in the yields of spring barley grain as well as lupin and mustard seed depending on the sulphur dose applied, as compared with the control – means for the experiment years

Wobec zróżnicowanej roli tego składnika w metabolizmie objętych badaniami roślin, oddziaływanie siarki na ich plonowanie zostało omówione odrębnie dla każdego gatunku.

### 5.1.2.1. Wpływ dawki siarki na wielkość plonu ziarna i słomy jęczmienia jarego

Zastosowanie siarki w nawożeniu jęczmienia jarego (*Hordeum vulgare* L.) oddziaływało istotnie na wielkość plonu jego ziarna w każdym z lat badań, oprócz roku 2007 (rys. 8).

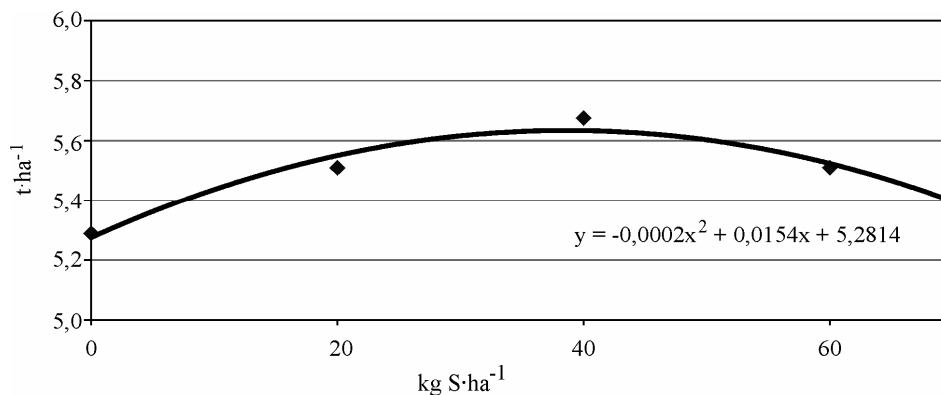


Rys. 8. Wielkość plonu ziarna jęczmienia jarego w poszczególnych latach badań w zależności od zastosowanych dawek siarki

Fig. 8. Spring barley grain yield in respective years of study depending on the sulphur doses applied

Zgodnie z modelem regresji drugiego stopnia, oszacowanym dla ziarna omawianego gatunku na podstawie średnich z czterech lat badań (rys. 9), maksymalny jego plon uzyskano po zastosowaniu około 40 kg S·ha<sup>-1</sup> (maksimum funkcji odpowiada 38,5 kg S·ha<sup>-1</sup>).

Biorąc pod uwagę fakt uznawania jęczmienia jarego za gatunek o niskich wymaganiach w stosunku do siarki (Boreczek 2001, Brodowska 2003, Lipiński i in. 2003, Jakubus 2006), należy uznać tę dawkę za stosunkowo wysoką, również na tle dawek zalecanych w agrotechnice zbóż w krajach Europy Zachodniej (Danii, Wielkiej Brytanii, Francji, Niemczech, Norwegii, Szwecji) (Walker i Dawson 2003, Morris 2007). Ten stan rzeczy można uzasadnić nie tylko niską zasobnością gleby, na której prowadzono badania polowe, w przyswajalną siarkę, ale i uzyskanym, relatywnie wysokim, plonem ziarna (średnio - 5,53 t·ha<sup>-1</sup>) oraz słomy (5,46 t·ha<sup>-1</sup>) jęczmienia jarego (tab. 4 i 5).



Rys. 9. Zależność plonu ziarna jęczmienia jarego od zastosowanych dawek siarki  
 Fig. 9. Spring barley grain yield depending on the sulphur doses applied

Po zastosowaniu 40 kg S·ha<sup>-1</sup> średni przyrost plonu ziarna jęczmienia jarego w stosunku do obiektu kontrolnego wynosił 0,39 t·ha<sup>-1</sup> (7,4%) (rys. 7), a dawka 60 kg S·ha<sup>-1</sup> nie zmieniała istotnie jego wielkości w porównaniu z dawką 40 kg S·ha<sup>-1</sup> (tab. 3).

Z przeglądu badań nad plonotwórczym działaniem siarki prowadzonych w Wielkiej Brytanii i Niemczech wynika, że zakres przyrostu plonu ziarna jęczmienia jarego pod wpływem nawożenia siarką w dawkach do 30 kg S·ha<sup>-1</sup> wynosił w tych krajach odpowiednio: 5-28% i 11-22% (Zhao i in. 2003).

W polskich warunkach glebowo-klimatycznych Potarzycki (2004a) wykazał silną reakcję tego gatunku na stosowanie siarki w postaci superfosfatu prostego, stwierdzając istotny przyrost plonu ziarna aż do dawki 50 kg S·ha<sup>-1</sup>. Plonotwórczy efekt zastosowania siarki dla innych gatunków zbóż wykazali również: Scott i in. (1984) w badaniach nad jęczmieniem ozimym, Hrivna i in. (1999), Podleśna i in. (2003), Wieser i in. (2004) oraz Girma i in. (2005) – nad pszenicą ozimą, Boreczek (2001) – nad kukurydzą, Klikocka (2004b) – nad pszenżytem jarym, Przygocka-Cyna i Grzebisz (2006) oraz Fečenko i Ložek (1999) – nad jęczmieniem browarnym.

Nawożenie siarką zwiększa plon roślin w sposób pośredni, wpływając na przemiany azotu w roślinie i syntezę białek, natomiast jej bezpośredni wpływ na plonowanie roślin nie został do końca zbadany i jednoznacznie określony. Wielu autorów (Ahmad i in. 1999, Fotyma 2003) sądzi, że szybki rozwój organów wegetatywnych pod wpływem nawożenia azotem powoduje większe zapotrzebowanie na siarkę siarczanową(VI) do syntezy białek. Zdaniem Podleśnej i in. (2003), rośliny nawożone tym pierwiastkiem cechują się bardziej efektywnym transportem asymilatów, co pozwala uzyskać wyższe wartości indeksu żniwnego. Na lepszą redystrybucję azotu z organów wegetatywnych do ziarniaków w roślinach nawożonych tym składnikiem zwracają uwagę również Erikson i in. (2001), którzy wykazali, że siarka w uprawie jęczmienia jarego znacząco zwiększała wykorzystanie i efektywność azotu z nawozów. Według tych auto-



rów, jej rola w kształtowaniu plonu ziarna jęczmienia jarego polega na regulacji procesów fizjologicznych zachodzących w roślinie na początku fazy strzelania w źdźbło. Ahmad i in. (1999) wskazują na dwa możliwe mechanizmy współdziałania azotu i siarki: efekt rozcieńczenia i efekt synergistyczny. W literaturze przedmiotu nie brakuje jednak publikacji, w których nie potwierdza się dodatnie oddziaływanie siarki na plony roślin. W przeciwieństwie do powyżej cytowanych autorów, Świdarska-Ostapiak i Stankowski (2002) dla odmian owsa oplewionego i nieoplewionego oraz Fotyma (2003) dla pszenicy ozimej nie stwierdzili zasadniczego wpływu siarki na wielkość plonu ziarna i jego strukturę. Brak reakcji plonu zbóż na nawożenie siarką wynikał prawdopodobnie z jeszcze wystarczającej zasobności gleb, na których prowadzono badania, w przyswajalną formę tego składnika.

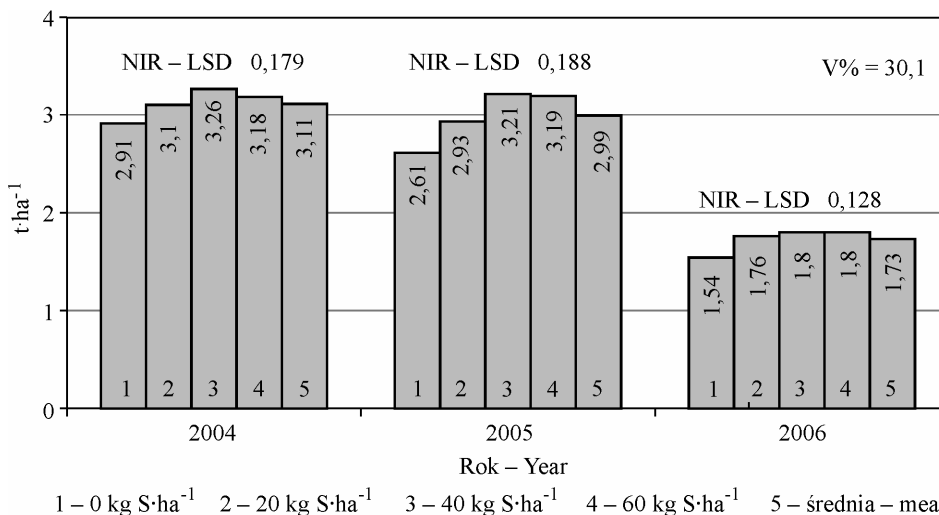
Warto nadmienić, że plon ziarna zbóż określany jest przede wszystkim przez trzy elementy struktury plonu: liczbę kłosów na jednostce powierzchni, liczbę ziarniaków w kłosie oraz masę tysiąca ziaren (MTZ). Barczak i Majcherczak (2008) wskazują na dużą rolę siarki w kształtowaniu masy pojedynczych ziarniaków jęczmienia jarego, a także obsady kłosów, podkreślając jednak, że warunki hydrotermiczne w okresie wegetacji wywierają znacznie większy wpływ na kształtowanie się elementów struktury plonu jęczmienia jarego niż uwzględnione w doświadczeniu nawożenie tym składnikiem. Na istnienie związku między wielkością plonu zbóż a elementami jego struktury, który jest coraz bardziej wyraźny w miarę zwiększania się dawki siarki, zwracają uwagę również Eriksen i Mortensen (2002), Potarzycki (2004a) oraz Przygocka-Cyna i Grzebisz (2006) w badaniach dotyczących jęczmienia, a także Withers i in. (1995), Inal i in. (2003) oraz Podleśna i in. (2003) w badaniach nad pszenicą.

#### **5.1.2.2. Wpływ dawki siarki na wielkość plonu nasion i słomy łubinu wąskolistnego**

W badaniach własnych wykazano dodatnią reakcję plonu łubinu wąskolistnego (*Lupinus angustifolius* L.) na nawożenie siarką (tab. 4 i 5). W kolejnych latach istotny przyrost plonu nasion tego gatunku powodowała już dawka 20 kg S·ha<sup>-1</sup> (rys. 10). W porównaniu z obiektem kontrolnym wynosił on (średnio z trzech lat badań) 0,25 t·ha<sup>-1</sup> (10,6%), natomiast przyrost plonu słomy – 0,35 t·ha<sup>-1</sup> (11,0%) (tab. 4 i 5). Po zastosowaniu 40 kg S·ha<sup>-1</sup> odpowiednie różnice wynosiły: 0,41 t·ha<sup>-1</sup> (17,4%) i 0,45 t·ha<sup>-1</sup> (14,1%). Dawka 60 kg S·ha<sup>-1</sup> nie wpływała istotnie na zmiany wielkości plonu w porównaniu z poziomem 40 kg S·ha<sup>-1</sup> w żadnym z lat badań (rys. 10).

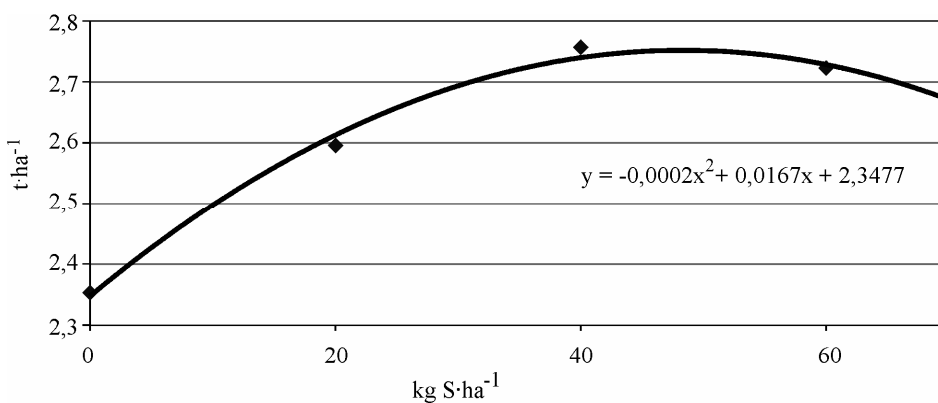
Równanie regresji wielokrotnej drugiego stopnia, opisujące wielkość plonu nasion łubinu w funkcji dawek siarki (rys. 11), wskazuje, że pod względem możliwości uzyskania najwyższego plonu nasion optymalną dawką siarki jest 40 kg·ha<sup>-1</sup> (funkcja osiąga maksimum dla 41,7 kg S·ha<sup>-1</sup>). Taki poziom siarki potwierdza zasadność kwalifikowania tego gatunku, obok innych z rodziny *Fabaceae* (bobowate), do grupy roślin o dużym zapotrzebowaniu na siarkę, wyno-

szącym od 30 do 40 kg S·ha<sup>-1</sup> (Boreczek 2001, Jakubus 2006, Szulc 2008). Jest on wyższy w porównaniu z danymi przedstawionymi przez Walkera i Dawsona (2003), dotyczącymi zalecanych dawek tego składnika w agrotechnice gatunków z rodziny *Fabaceae* w krajach zachodnioeuropejskich. Dla przykładu, w Wielkiej Brytanii pod groch zaleca się stosowanie 25-30 kg S·ha<sup>-1</sup>, a w Szwecji pod fasolę – 15-20 kg S·ha<sup>-1</sup>.



Rys. 10. Plon nasion łubinu w poszczególnych latach badań w zależności od zastosowanych dawek siarki

Fig. 10. Lupin seeds yields in respective years of study depending on the sulphur doses applied



Rys. 11. Zależność plonu nasion łubinu od zastosowanych dawek siarki

Fig. 11. Lupin seeds yield depending on the sulphur doses applied

Reakcja łubinu wąskolistnego na nawożenie siarką jest związana ze specyficznym metabolizmem azotowym, który wynika z symbiozy gatunków rodziny

*Fabaceae* z bakteriami wiążącymi azot atmosferyczny. W ich fizjologii siarka spełnia podwójną rolę – jest niezbędna do biologicznej redukcji azotu cząsteczkowego oraz do syntezy białek, w które ta rodzina jest szczególnie bogata (Podleśna 2005). Dlatego też plonowanie tych gatunków determinowane jest zaopatrzeniem roślin w siarkę. Do nielicznych badań prowadzonych nad nawożeniem tym składnikiem gatunków z rodziny *Fabaceae*, należą wykonane przez Zhao i in. (1999c, d), a dotyczące grochu siewnego. Autorzy wykazali, że przy niedoborze tego składnika obserwuje się mniejsze i mniej liczne brodawki, choć ich masa nie różni się od masy brodawek roślin rozwijających się przy optymalnym zaopatrzeniu w siarkę. Badania dowiodły, że jej dodatek powodował również wzrost plonu nasion grochu, co było konsekwencją dodatniego wpływu siarki na zawartość chlorofilu w liściach oraz na ilość suchej masy korzeni i pędów, a także liczby jego strąków (Zhao i in. 1999d). Goźliński (1970b) w doświadczeniu z peluszką i bobem uprawianymi na glebie ubogiej w siarkę dowiódł z kolei, że w przeciwieństwie do gorczycy, reagują one na zastosowanie tego składnika przyrostem plonów nasion bez względu na nawożenie azotem, przy czym nawożenie siarką wpływało w znacznie większym stopniu na plon nasion niż słomy.

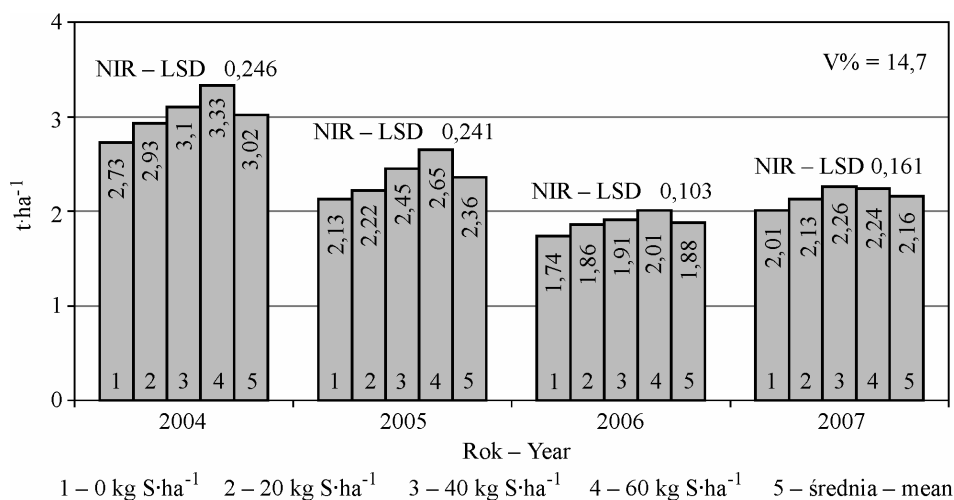
### 5.1.2.3. Wpływ dawki siarki na wielkość plonu nasion i słomy gorczycy białej

Gorczyca biała (*Sinapis alba* L.) należy do rodziny *Brassicaceae* (kapustowatych), zaliczanej obok *Liliaceae* (liliowatych) do gatunków o bardzo wysokich wymaganiach w stosunku do siarki. Wynika to z faktu, że pierwiastek ten wchodzi w skład wielu metabolitów pierwotnych (aminokwasów siarkowych, glutationu, ferredoksyny, koenzymu A, witamin) i wtórnych (glukozynolanów i fitoaleksyn), pełniących ważne funkcje fizjologiczne i biochemiczne w metabolizmie tej grupy roślin.

Średni plon nasion gorczycy w przeprowadzonych badaniach wynosił  $2,36 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  (tab. 4) i był wyraźnie wyższy niż średni plon tego gatunku uzyskiwany w Polsce ( $1,85 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) (Toboła i Muśnicki 1999). Zdaniem Sawickiej i Kotiuk (2007), przyczynami stosunkowo niskich plonów gorczycy białej w Polsce są: powszechna uprawa po niekorzystnych przedplonach, późny siew, niskie nawożenie mineralne oraz niskie nakłady na regulację zachwaszczenia i zwalczanie szkodników.

Najbardziej sprzyjające warunki hydrotermiczne dla uzyskania wysokiego plonu nasion gorczycy (średnio  $3,02 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) stwierdzono w roku 2004. Najniższy plon tego gatunku ( $1,88 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) zebrano w 2006 roku (rys. 12).

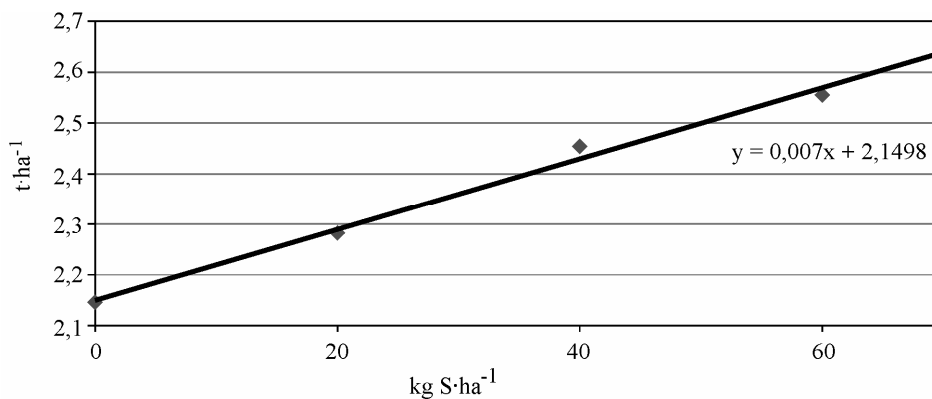
Najwyższe plony nasion i słomy gorczycy uzyskiwano na ogół po zastosowaniu dawki  $60 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$  (tab. 4 i 5, rys. 12). Przyrost plonu nasion w stosunku do obiektu kontrolnego osiągnięty pod wpływem tej dawki wynosił średnio dla lat, sposobu aplikacji i formy siarki 19,1% i był znacznie wyższy niż po zastosowaniu  $60 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$  u pozostałych badanych gatunków roślin (rys. 7).



Rys. 12. Plon nasion gorczycy w poszczególnych latach badań w zależności od zastosowanych dawek siarki

Fig. 12. Mustard seed yield in respective years of study depending on the sulphur doses applied

Modelem regresji najlepiej przedstawiającym wielkość plonu nasion gorczycy w funkcji dawek siarki jest równanie pierwszego stopnia (rys. 13).



Rys. 13. Zależność plonu nasion gorczycy od zastosowanych dawek siarki

Fig. 13. Mustard seed yield depending on the sulphur doses applied

Wobec liniowego charakteru omawianej zależności nie można wskazać optymalnej dla jego wielkości dawki siarki. Należy sądzić, biorąc pod uwagę potencjał plonowania odmiany Barka (Lista odmian... 2001), że podwyższenie dawki siarki powyżej poziomu 60 kg S·ha<sup>-1</sup> mogłoby skutkować dalszym przyrostem wielkości plonu nasion gorczycy.

Wykazane w badaniach własnych oddziaływanie siarki na plonowanie gorczycy koresponduje z wynikami uzyskanymi przez Zhao i in. (2003), dotyczącymi reakcji na ten składnik rzepaku uprawianego na terenie Wielkiej Brytanii. W zależności od warunków i dawki siarki wzrost plonu nasion rzepaku pod wpływem nawożenia tym składnikiem w stosunku do obiektu kontrolnego wynosił: 10,7% (Zhao i in. 1993), 9-27% (Fismes i in. 2000), 42-67% (McGrath i Zhao 1996). McGrath i in. (2003) w przeglądowym opracowaniu informują, że w Europie Zachodniej zwyczajki plonu tego gatunku w wyniku nawożenia siarką kształtowały się w przedziale od 0,16 do 2,71 t·ha<sup>-1</sup>. Z kolei w Indiach, gdzie powierzchnia uprawy rzepaku i gorczycy wynosi około 6 mln ha, a plon nasion tych gatunków jest bardzo niski (średnio 0,9 t·ha<sup>-1</sup>), zastosowanie siarki w dawce 40 kg S·ha<sup>-1</sup> spowodowało jego przyrost średnio o 30% (Haneklaus i in. 1999).

W badaniach własnych dla plonu nasion gorczycy wykazano istotne współdziałanie między sposobem aplikacji siarki a jej dawką. Zwraca uwagę znacznie wyższy jego przyrost po nawożeniu dawką 60 kg S·ha<sup>-1</sup> w porównaniu z obiektem kontrolnym w warunkach dogłębowego zastosowania siarki (średnio o 23,3%) niż po aplikacji dolistnej (o 15,0%) (tab. 4).

Na pozytywny efekt plonotwórczy siarki stosowanej w agrotechnice gatunków z rodziny *Brassicaceae*, zwłaszcza rzepaku, wskazują wyniki wielu doświadczeń wazonowych i polowych (Goźliński 1970b, Aulakh i in. 1980, Ahmad i in. 1999, Krauze i Bowszys 2000, Boreczek 2001, Budzyński i Jankowski 2001, Kaczor i Brodowska 2003, Szulc i in. 2003, Szulc 2008). Nie brakuje jednak badań, które nie potwierdzają dodatniego oddziaływania siarki na plonowanie kapustowatych (Rotkiewicz i in. 1996, Wielebski i Wójtowicz 2003, Filipek-Mazur i in. 2006, Kulczycki 2007).

Wyraźnie pozytywna reakcja plonu roślin z rodziny *Brassicaceae* na nawożenie siarką w warunkach jej niedoboru wynika prawdopodobnie nie tylko z bardzo wysokich ich wymagań względem tego składnika, ale również jest konsekwencją wykazanej dla rzepaku przez Vonga i in. (2002) (za Podleśną 2004) wyjątkowej zdolności pobierania siarki dzięki specyficznym wydzielinom korzeniowym. Stymulują one zarówno zasiedlenie ryzosfery przez odpowiednią mikroflorę, jak i aktywność enzymu arylosulfatazy, przez co wpływają na sprawniejszą mineralizację siarki organicznej. Ta właściwość, zdaniem autorów, umożliwia rzepakowi pobranie z obiektu kontrolnego do 50 kg S·ha<sup>-1</sup>.

Należy podkreślić, że pozytywna reakcja badanych gatunków roślin na zastosowane nawożenie siarką w badaniach własnych wynikała nie tylko ze stosunkowo dużych wymagań pokarmowych badanych gatunków roślin odnośnie tego składnika, ale i z postępującego niedoboru siarki w regionie, w którym prowadzono badania. Kierując się kryteriami przyjętymi przez Lipińskiego i in. (2003) można uznać, że gleba, na której prowadzono doświadczenie polowe, charakteryzowała się niską zawartością przyswajalnej formy tego składnika (w zależności od poletka: 6,5-12,2 mg S-SO<sub>4</sub>·kg<sup>-1</sup>, średnio 9,4 mg S-SO<sub>4</sub>·kg<sup>-1</sup>, tab. 1). Także zawartość siarki ogółem (254-264 mg S·kg<sup>-1</sup>, średnio 259 mg S·kg<sup>-1</sup>) była

stosunkowo niska w porównaniu z danymi przytaczanymi przez Motowicką-Terelak i Terelaka (1998) dla gleb pływych ( $60\text{-}1360 \text{ mg S}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

Biorąc pod uwagę omówione warunki glebowe, wydaje się, że optymalną dawką siarki dla jęczmienia jarego jest  $35\text{-}40 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ , dla łubinu –  $40 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ , a dla gorczycy – około  $60 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ , przy uwzględnieniu odpowiedniego poziomu nawożenia azotem (oprócz łubinu). W przeprowadzonym doświadczeniu zastosowano  $105 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$  pod jęczmień jary i  $130 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$  pod gorczycę, co pozwala sądzić, że zalecany stosunek ilościowy azotu i siarki w postaci nawozów wynosiłby dla jęczmienia jarego około 3:1, a dla gorczycy – 2:1.

### 5.1.3. WPLYW WARUNKÓW HYDROTHERMICZNYCH

Zwraca uwagę duże zróżnicowanie plonów testowanych gatunków roślin w poszczególnych latach prowadzenia doświadczenia polowego (rys. 8, 10, 12). Najwyższą wartość współczynnika zmienności wykazano dla plonu nasion łubinu ( $V\% = 30,1$ , rys. 10). Znacznie niższe jego wartości charakteryzowały plony ziarna jęczmienia jarego ( $V\% = 14,3$ , rys. 8) oraz nasion gorczycy ( $V\% = 14,7$ , rys. 12).

Najkorzystniejsze warunki termiczno-pogodowe dla wegetacji roślin (wielkość i rozkład opadów oraz temperatur) panowały w latach 2004 i 2005, w których uzyskano wyraźnie wyższe plony nasion niż w pozostałych (rys. 8, 10, 12). Różnice między średnimi plonami w latach skrajnie różniących się pod tym względem dla poszczególnych gatunków roślin wynosiły odpowiednio: dla ziarna jęczmienia jarego –  $1,83 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  (40,0%), dla nasion łubinu –  $1,38 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  (79,8%), a dla nasion gorczycy –  $1,14 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  (60,6%). Z kolei rok 2006 charakteryzował się niekorzystnym rozkładem temperatur i opadów w okresie wegetacji, co potwierdza analiza klimatogramów (rys. 6) oraz wartości współczynników Sielianinowa (tab. 3). Wystąpiła susza, skutkująca przyspieszoną wegetacją i szybkim przechodzeniem roślin do fazy generatywnej. Konsekwencją tego stanu były niższe plony nasion wszystkich badanych gatunków (rys. 8, 10, 12).

Warto podkreślić, że badania polowe prowadzono w rejonie o znacznie niższych w stosunku do średniej krajowej opadach, wynoszących około 600 mm (Budzyński i Jankowski 2001). Na podstawie dużych różnic między średnimi plonami w poszczególnych latach badań można sądzić, że żaden z badanych czynników w takim stopniu nie oddziaływał na ich wielkość, jak układ parametrów wilgotnościowo-termicznych. Ilość i rozkład opadów oraz temperatur prawdopodobnie decydowały o wykorzystaniu potencjalnych możliwości produkcyjnych roślin oraz o plonotwórczym wpływie badanych czynników agrotechnicznych. Zdaniem Kalembasy i Godlewskiej (2004), temperatura i wilgotność gleby są najważniejszymi czynnikami wpływającymi na zachodzące w niej procesy immobilizacji i mineralizacji. Można więc sądzić, że warunki hydrotermiczne wpływały na aktywność bakterii siarkowych (*Thiobacillus*), oddziałując na intensywność mikrobiologicznych przemian siarki, a także determinując jej dostępność dla roślin. Trudno jednak wskazać jeden rok, w którym oddziaływanie dawki siarki na plon ziarna i nasion każdego z badanych gatunków byłoby

najkorzystniejsze. Pod wpływem dawki  $40 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$  największy przyrost plonu ziarna jęczmienia jarego w porównaniu z obiektem kontrolnym wystąpił w roku 2006 (o 13,4%) (rys. 8), nasion łubinu i gorczycy – w 2005 roku (odpowiednie różnice – 23,0% i 15,0%) (rys. 10 i 12). Należy podkreślić, że sezony wegetacyjne w każdym z tych lat cechowała stosunkowo niska ilość opadów (tab. 2), a analiza klimatogramów (rys. 6) wykazała, że w 2005 roku wystąpiła półsusza, a w 2006 roku – susza. Uzyskane wyniki korespondują z badaniami Szulca (2008), według którego reakcja plonu roślin na nawożenie siarką była tym silniejsza, im warunki pogodowe były mniej sprzyjające wegetacji. Warto nadmienić, że w przypadku łubinu i gorczycy stosunkowo najslabsze plonotwórcze oddziaływanie siarki stwierdzono w 2004 roku, w którym uzyskano najwyższe plony nasion tych gatunków (rys. 10 i 12).

## 5.2. ZWIĄZKI AZOTU W PLONIE BADANYCH GATUNKÓW ROŚLIN

### 5.2.1. ZAWARTOŚĆ AZOTU OGÓLNEGO I BIAŁKOWEGO

Ziarno jęczmienia jarego cechowała znacznie niższa średnia zawartość azotu ogólnego i białkowego ( $16,0$  i  $14,2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) niż nasiona pozostałych badanych gatunków roślin (tab. 6 i 7). W nasionach łubinu wąskolistnego oraz gorczycy białej zawartości obydwu form azotu były zbliżone i wynosiły odpowiednio:  $48,9$  i  $49,0$  oraz  $39,5$  i  $36,5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Zawartość białka w nasionach gatunków z rodziny *Fabaceae* (bobowate) waha się w szerokich granicach: od 14% u niektórych odmian fasoli do 40% w nasionach soi i łubinu (Gawęcki 2003). Gatunki te, wobec niewielkiego udziału w areale, dostarczają w skali światowej tylko około 18% białka, natomiast rośliny zbożowe o wyraźnie niższej zawartości tego składnika mają znacznie wyższy, wynoszący około 2/3, udział w jego globalnej produkcji. W Polsce białko gatunków roślin z rodziny *Fabaceae* stanowi zaledwie nieco ponad 1% ogólnej ilości produkowanego białka (Prusiński i Kotecki 2006).

Zwraca uwagę wysoka, znacznie wyższa niż w nasionach rzepaku (Schnug i in. 1993, Lośak i Richter 2003), zawartość obydwu form azotu w nasionach gorczycy (tab. 6 i 7). Możliwość wykorzystania tego składnika, który pozostaje po ekstrakcji oleju w śrucie, jest jednak limitowana przez związki o charakterze antyżywniowym, występujące w nasionach gorczycy. Zaliczają się do nich produkty enzymatycznej hydrolizy glukozyolanów, a także włókno i fityniany (Paszkiwicz-Jasińska 2005).

Sposób stosowania siarki miał istotne znaczenie tylko dla kumulacji azotu białkowego w nasionach gorczycy (tab. 6 i 7). Wykazano, podobnie jak w badaniach Podleśnej (2006) nad rzepakiem ozimym, że dogłębowe zastosowanie tego składnika podwyższa zawartość azotu białkowego w porównaniu z aplikacją dolistną średnio o 1,3%.

Tabela 6. Zawartość azotu ogólnego [g·kg<sup>-1</sup>] w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach lufki i gorczycy – średnie z lat badań  
 Table 6. Content of total nitrogen [g·kg<sup>-1</sup>] in spring barley grain and lupin and mustard seeds – means for the experiment years

Dawka – Dose [kg S·ha <sup>-1</sup> ] (III)	Sposób aplikacji – Application method										Forma – Form (II)		Średnia Mean
	(I)					doglebowe nawożenie – soil fertiliser					Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
	dolistne nawożenie – foliar fertiliser		średnia – mean			Siarkol		Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>					
Jęczmień jary – Spring barley													
0	15,7	15,7	15,7	15,6	15,7	15,6	15,7	15,6	15,6	15,6	15,6	15,7	15,65
20	16,1	16,0	16,0	15,8	16,0	15,8	16,0	15,9	15,9	15,9	15,9	16,0	15,98
40	16,2	16,1	16,1	16,0	16,2	16,0	16,2	16,1	16,1	16,1	16,1	16,2	16,14
60	16,4	16,4	16,4	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2	16,3	16,28
Średnia – Mean	16,1	16,1	16,1	15,9	16,0	15,9	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,01
NIR <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 0,23; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.													
Łubin wąskolistny – Narrow-leaf lupin													
0	48,0	48,2	48,1	48,0	48,0	48,0	48,0	48,0	48,0	48,0	48,0	48,1	48,03
20	49,1	48,6	48,8	48,8	48,4	48,8	48,4	48,6	48,9	48,9	48,9	48,5	48,72
40	49,6	49,0	49,3	49,2	48,9	49,2	48,9	49,1	49,4	49,4	49,4	49,0	49,18
60	50,1	48,9	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,8	49,8	49,8	49,2	49,51
Średnia – Mean	49,2	48,7	48,9	48,9	48,9	48,9	48,7	48,8	49,0	49,0	49,0	48,7	48,86
NIR <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – 0,34; III – 0,62; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.													
Gorczyca biała – White mustard													
0	48,6	48,3	48,5	48,5	48,3	48,5	48,3	48,4	48,5	48,5	48,5	48,3	48,42
20	48,9	48,8	48,8	48,7	49,3	48,7	49,3	49,0	48,8	48,8	48,8	49,1	48,91
40	49,5	48,9	49,2	49,1	48,9	49,1	48,9	49,0	49,3	49,3	49,3	48,9	49,10
60	49,7	49,6	49,7	49,4	49,7	49,4	49,7	49,6	49,6	49,6	49,6	49,7	49,62
Średnia – Mean	49,2	48,9	49,0	48,9	49,1	48,9	49,1	49,0	49,1	49,1	49,1	49,0	49,01
NIR <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 0,43; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.													

n.i. – n.s. – różnice nieistotne – non-significant differences



Tabela 7. Zawartość azotu białkowego [g·kg<sup>-1</sup>] w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorczycy – średnie z lat badań  
 Table 7. Content of protein nitrogen [g·kg<sup>-1</sup>] in spring barley grain and lupin and mustard seeds – means for the experiment years

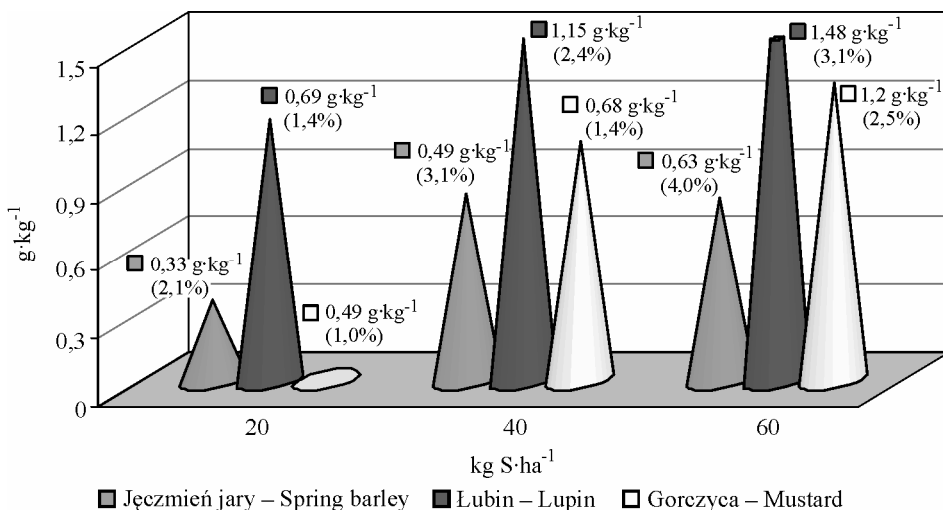
Dawka – Dose [kg S·ha <sup>-1</sup> ] (III)	Sposób aplikacji – Application method										Forma – Form (II)		Średnia Mean
	(I)					(I)					Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
	dolistne nawożenie – foliar fertiliser		doglebowe nawożenie – soil fertiliser			Siarkol		Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>					
Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>			
Jęczmień jary – Spring barley													
0	13,8	13,7	13,8	13,6	13,8	13,7	13,8	13,7	13,7	13,8	13,8	13,7	13,7
20	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1
40	14,2	14,3	14,3	15,1	14,6	14,8	14,6	14,7	14,7	14,4	14,4	14,6	14,6
60	14,7	14,1	14,4	14,9	14,4	14,7	14,4	14,8	14,8	14,3	14,3	14,5	14,5
Średnia – Mean	14,2	14,1	14,1	14,4	14,2	14,3	14,3	14,3	14,3	14,1	14,1	14,2	14,2
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – 0,15; III – 0,29; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – 0,37; III × I – 0,42; II × III – 0,31; III × II – 0,41; I × II × III – n.i.–n.s.													
Łubin wąskolistny – Narrow-leaf lupin													
0	38,4	38,1	38,2	38,4	38,5	38,5	38,4	38,5	38,4	38,4	38,3	38,4	38,4
20	39,4	36,2	39,3	39,4	40,2	39,8	39,4	40,2	39,4	39,4	39,7	39,5	39,5
40	39,9	39,3	39,6	40,2	40,2	40,2	40,2	40,2	40,1	40,1	39,8	39,1	39,1
60	40,7	39,2	40,0	40,4	40,4	40,4	40,4	40,4	40,6	40,6	39,8	40,2	40,2
Średnia – Mean	39,6	38,9	39,3	39,6	39,8	39,7	39,6	39,8	39,6	39,6	39,4	39,5	39,5
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – 0,19; III – 0,50; I × II – 0,86; II × I – 0,31; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.													
Gorczyca biała – White mustard													
0	35,9	35,6	35,8	35,9	36,0	35,9	35,9	36,0	35,9	35,9	35,8	35,9	35,9
20	36,5	35,6	36,0	35,9	36,9	36,4	35,9	36,9	36,2	36,2	36,2	36,2	36,2
40	36,8	36,0	36,4	37,1	37,6	37,4	37,1	37,6	37,0	37,0	36,8	36,9	36,9
60	36,8	37,2	37,0	37,1	37,6	37,3	37,1	37,6	36,9	36,9	37,4	37,2	37,2
Średnia – Mean	36,5	37,1	36,3	36,5	37,0	36,8	36,5	37,0	36,5	36,5	36,6	36,5	36,5
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – 0,39; II – n.i.–n.s.; III – 0,64; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.													

n.i. – n.s. – różnice nieistotne – non-significant differences

Wydaje się, że słabszy efekt dolistnego stosowania siarki może wynikać z niewielkiej ruchliwości jonu siarczanowego(VI). W warunkach niedoboru siarki glebowej, składnik ten po dolistnym zastosowaniu jest wbudowywany w połączenia organiczne, natomiast jego nadmiar przemieszcza się do wakuoli, skąd ponowna retranslokacja do protoplazmy komórki jest niewielka (Kopcewicz i Lewak 2005).

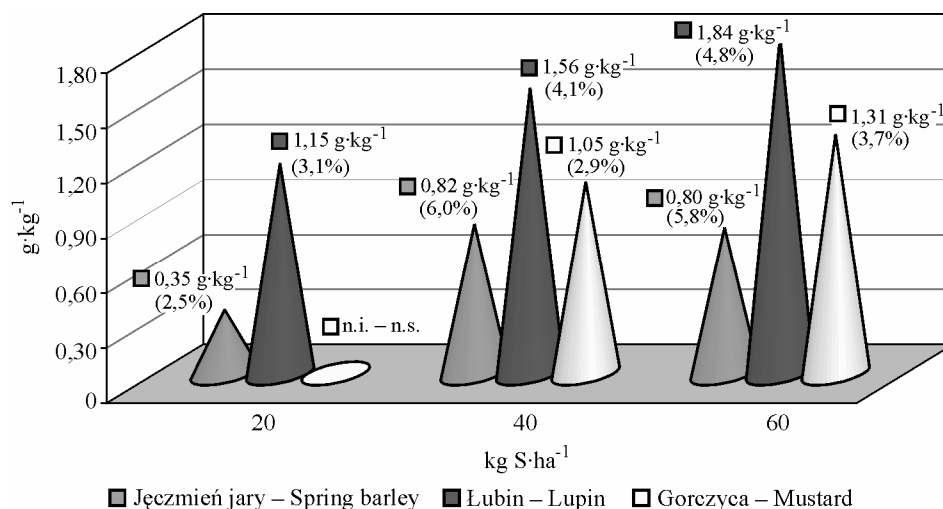
Badana forma siarki miała istotne znaczenie dla kształtowania zawartości azotu ogólnego i białkowego w nasionach łubinu oraz azotu białkowego w ziarnie jęczmienia jarego (tab. 6 i 7). Wykazano, podobnie jak inni autorzy (Brodowska 2004, Klikocka 2004a, Kulczycki 2007), na ogół nieco wyższą zawartość tego składnika na obiektach nawożonych siarką elementarną w stosunku do obiektów, na których zastosowano  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , lecz różnice nie zawsze były uodnienne statystycznie.

Czynnikiem, który istotnie determinował zawartość azotu ogólnego i białkowego w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorczycy, była dawka siarki. Najwyższe przyrosty ogólnej zawartości azotu i jego formy białkowej w stosunku do obiektu kontrolnego stwierdzano zwykle pod wpływem dawki  $60 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ , jednak między poziomami  $40$  i  $60 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$  na ogół nie było istotnych różnic. Zwraca uwagę fakt, że największy przyrost obydwu form azotu pod wpływem zastosowanego nawożenia siarką wykazano z reguły w ziarnie jęczmienia jarego, mimo że bezwzględna zawartość każdej z jego form była znacznie niższa w porównaniu z ich zawartością w nasionach łubinu i gorczycy (rys. 14 i 15).



Rys. 14. Przyrosty zawartości azotu ogólnego w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorczycy pod wpływem zastosowanych dawek siarki w porównaniu z obiektem kontrolnym

Fig. 14. Increase in the content of total nitrogen in spring barley grain and lupin and mustard seed depending on the sulphur doses applied as compared with the control



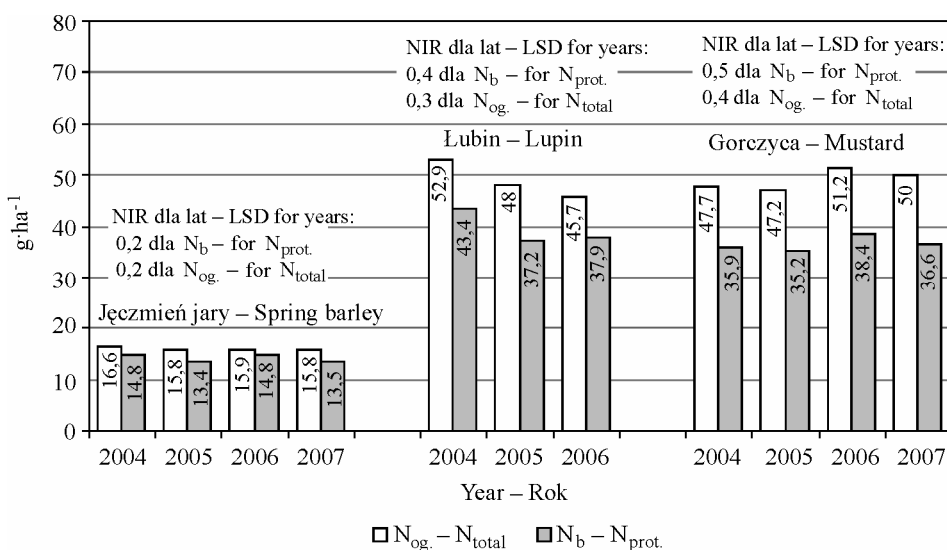
Rys. 15. Przyrosty zawartości azotu białkowego w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorczycy pod wpływem zastosowanych dawek siarki w porównaniu z obiektem kontrolnym

Fig. 15. Increase in the content of protein nitrogen in the spring barley grain and lupin and mustard seeds depending on the sulphur doses applied as compared with the control

Wielu autorów odnotowało pozytywny wpływ aplikacji siarki na syntezę białka ziarna zbóż (Zhao i in. 1997b, Inal i in. 2003, Kaczor i Łaszczyńska 2003, Brodowska 2004, Klikocka 2004b, Potarzycki 2004a, Podleśna i Cacak-Pietrzak 2006), a także nasion innych gatunków roślin uprawnych (Goźliński 1970b, Aulakh i in. 1980, Brown i in. 2000, Brodowska 2004, Klikocka 2004a, Podleśna 2004).

Zależność między dobrym zaopatrzeniem gatunków z rodziny *Fabaceae* (bobu, peluszek) w siarkę a zwiększeniem zawartości białka zarówno w ich częściach wegetatywnych, jak i w nasionach, znalazła potwierdzenie m.in. w badaniach Goźlińskiego (1970b). Ganeshamurthy i Reddy (2000) wykazali, że zastosowanie siarki w agrotechnice soi oraz grochu siewnego skutkowało zwiększeniem liczby i masy brodawek na korzeniach roślin, intensyfikując proces biologicznej redukcji azotu cząsteczkowego, a tym samym – syntezę białka. Zależność tę tłumaczy obecność siarki w nitrogenazie i ferrodoksynie, enzymach odgrywających kluczową rolę w tym procesie (Kopcewicz i Lewak 2005). Ich aktywność jest warunkowana odpowiednim układem przestrzennym, utrzymywanym przez te enzymy dzięki mostkom siarczkowym tworzonym przez grupy disulfidowe aminokwasów siarkowych. Niektórzy autorzy sygnalizują jednak brak wyraźnego oddziaływania nawożenia siarką na zawartość białka, np. w badaniach dotyczących seradeli (Uziak i Szymańska 1987), pszenicy ozimej i jarej (Wieser i in. 2004, Podleśna i Cacak-Pietrzak 2006), gorczycy (Goźliński 1970a), rzepaku ozimego (Asare i Scarisbrick 1995, McGrath i Zhao 1996, Lośak i in. 2000).

W badaniach własnych warunki hydrotermiczne najbardziej sprzyjające kumulacji obydwu badanych form azotu w ziarnie jęczmienia jarego i nasionach łubinu wystąpiły w roku 2004 (rys. 16), w którym od połowy maja do połowy czerwca odnotowano stosunkowo niskie opady. Zgodnie z wynikami badań Kukuły i in. (1999), ich niedobór w tej fazie wegetacji sprzyja wyższej zawartości białka.



Rys. 16. Zawartość azotu ogólnego i białkowego w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorczycy w poszczególnych latach badań

Fig. 16. Content of total and protein nitrogen in spring barley grain and lupin and mustard seeds in respective years of study

Wydaje się, że zawartość białka w ziarnie jęczmienia jarego jest kształtowana w znacznej mierze przez warunki wilgotnościowe siedliska, zwłaszcza w okresie przed kłoszeniem. W nasionach gorczycy natomiast najwyższą zawartość azotu ogólnego i białkowego stwierdzono w roku 2006, do czego mogły przyczynić się znacznie wyższe temperatury od średnich wieloletnich w dwóch ostatnich dekadach czerwca oraz w lipcu (różnice w stosunku do wielolecia dla drugiej połowy czerwca – 3,1°C, dla lipca – 4,5°C), a także utrzymujące się w tym okresie niskie opady (obniżenie w porównaniu z wielolecie dla czerwca – 32,2 mm, dla lipca – 46,0 mm) (tab. 2).

Najmniej korzystne warunki do kumulacji, zwłaszcza azotu białkowego, w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorczycy wystąpiły w roku 2005. Na dużą zmienność zawartości białka w plonach roślin w zależności od czynników pogodowych zwraca uwagę Paszkiewicz-Jasińska (2005) w badaniach nad rolą siarki w agrotechnice gorczycy, natomiast Klikocka (2004a) podkreśla znacznie większe znaczenie czynnika pogodowego od formy i dawki siarki w kształtowaniu zawartości białka w ziemniaku.

### 5.2.2. UDZIAŁ AZOTU BIAŁKOWEGO W AZOCIE OGÓLNYM

Miarą wydajności syntezy białka roślinnego jest wyrażony w procentach udział zawartości azotu białkowego w azocie ogólnym. Konsekwencją przedstawionych zmian zawartości azotu białkowego i ogólnego w nasionach roślin uprawianych w warunkach zróżnicowanego nawożenia siarką były zmiany proporcji tych form azotu. Największy udział azotu białkowego w jego ogólnej zawartości stwierdzono w ziarnie jęczmienia jarego (średnio 88,6%), niższe wartości charakteryzowały nasiona łubinu (80,8%) i gorczycy (74,5%) (tab. 8).

Udział azotu białkowego w azocie ogólnym w nasionach łubinu i gorczycy był istotnie determinowany sposobem aplikacji siarki (tab. 8). Wykazano, że stosowanie dogłębowe tego składnika na ogół bardziej sprzyjało wzrostowi wartości tej wielkości, czyli tym samym przemianie związków azotowych w białko, niż jego dolistna aplikacja.

W odróżnieniu od badań Brodowskiej (2004) nad formami jarymi pszenicy i rzepaku oraz Kilkockiej (2004b) nad ziemniakiem, które wykazały korzystniejsze oddziaływanie siarki elementarnej w stosunku do jonowej, w badaniach własnych dla żadnego z badanych gatunków roślin, w żadnym z sezonów wegetacyjnych, nie potwierdzono istotnego wpływu formy siarki na wartość omawianego stosunku.

W przeciwieństwie do czynników I i II wykazano, podobnie jak w badaniach Wielebskiego i Muśnickiego (1998), Kaczora i Łaszcz-Zakorczennej (2003) oraz Brodowskiej (2004), duży wpływ dawki siarki na kształtowanie udziału formy białkowej azotu w azocie ogólnym w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorczycy. W nasionach łubinu udział ten w stosunku do obiektów bez siarki istotnie wzrastał już po zastosowaniu  $20 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ , a dla ziarna jęczmienia jarego i nasion gorczycy statystycznie potwierdzoną różnicę wykazano dopiero pod wpływem dawki  $40 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Aplikacja najwyższej dawki –  $60 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$  nie powodowała istotnych zmian w porównaniu z dawką  $40 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

Wykazane istotne zwiększenie udziału azotu białkowego w ogólnej jego zawartości po zastosowaniu siarki wskazuje na nasilenie syntezy białka wraz ze zwiększaniem zaopatrzenia roślin w ten składnik, potwierdzając jego ważną rolę w metabolizmie azotu. Można sądzić, że gospodarka azotem w roślinie, tj. pobranie i wykorzystanie tego składnika bez względu na badany gatunek, była ściśle uzależniona od obecności siarki w środowisku.

### 5.2.3. PLON BIAŁKA OGÓLNEGO

Dla nasion łubinu i gorczycy uzyskano wyższe średnie plony białka ogólnego (plon nasion  $\times N_{\text{og}} \times 6,25$ ), (odpowiednio  $796,4$  i  $718,8 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) niż dla ziarna jęczmienia jarego ( $553,5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) (tab. 9), pomimo że plon ziarna jęczmienia był znacznie wyższy niż plon nasion pozostałych gatunków (tab. 4). O takiej relacji ilościowej przesądziła znacząco wyższa zawartość azotu ogólnego w nasionach łubinu i gorczycy niż w ziarnie jęczmienia (tab. 6).

Tabela 8. Udział azotu białkowego w azocie ogólnym [%] w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach lubinu i gorczycy – średnie z lat badań  
 Table 8. Share of protein nitrogen in total nitrogen [%] in spring barley grain and lupin and mustard seeds – means for the experiment years

Dawka – Dose [kg S·ha <sup>-1</sup> ] (III)	Sposób aplikacji – Application method										Forma – Form (II)		Średnia Mean
	(I)					(I)					Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
	dolistne nawożenie – foliar fertiliser		doglebowe nawożenie – soil fertiliser			Siarkol		Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>					
	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean	średnia – mean	średnia – mean	średnia – mean	średnia – mean	średnia – mean	średnia – mean	średnia – mean	średnia – mean	średnia – mean	średnia – mean
Jęczmień jary – Spring barley													
0	88,0	87,3	87,7	87,4	88,1	87,8	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7
20	87,7	87,8	87,8	89,0	88,0	88,4	88,0	88,3	88,3	87,9	87,9	88,1	88,1
40	88,1	88,6	88,3	94,2	88,1	91,2	88,3	91,2	88,3	88,3	88,3	89,8	89,8
60	89,5	86,2	87,9	89,6	89,3	89,4	89,6	89,6	87,7	87,7	87,7	88,7	88,7
Średnia – Mean	88,3	87,5	87,9	90,0	88,4	88,2	89,2	89,2	87,9	87,9	88,6	88,6	88,6
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 1,4; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.													
Lubin wąskolistny – Narrow-leaf lupin													
0	80,0	79,1	80,5	80,0	80,2	79,6	80,0	80,0	79,4	79,4	79,7	79,7	79,7
20	80,3	80,6	80,5	80,8	82,9	81,8	80,6	81,8	81,8	81,8	81,1	81,1	81,1
40	80,5	80,3	80,4	81,7	82,2	82,0	81,1	81,1	81,3	81,3	81,2	81,2	81,2
60	81,2	80,2	80,7	81,6	81,7	81,7	81,4	81,4	80,9	80,9	81,2	81,2	81,2
Średnia – Mean	80,5	80,2	80,3	81,1	81,8	81,4	80,8	81,3	81,3	80,8	80,8	80,8	80,8
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – 0,8; II – n.i.–n.s.; III – 1,0; I × II – 0,9; II × I – 0,7; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.													
Gorczyca biała – White mustard													
0	73,8	74,2	74,3	74,2	74,5	74,3	74,0	74,3	74,3	74,3	74,1	74,1	74,1
20	74,6	72,9	73,7	73,7	74,8	74,2	74,1	74,1	73,9	73,9	74,0	74,0	74,0
40	74,4	73,7	74,1	75,6	76,9	76,2	75,0	75,0	75,3	75,3	75,2	75,2	75,2
60	74,0	74,9	74,4	74,1	75,6	75,3	74,4	74,4	75,3	75,3	74,9	74,9	74,9
Średnia – Mean	74,2	73,9	74,1	74,6	75,5	75,0	74,4	74,4	74,7	74,7	74,5	74,5	74,5
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – 0,9; II – n.i.–n.s.; III – 1,1; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.													

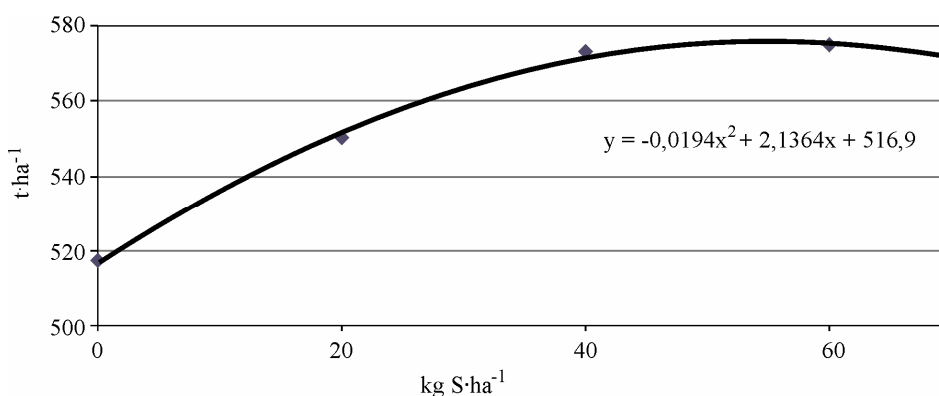
n.i. – n.s. – różnice nieistotne – non-significant differences

Tabela 9. Plon białka ogólnego [kg·ha<sup>-1</sup>] – średnie z lat badań  
 Table 9. Total protein yield [kg·ha<sup>-1</sup>] – means for the experiment years

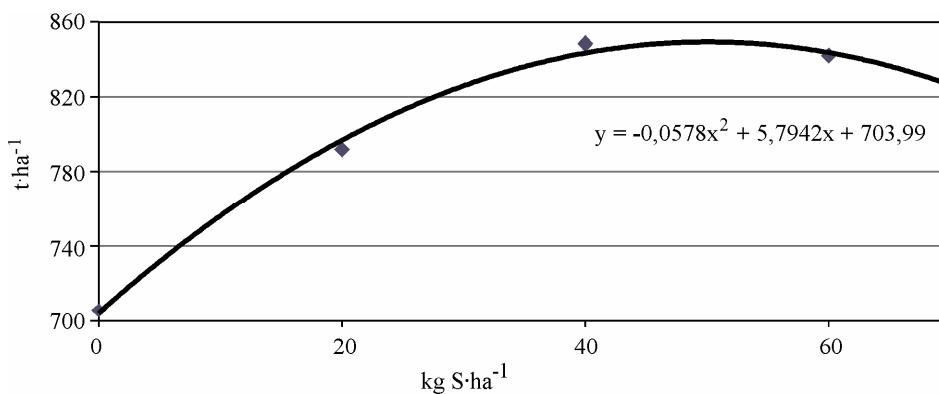
Dawka – Dose [kg S·ha <sup>-1</sup> ] (III)	Sposób aplikacji – Application method										Forma – Form (II)		Średnia Mean
	(I)					(II)					Średnia – mean	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
	dolistne nawożenie – foliar fertiliser		doglebowe nawożenie – soil fertiliser			Siarkol		Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>					
	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Średnia – mean	
	Jęczmień jary – Spring barley												
0	508,6	513,2	510,9	524,6	524,6	524,6	516,8	518,4	517,6				
20	538,7	545,7	542,2	547,4	570,1	558,8	542,6	557,0	549,8				
40	557,2	568,5	562,9	571,1	592,4	581,8	563,9	581,1	572,5				
60	558,3	577,7	568,0	577,4	585,2	581,3	566,7	581,0	573,9				
Średnia – Mean	540,7	551,3	546,0	555,1	568,1	561,6	547,5	559,4	553,5				
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> :	I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 23,3; I × II – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × I × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.												
	Łubin wąskolistny – Narrow-leaf lupin												
0	710,4	698,2	704,3	711,4	707,9	709,7	710,9	703,1	707,0				
20	764,1	761,8	763,0	813,8	823,5	818,7	789,0	791,2	790,1				
40	864,9	881,6	873,3	811,6	807,5	809,6	836,7	856,8	846,8				
60	836,5	841,6	839,1	838,9	853,0	846,0	837,8	845,3	841,6				
Średnia – Mean	794,0	795,8	795,0	793,9	798,0	796,0	793,6	799,1	796,4				
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> :	I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 52,5; I × II – n.i.–n.s.; II × III – 13,5; III × I – 11,4; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.												
	Gorczyca biała – White mustard												
0	650,3	646,0	648,2	657,2	646,1	651,7	653,8	646,0	649,9				
20	653,8	704,4	679,1	690,6	730,3	710,5	670,7	717,4	694,1				
40	745,6	760,7	753,2	733,7	736,6	735,2	739,7	748,7	744,2				
60	761,6	763,1	762,4	799,7	823,2	811,5	780,7	793,2	787,0				
Średnia – Mean	702,8	718,6	710,7	720,3	734,1	727,2	711,2	726,3	718,8				
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> :	I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 37,1; I × II – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × I × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.												

n.i. – n.s. – różnice nieistotne – non-significant differences

Jedynym czynnikiem, który istotnie dodatnio oddziaływał na plon białka ogólnego ziarna jęczmienia oraz nasion łubinu i gorczycy, była dawka siarki. Stosowanie siarki już na poziomie 20 kg na ha powodowało na ogół potwierdzone statystycznie zwiększenie omawianego plonu. Dla ziarna jęczmienia jarego i nasion łubinu modelem regresji najlepiej przedstawiającym zależność pomiędzy nawożeniem siarką a plonem białka ogólnego jest funkcja kwadratowa ( $p \leq 0,05$ ) (rys. 17 i 18).



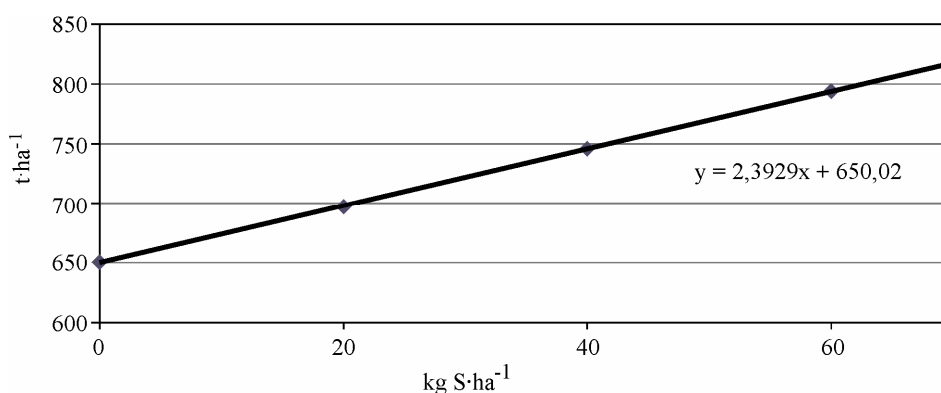
Rys. 17. Zależność plonu białka ogólnego ziarna jęczmienia jarego od dawki siarki  
Fig. 17. Total protein yield of spring barley grain depending on the sulphur dose applied



Rys. 18. Zależność plonu białka ogólnego nasion łubinu wąskolistnego od dawki siarki  
Fig. 18. Total protein yield in narrow-leaf lupin seeds depending on the sulphur dose applied

Obliczone dawki, dla których funkcje osiągają swoje najwyższe wartości (extremum), wynosiły: dla plonu ziarna jęczmienia jarego – 55,1 kg S·ha<sup>-1</sup>, dla plonu nasion łubinu – 50,1 kg S·ha<sup>-1</sup>. Dla nasion gorczycy omawiana zależność miała charakter liniowy (rys. 19), a dawka 60 kg S·ha<sup>-1</sup> powodowała w porównaniu z dawką 40 kg S·ha<sup>-1</sup> istotne zwiększenie plonu białka (rys. 17, 18, 19).





Rys. 19. Zależność plonu białka ogólnego nasion gorczyicy białej od dawki siarki

Fig. 19. Total protein yield in white mustard seeds depending on the sulphur dose applied

#### 5.2.4. SKŁAD FRAKCYJNY BIAŁKA

Analizą frakcyjną objęto wyłącznie ziarno jęczmienia jarego z uwagi na przeznaczenie paszowe tego gatunku i dużą rolę jakości białka w ocenie wartości odżywczej ziarna zbóż. Największy udział w ogólnej zawartości azotu ziarna jęczmienia jarego wykazano dla azotu glutelin (45,7%) (tab. 10, rys. 20). Stwierdzono także znacznie niższy udział azotu prolamin (18,3%) i globulin (15,4%), a najniższy – albumin (6,6%). Interpretacja składu frakcyjnego białka opiera się na założeniu, że albuminy i globuliny mają znacznie korzystniejszy skład aminokwasowy niż prolaminy i gluteliny (Barczak i Nowak 1995), są one jednak gorzej od nich przyswajalne (Jones i in. 1982).

Średni udział azotu oznaczonych białek strukturalnych i enzymatycznych, czyli sumy azotu albumin i globulin, w zawartości azotu białkowego ziarna jęczmienia jarego kształtował się na poziomie 20,0%, a azotu białek zapasowych (sumy prolamin i glutelin) – 62,4%. Ilościowa proporcja azotu białek funkcjonalnych do azotu zapasowych wynosiła więc około 1:3. Warto podkreślić, że wartość tego stosunku dla ziarna pszenicy i pszenżyta przyjmuje zbliżone wartości, a dla kukurydzy, a zwłaszcza ryżu, jest znacząco szersza (Gawęcki 2003), co biorąc pod uwagę skład aminokwasowy poszczególnych frakcji (Barczak i Nowak 1995), dowodzi wyraźnie niższej wartości biologicznej białka tych gatunków zbóż w porównaniu z białkiem jęczmienia jarego.

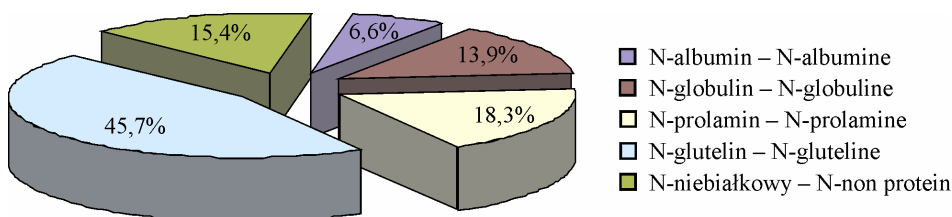
Tabela 10. Zawartość azotu frakcji białkowych [g·kg<sup>-1</sup>] w ziarnie jęczmienia jarego – średnie z lat badań  
 Table 10. Content of protein fraction nitrogen [g·kg<sup>-1</sup>] in spring barley grain – means for the experiment years

Dawka – Dose [kg S·ha <sup>-1</sup> ] (III)	Sposób aplikacji – Application method										Forma – Form (II)		Średnia Mean
	(I)					(I)					Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
	dolistne nawożenie – foliar fertiliser		doglebowe nawożenie – soil fertiliser		średnia – mean		Siarkol		Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>				
Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean	4	5	6	7	8	9	10				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
N-albumin – N-albumine													
0	0,84	0,84	0,84	0,90	0,89	0,90	0,87	0,86	0,87				
20	0,85	0,87	0,86	0,95	0,95	0,95	0,90	0,91	0,91				
40	0,94	0,94	0,94	1,00	1,07	0,99	0,93	1,01	0,97				
60	0,93	0,93	0,93	0,98	0,98	0,98	0,95	0,95	0,95				
Średnia – Mean	0,89	0,90	0,89	0,93	0,97	0,95	0,91	0,93	0,92				
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 0,08; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.													
N-globulin – N-globuline													
0	1,73	1,77	1,75	1,75	1,78	1,76	1,74	1,77	1,76				
20	1,89	1,76	1,82	2,03	2,02	2,03	1,96	1,89	1,93				
40	1,93	1,92	1,93	1,97	2,14	2,05	1,95	2,03	1,99				
60	1,96	1,87	1,91	2,01	2,14	2,08	1,99	2,00	1,99				
Średnia – Mean	1,88	1,83	1,85	1,94	2,02	1,98	1,91	1,92	1,92				
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – 0,09; II – n.i.–n.s.; III – 0,12; I × II – 0,10; II × I – 0,06; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.													

cd. tabeli 10 – Table 10 continued

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N-prolamin – N-prolamine									
0	2,54	2,48	2,51	2,50	2,57	2,54	2,52	2,52	2,52
20	2,56	2,37	2,47	2,55	2,33	2,44	2,56	2,35	2,45
40	2,69	2,39	2,54	2,44	2,47	2,46	2,57	2,42	2,50
60	2,78	2,60	2,69	2,77	2,64	2,70	2,78	2,62	2,70
Średnia – Mean	2,64	2,46	2,55	2,56	2,50	2,54	2,61	2,48	2,54
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> :	I – n.i.–n.s.; II – 0,03; III – 0,09; I × II – 0,05; II × I – 0,06; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – 0,09; III × II – 0,13; I × II × III – n.i.–n.s.								
N-glutelin – N-gluteline									
0	6,64	6,63	6,63	6,61	6,59	6,60	6,62	6,61	6,62
20	6,70	6,30	6,50	6,50	6,45	6,48	6,60	6,38	6,49
40	6,26	6,02	6,14	6,01	5,96	5,98	6,13	5,99	6,06
60	6,34	6,12	6,23	6,08	6,29	6,19	6,21	6,21	6,21
Średnia – Mean	6,48	6,27	6,38	6,30	6,32	6,31	6,39	6,30	6,34
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> :	I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 0,20; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.								
N-niebiałkowy – N-non protein									
0	2,36	2,35	2,36	2,34	2,33	2,34	2,35	2,34	2,35
20	2,07	1,96	2,02	2,29	2,17	2,23	2,18	2,06	2,12
40	2,17	2,09	2,13	2,02	1,97	2,00	2,10	2,03	2,06
60	2,05	2,03	2,04	2,00	1,95	1,97	2,03	1,99	2,02
Średnia – Mean	2,16	2,11	2,14	2,17	2,11	2,13	2,16	2,11	2,14
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> :	I – n.i.–n.s.; II – 0,04; III – 0,19; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.								

n.i. – n.s. – różnice nieistotne – non-significant differences



Rys. 20. Skład frakcyjny białka ziarna jęczmienia jarego  
Fig. 20. Spring barley grain protein fraction composition

#### 5.2.4.1. Zawartość N-albumin i N-globulin

Sposób aplikacji siarki miał istotne znaczenie tylko dla kształtowania zawartości azotu globulin (tab. 10). Wyższej kumulacji tej frakcji sprzyjało dogłębne zastosowanie siarki; średnio dla czterech lat badań różnica w stosunku do aplikacji dolistnej wynosiła  $0,13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  (7,0%). Wprowadzenie omawianego składnika do gleby oddziaływało korzystniej na biosyntezę albumin niż dolistne stosowanie siarki, omawiane różnice nie były jednak potwierdzone statystycznie. Na korzystniejsze oddziaływanie dogłębowego nawożenia azotem na skład frakcyjny białka ziarna pszenicy ozimej w porównaniu z dolistnym dokarmianiem wskazują także wyniki badań Domskiej (1996).

Spośród badanych czynników największy wpływ na skład frakcyjny białka ziarna jęczmienia jarego wywierała dawka siarki. W wyniku jej zastosowania najbardziej – w stosunku do zawartości azotu pozostałych frakcji – zwiększyła się zawartość N-globulin (różnica po nawożeniu dawką  $40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  w porównaniu z obiektem kontrolnym wynosiła średnio 13,1%). Wynika to prawdopodobnie z faktu, że frakcja globulin w ziarnie zbóż wyróżnia się wyjątkowo dużą liczbą grup hydrosulfidowych (-SH) i disulfidowych (-S-S-) (Gawęcki 2003). Wiąże się to z enzymatycznym charakterem wielu globulin, których aktywność jest warunkowana odpowiednim układem przestrzennym, utrzymywanym dzięki mostkom disiarczkowym tworzonym przez grupy -SH aminokwasów siarkowych.

#### 5.2.4.2. Zawartość N-prolamin i N-glutelin

Nawożenie siarką skutkowało niewielkim, lecz statystycznie istotnym przyrostem zawartości N-prolamin (tab. 10). Charakterystyczne jest, że aplikacja  $20 \text{ kg S} \cdot \text{kg}^{-1}$  powodowała na ogół nieznaczne obniżenie zawartości tej frakcji w stosunku do obiektu kontrolnego, średnio dla czterech lat badań – o  $0,07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  (2,8%), natomiast dawka  $60 \text{ kg S} \cdot \text{kg}^{-1}$  – jej zwiększenie, średnio o  $0,18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  (7,1%). Dodatnia reakcja prolamin na nawożenie siarką znajduje potwierdzenie w badaniach dotyczących glutenu różnych gatunków zbóż, którego głównym komponentem, obok glutelin, są prolaminy (Haneklaus i in. 1992, Hrivna i in. 1999, Zhao i in. 1999b, Podleśna i in. 2003, Cacak-Pietrzak i in. 2004). Grupy -SH aminokwasów siarkowych obecnych w białkach glutenu tworzą wiązania międzypeptydowe odpowiedzialne, obok wiązań wodorowych, za III-rzędową strukturę białka. Wewnętrzne wiązania -S-S- pełnią funkcję stabilizacji

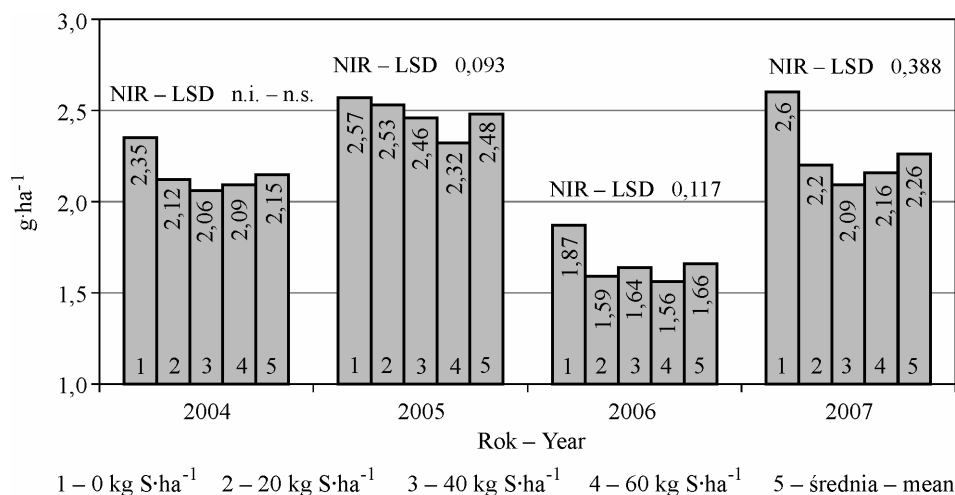
zującą w  $\alpha$ -,  $\beta$ - i  $\gamma$ -prolaminach białka ziarna pszenicy (gliadynach) oraz w niskocząsteczkowych podjednostkach glutelin, natomiast nie są obecne w  $\omega$ -gliadynach, które mają całkowicie odmienny skład aminokwasowy i stanowią tylko 10-20% ogólnej ilości prolamin (Zhao i in. 1999a). W obrębie  $\alpha$ -gliadyn zidentyfikowano  $\alpha_1$ -gliadynę, charakteryzującą się wysoką zawartością cystyny (6,4%), o dziewięciu wiązaniach disulfidowych -S-S- w cząsteczce. Przypuszcza się, że obecność tej gliadyny jest m.in. odpowiedzialna za wysoką jakość glutenu. Zdaniem Zhao i in. (1999a), nawożenie siarką ma duży wpływ na skład białek zapasowych w nasionach, ale stosunkowo niewielki na ich ogólną zawartość.

Zastosowanie siarki w dawce 40 kg S·ha<sup>-1</sup> spowodowało rozszerzenie proporcji pomiędzy zawartością N-albumin i N-globulin a N-prolamin, a zwłaszcza sumą N-prolamin i N-glutelin. Ilościowa relacja pomiędzy azotem białek konstytucyjnych a zapasowych średnio dla kolejnych dawek siarki wynosiła: 0,29:1 (obiekt kontrolny), 0,32:1 (20 kg S·ha<sup>-1</sup>), 0,35:1 (40 kg S·ha<sup>-1</sup>), 0,33:1 (60 kg S·ha<sup>-1</sup>). Biorąc pod uwagę skład aminokwasowy poszczególnych frakcji (Barczak i Nowak 1995) i ich rolę w metabolizmie jęczmienia (Kopcewicz i Lewak 2005), można sądzić, że kierunek zmian omawianego stosunku pod wpływem nawożenia siarką wskazuje na korzystne zmiany wartości odżywczej białka ziarna jęczmienia jarego.

O ile zawartość N-albumin, N-globulin i N-prolamin w ziarnie jęczmienia jarego na ogół wzrastała po zastosowaniu siarki, tak w przypadku N-glutelin dawki: 40 i 60 kg S·ha<sup>-1</sup> powodowały istotne obniżenie zawartości tej frakcji w porównaniu z obiektem kontrolnym; odpowiednie różnice średnio dla czterech lat wynosiły: 0,56 g·kg<sup>-1</sup> (8,5%) i 0,41 g·kg<sup>-1</sup> (6,2%) (tab. 10). Na zmiany proporcji pomiędzy frakcjami białek glutenowych w ziarnie pszenicy uprawianej w warunkach zróżnicowanego zaopatrzenia w siarkę wskazują badania Zhao i in. (1999a, b). Najbardziej zauważalną reakcją białka pszenicy na niedobór siarki była wzmożona synteza  $\omega$ -prolamin, a także zmiana proporcji między niski- i wysokocząsteczkowymi podjednostkami glutelin. Warto wspomnieć, że u niektórych osób występuje brak tolerancji na obecność glutenu w diecie, a zwłaszcza jego rozpuszczalnej w alkoholu frakcji – prolamin (gliadyn w pszenicy, hordein w jęczmieniu, sekaliny w życie, aweniny w owsie) (Jabłoński 2000). Ta niekontrolowana reakcja układu immunologicznego (limfocytów T) przeciwko glutenowi powoduje zaburzenia jego wchłaniania i może skutkować chorobą trzewną, zwaną celiakią.

#### 5.2.4.3. Zawartość N-niebiałkowego

Analiza frakcyjna objęła izolowanie nie tylko frakcji *stricte* białkowych, ale również pozwoliła wyekstrahować azotowe związki niebiałkowe, w skład których wchodzi wolne aminokwasy, amidy i mineralne formy azotu (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> i N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). W przeprowadzonych badaniach średnia zawartość azotu związków niebiałkowych w ziarnie jęczmienia jarego wahała się w zależności od roku w granicach od 1,66 do 2,48 g·kg<sup>-1</sup> (rys. 21).



Rys. 21. Zawartość azotu niebiałkowego w ziarnie jęczmienia jarego w zależności od dawki siarki

Fig. 21. Content of non-protein nitrogen in spring barley grain depending on the sulphur dose applied

Zwraca uwagę fakt, że w roku 2006, w którym udział azotu niebiałkowego w ziarnie jęczmienia jarego był najniższy (średnio  $1,66 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) (rys. 21), zawartość azotu białkowego była najwyższa ( $14,80 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) (rys. 16). Z kolei w latach 2005 i 2007, w których ziarno posiadało niższą zawartość azotu białkowego ( $13,40$  i  $13,50 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), udział jego formy niebiałkowej był wyraźnie wyższy (odpowiednio  $2,48$  i  $2,26 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

Wyrażony w liczbach względnych udział azotu niebiałkowego w zawartości azotu ogólnego dla kolejnych lat kształtował się następująco: w 2004 r. – 13,0%, w 2005 r. – 15,7%, w 2006 r. – 10,4% i w 2007 r. – 14,3% (rys. 16 i 21). Zwraca uwagę niska wartość proporcji w roku 2006, w którym w czerwcu i lipcu wystąpiła susza (tab. 2, rys. 6). Można sądzić, że zgodnie z wynikami badań Szulca i in. (2001) oraz Nowaka i in. (2005), niedobór wody i wysoka temperatura sprzyjały kumulacji białka; spowodowało to zachwianie proporcji między niebiałkowymi i białkowymi formami azotu.

O relacji ilościowej między białkowymi i niebiałkowymi związkami azotowymi w ziarnie decyduje, oprócz czynników pogodowych, zaopatrzenie roślin w składniki pokarmowe niezbędne do biosyntezy białka, wśród których największe znaczenie mają azot i siarka. Wiele badań potwierdza ich współdziałanie w kształtowaniu zawartości białka roślin zbożowych (Goźliński 1970b, Byers i Bolton 1979, Griffiths i in. 1995, Phillips i Mullins 2004, Podleśna i Cacak-Pietrzak 2006, Przygocka-Cyna i Grzebisz 2006). W roślinach niedostatecznie zaopatrzonych w siarkę, w których synteza białka jest ograniczona w wyniku obniżenia zawartości aminokwasów siarkowych, głównie cysteiny i metioniny, gromadzi się azot niebiałkowy, przede wszystkim amidowy, a także aminowy

i mineralny (Murphy 1990, Pyś i Pucek 1993, McGrath i Zhao 1996, Marska i Wróbel 2000, Scherer 2001). Akumulacja mineralnych form azotu jest wynikiem zmniejszenia intensywności redukcji azotanów(V), spowodowanego zaburzeniami w funkcjonowaniu enzymów, zwłaszcza zawierających wiązanie Fe-S – nitrogenazy i reduktazy azotanowej (Gawęcki 2003). W warunkach niedoboru siarki wykorzystanie amoniaku do syntezy aminokwasów jest ograniczone, a nadmiar jonów  $\text{NH}_4^+$  jest związany w postaci glutaminy i asparaginy (Kopcewicz i Lewak 2005). Nagromadzony w komórkach azot amidowy nie może być jednak użyty do biosyntezy białka, bowiem przy niedoborze siarki ulega zaburzeniu przebieg fotosyntezy z uwagi na zbyt małą ilość ferrodoksyny, biologicznego przenośnika elektronów (Marska i Wróbel 2000). Wyniki badań Goźlińskiego (1970a), a także Pysia i Pucka (1993) wskazują, że w warunkach intensywnego nawożenia azotem przy jednoczesnym deficycie siarki, niebiałkowe formy tego składnika mogą stanowić nawet ponad 50% jego ogólnej zawartości. Zakłócenie fotosyntezy i obniżenie w konsekwencji zawartości białka niekorzystnie wpływają na wartość paszową plonu, jak również na jego wartość konsumpcyjną i technologiczną.

Czynnikiem w największym stopniu decydującym o zawartości azotu niebiałkowego w ziarnie jęczmienia jarego była dawka siarki. Wykazano istotny jej wpływ w każdym z lat badań, oprócz roku 2004 (rys. 21). Wraz ze wzrostem dawki obserwowano na ogół obniżanie się zawartości azotu niebiałkowego. Różnice w porównaniu z obiektem kontrolnym w kolejnych latach po zastosowaniu dawki  $40 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$  wynosiły w  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  odpowiednio: 0,29 (12,3%), 0,11 (4,3%), 0,23 (12,3%), 0,51 (19,6%) (tab. 10). Zwiększenie dawki do  $60 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$  w porównaniu z dawką  $40 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ , nie miało na ogół istotnego znaczenia. Podobny kierunek zmian zawartości omawianej frakcji wykazały badania Barczak (1995) nad wpływem intensywnego nawożenia azotem na jakość białka jęczmienia ozimego.

Dodatkowo wykazano, że zastosowanie siarki pierwiastkowej nieco bardziej sprzyjało kumulacji azotowych związków niebiałkowych niż jej formy jonowej (tab. 10).

### 5.2.5. ZAWARTOŚĆ AZOTU AZOTANOWEGO(V)

Jedną z ważnych składowych azotowych związków niebiałkowych są azotany(V). W nasionach gorczyicy wykazano niższą średnią zawartość  $\text{N}\cdot\text{NO}_3^-$  ( $171,1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) w porównaniu z nasionami łubinu ( $205,5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) (tab. 11). Nie zamieszczono wyników zawartości tej formy azotu w ziarnie jęczmienia jarego z uwagi na fakt, że oznaczone wartości były znikome.

W nasionach łubinu stwierdzono istotnie wyższą zawartość azotu azotanowego(V) po dolistnej aplikacji siarki niż po zastosowaniu doglebowym tego składnika (tab. 11).

Tabela 11. Zawartość N – NO<sub>3</sub><sup>-</sup> [mg·kg<sup>-1</sup>] w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorczycy – średnie z lat badań  
 Table 11. Contents N – NO<sub>3</sub><sup>-</sup> [mg·kg<sup>-1</sup>] in spring barley grain and lupin and mustard seed – means for the experiment years

Dawka – Dose [kg S·ha <sup>-1</sup> ] (III)	Sposób aplikacji – Application method										Forma – Form (II)		Średnia Mean
	(I)					(I)					Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
	dolistne nawożenie – foliar fertilisation		doglebowe nawożenie – soil fertilisation		średnia – mean		Siarkol		Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>				
0	211,5	218,7	215,1	210,1	213,2	211,7	210,8	216,0	213,4				
20	203,4	225,6	214,5	186,8	207,1	197,0	195,1	216,4	205,8				
40	202,4	215,5	208,9	182,1	200,3	191,2	192,3	207,9	200,1				
60	201,1	211,6	206,3	187,6	211,7	199,7	194,3	211,7	203,0				
Średnia – Mean	204,6	217,9	211,2	191,7	208,1	199,9	198,1	213,0	205,5				
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – 6,8; II – 4,4; III – 7,7; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; II × II – n.i.–n.s.; I × III – 9,4; III × I – 11,1; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.													
Gorczyca biała – White mustard													
0	182,7	174,3	178,5	180,1	180,0	180,1	181,4	177,1	179,3				
20	166,8	168,9	167,9	180,3	166,6	173,4	173,5	167,8	170,7				
40	161,7	166,0	163,9	171,5	178,3	174,9	166,6	172,1	169,4				
60	170,3	157,3	163,8	179,8	152,7	166,2	175,0	155,0	165,0				
Średnia – Mean	170,4	166,6	168,5	177,9	169,4	173,6	174,1	168,0	171,1				
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – 4,6; III – 8,4; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; III × II – 12,4; I × II × III – n.i.–n.s.													

n.i. – n.s. – różnice nieistotne – non-significant differences



Forma siarki istotnie kształtowała zawartość N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> w nasionach obydwu gatunków roślin. W przypadku łubinu zastosowanie Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sprzyjało wyższej kumulacji azotu azotanowego(V) (różnica w porównaniu z Siarkolem – 7,5%), a u gorczycy, podobnie jak w badaniach nad rzepakiem jarym i pszenicą jara (Kaczor i Brodowska 2002) – wyższą zawartość N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> uzyskiwano po aplikacji formy pierwiastkowej (różnica wynosiła średnio 3,6%).

Dawka siarki okazała się czynnikiem w największym stopniu determinującym zawartość N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> w nasionach testowanych roślin. Wzrastające dawki tego składnika, podobnie jak w badaniach Filipek-Mazur i in. (2006) dotyczących gorczycy białej, Murphy'ego (1990) – użytków zielonych oraz Smatanowej i in. (2004) i Lośka (2005) – warzyw, na ogół obniżały zawartości azotu azotanowego(V). Średnio dla obu sposobów aplikacji i form siarki zastosowanie 40 kg S·ha<sup>-1</sup> powodowało obniżenie zawartości tej formy azotu w nasionach łubinu o 13,3 mg·kg<sup>-1</sup> (6,2%) w stosunku do obiektu kontrolnego, natomiast nawożenie gorczycy 60 kg S·ha<sup>-1</sup> – o 14,3 mg·kg<sup>-1</sup> (8,0%). Omówiony kierunek zmian zawartości azotu azotanowego(V) dowodzi, że nawożenie siarką wpływało korzystnie na wartość odżywczą plonu roślin. Znajduje to potwierdzenie w badaniach Kozłowskiej (2000) nad rzepakiem jarym, które wykazały, że zastosowanie tego składnika obniżało w biomacie roślin względny udział azotu azotanowego(V) w sumie pozostałych anionów nieorganicznych (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), jak też w porównaniu z udziałem innych form tego składnika (białkowej, amidowej, aminowej). Z wynikami badań Kozłowskiej (2000) korespondują dane publikowane przez McGratha i Zhao (1996), dotyczące rzepaku ozimego uprawianego w warunkach niedoboru siarki, w liściach którego stwierdzono wysoką kumulację azotu azotanowego(V). Wpływ siarki na zawartość N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> zależy również od dostępności potasu w glebie, stymulującego syntezę reduktazy azotanowej(V) niezbędnej do przemiany formy azotanowej(V) w amidową (Kaczor i Łaszcz-Zakorczenienna 2003).

Należy podkreślić, że nadmierna kumulacja azotanów(V), towarzysząca niedoborowi siarki, obniża wartość biologiczną plonów. Szkodliwość tej formy azotu wynika m.in. z możliwości redukcji do azotanów(III) w przewodzie pokarmowym człowieka i zwierząt oraz wywoływania methemoglobinemii, skutkującej zaburzeniami procesu wewnątrzkomórkowego oddychania, a także tworzeniem się muta- i kancerogennych nitrozoamin (Kopcewicz i Lewak 2005).

#### **5.2.6. SKŁAD AMINOKWASOWY BIAŁKA**

Nawożenie siarką, oddziałując na metabolizm związków azotu, różnicowało skład aminokwasowy białka testowanych gatunków roślin. Przejawiało się to zmianami zawartości poszczególnych aminokwasów i wpływało na relacje ilościowe pomiędzy sumami aminokwasów egzo- i endogennych. Należy podkreślić, że badania podejmujące tę problematykę są nieliczne, opierają się z reguły na doświadczeniach wazonowych i często ograniczają się wyłącznie do aminokwasów siarkowych (Hrivna i in. 1999, Eriksen i Mortensen 2002, Sator i in. 2002, Smatanova i in. 2004).

Białko nasion gorczycy zawierało większą ilość aminokwasów egzogennych niż jęczmienia jarego i łubinu (tab. 12). Stosunek zawartości aminokwasów egzogennych do endogennych był wyraźnie wyższy w białku nasion gorczycy niż w białku pozostałych badanych gatunków.

Tabela 12. Suma zawartości aminokwasów egzo- i endogennych [ $\text{g} \cdot 16\text{g N}^{-1}$ ] oraz wartość ich stosunku ilościowego – średnie z lat badań

Table 12. Total content of exogenous and endogenous amino acids [ $\text{g} \cdot 16\text{g N}^{-1}$ ] and the value of their quantitative ratio – means for the experiment years

Gatunek rośliny Species of plant	Suma aminokwasów – Total amino acids		Wartości stosunku sum aminokwasów Value of the ratio of total amino acids
	egzogennych exogenous	endogennych endogenous	
Jęczmień jary Spring barley	38,90	41,81	0,93:1
Łubin Narrow-leaf lupin	38,89	40,13	0,97:1
Gorczyca biała White mustard	41,92	40,63	1,03:1

Nie stwierdzono istotnego wpływu sposobu stosowania i formy siarki na kształtowanie składu aminokwasowego białka ziarna jęczmienia jarego. Sposób aplikacji tego pierwiastka modyfikował istotnie jedynie zawartość metioniny, alaniny i seryny w nasionach łubinu oraz leucyny i kwasu glutaminowego w nasionach gorczycy (tab. 13).

Tabela 13. Zawartość wybranych aminokwasów [ $\text{g} \cdot 16\text{g N}^{-1}$ ] w zależności od sposobu aplikacji siarki – średnie z lat badań

Table 13. Content of selected amino acids [ $\text{g} \cdot 16\text{g N}^{-1}$ ] depending on the sulphur application method – means for the experiment years

Aminokwas Amino acid	Sposób aplikacji – Application method		Średnia Mean	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>
	dolistne nawożenie foliar fertiliser	doglebowe nawożenie soil fertiliser		
Łubin wąskolistny – Narrow-leaf lupin				
Metionina Methionine	1,55	1,69	1,62	0,12
Alanina Alanine	3,49	3,37	3,43	0,03
Seryna Serine	3,69	3,51	3,60	0,04
Gorczyca biała – White mustard				
Leucyna Leucine	7,51	7,33	7,42	0,14
Kwas glutaminowy Glutamic acid	17,47	17,10	17,28	0,23

Aplikacja dolistna siarki sprzyjała na ogół wyższej zawartości aminokwasów. Wyjątek stanowiła metionina w nasionach łubinu, której zawartość dla obiektów nawożonych doglebowo siarką była istotnie wyższa (średnio o 9,0%) w stosunku do obiektów o jej dolistnej aplikacji.

Forma siarki miała statystycznie udowodnione znaczenie tylko w kształtowaniu zawartości glicyny w nasionach łubinu oraz fenyloalaniny w nasionach gorczycy (tab. 14). Na zawartość glicyny korzystniej oddziaływała elementarna forma siarki niż jej postać jonowa, natomiast w przypadku fenyloalaniny zależność ta kształtowała się odwrotnie.

Tabela 14. Zawartość wybranych aminokwasów [ $\text{g} \cdot 16\text{g N}^{-1}$ ] w zależności od formy siarki – średnie z lat badań

Table 14. Content of selected amino acids [ $\text{g} \cdot 16\text{g N}^{-1}$ ] depending on the sulphur form – mean for the experiment years

Aminokwas Amino acid	Forma – Form		Średnia Mean	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>
	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		
Łubin wąskolistny – Narrow-leaf lupin				
Glicyna Glycine	3,37	3,24	3,31	0,06
Gorczyca biała – White mustard				
Fenyloalanina Phenylalanine	4,92	4,97	4,95	0,04

Dawka siarki istotnie decydowała o wartościach sum aminokwasów egzogennej w ziarnie jęczmienia jarego i nasionach gorczycy (tab. 15-17). Wykazano, że pod wpływem dawki  $40 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$  różnice wartości tych sum w porównaniu z obiektem kontrolnym wynosiły średnio w  $\text{g} \cdot 16 \text{ g N}^{-1}$  dla ziarna jęczmienia jarego: 1,53 (4,0%) i 1,51 (3,7%), a dla nasion gorczycy w wyniku zastosowania  $60 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$ : 1,92 (4,7%) i 1,64 (4,1%). Ich wzrost był konsekwencją istotnego zwiększania się w białku zawartości wielu aminokwasów. W wyniku zastosowania siarki w białku nasion wszystkich badanych gatunków roślin wykazano statystycznie potwierdzony wzrost zawartości metioniny, która – będąc jedynym wśród oznaczanych aminokwasów związkiem zawierającym siarkę – ulegała największym ilościowym zmianom w wyniku nawożenia tym składnikiem.

Wzrost zawartości metioniny w ziarnie jęczmienia jarego pod wpływem dawki  $40 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$  wynosił  $0,32 \text{ g} \cdot 16\text{g N}^{-1}$  (22,2%) (tab. 15), w nasionach łubinu –  $0,22 \text{ g} \cdot 16\text{g N}^{-1}$  (14,5%) (tab. 16), a gorczycy –  $0,15 \text{ g} \cdot 16\text{g N}^{-1}$  (7,1%) (tab. 17). Kierunek tych zmian potwierdza wyniki badań prowadzonych nad innymi gatunkami roślin przez Hrivnę i in. (1999), Eriksena i Mortensena (2002), Smatanovą i in. (2004). Sator i in. (2002) stwierdzili wzrost zawartości siarki aminokwasowej w białku łubinu żółtego, a Eriksen i Mortensen (2002) wykazali w warunkach niedoboru tego składnika wyraźne obniżenie zawartości metioniny i cysteiny w białku jęczmienia. Według autorów, aplikacja siarki, nawet w późnym stadium wegetacji (faza kwitnienia), zapobiega ich redukcji.

Tabela 15. Skład aminokwasowy białka ziarna jęczmienia jarego [g·16g N<sup>-1</sup>] w zależności od dawek siarki – średnie z lat badańTable 15. Amino acid composition of spring barley grain protein [g·16g N<sup>-1</sup>] depending on the sulphur doses – means for the experiment years

Aminokwas Amino acid	Dawki siarki – Sulphur doses [kg S·ha <sup>-1</sup> ]				Średnia Mean	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>
	0	20	40	60		
Arginina Arginine	5,44	5,65	5,42	5,41	5,48	n.i.–n.s.
Fenylalanina Phenylalanine	4,62	4,93	4,88	4,94	4,84	0,25
Histydyna Histidine	2,72	2,57	2,59	2,57	2,61	0,14
Izoleucyna Isoleucine	3,66	3,76	3,90	3,85	3,79	0,08
Leucyna Leucine	7,09	7,56	7,63	7,54	7,46	0,50
Lizyna Lysine	3,96	4,13	4,19	4,16	4,11	0,21
Metionina Methionine	1,44	1,68	1,76	1,75	1,66	0,12
Treonina Threonine	3,63	3,72	3,68	3,58	3,65	n.i.–n.s.
Walina Valine	5,22	5,36	5,26	5,34	5,30	n.i.–n.s.
Suma aminokwasów egzogennych Total exogenous amino acids	37,78	39,46	39,31	39,14	38,90	0,84
Alanina Alanine	3,47	3,51	3,42	3,47	3,47	n.i.–n.s.
Glicyna Glycine	3,26	3,57	3,47	3,44	3,44	0,21
Kwas asparaginowy Aspartic acid	6,85	6,94	6,94	6,95	6,92	n.i.–n.s.
Kwas glutaminowy Glutamic acid	20,92	21,90	21,82	21,87	21,63	0,83
Seryna Serine	4,06	4,27	4,29	4,22	4,21	0,20
Tyrozyna Tyrosine	2,02	2,17	2,15	2,21	2,14	0,19
Suma aminokwasów endogennych Total endogenous amino acids	40,58	42,36	42,09	42,16	41,81	1,10

n.i. – n.s. – różnice nieistotne – non-significant differences

Tabela 16. Skład aminokwasowy białka nasion łubinu [ $\text{g}\cdot 16\text{g N}^{-1}$ ] w zależności od dawek siarki – średnie z lat badań

Table 16. Amino acid composition of lupin seed protein [ $\text{g}\cdot 16\text{g N}^{-1}$ ] depending on the sulphur doses – means for the experiment years

Aminokwas Amino acid	Dawki siarki – Sulphur doses [ $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ ]				Średnia Mean	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>
	0	20	40	60		
Arginina Arginine	5,35	5,44	5,38	5,42	5,40	n.i.–n.s.
Fenylalanina Phenylalanine	4,82	4,97	4,95	5,01	4,94	n.i.–n.s.
Histydyna Histidine	2,89	2,86	2,87	2,88	2,88	n.i.–n.s.
Izoleucyna Isoleucine	4,20	4,28	4,27	4,26	4,25	n.i.–n.s.
Leucyna Leucine	6,38	6,64	6,63	6,70	6,59	0,26
Lizyna Lysine	5,16	5,36	5,41	5,23	5,29	n.i.–n.s.
Metionina Methionine	1,52	1,53	1,74	1,70	1,62	0,21
Treonina Threonine	3,29	3,32	3,32	3,33	3,32	n.i.–n.s.
Walina Valine	4,56	4,70	4,62	4,56	4,61	n.i.–n.s.
Suma aminokwasów egzogennych Total exogenous amino acids	38,17	39,10	39,19	39,09	38,90	n.i.–n.s.
Alanina Alanine	3,40	3,46	3,42	3,44	3,43	n.i.–n.s.
Glicyna Glycine	3,28	3,32	3,36	3,26	3,31	n.i.–n.s.
Kwas asparaginowy Aspartic acid	9,96	10,06	9,95	9,89	9,97	n.i.–n.s.
Kwas glutaminowy Glutamic acid	17,11	17,35	17,06	17,18	17,17	n.i.–n.s.
Seryna Serine	3,52	3,70	3,58	3,61	3,60	n.i.–n.s.
Tyrozyna Tyrosine	2,64	2,71	2,59	2,66	2,65	n.i.–n.s.
Suma aminokwasów endogennych Total endogenous amino acids	39,91	40,60	39,96	40,04	40,13	n.i.–n.s.

n.i. – n.s. – różnice nieistotne – non-significant differences

Tabela 17. Skład aminokwasowy białka nasion gorczycy [g·16g N<sup>-1</sup>] w zależności od dawek siarki – średnie z lat badańTable 17. Amino acid composition of mustard seed protein [g·16g N<sup>-1</sup>] depending on the sulphur doses – means for the experiment years

Aminokwas Amino acid	Dawki siarki – Sulphur doses [kg S·ha <sup>-1</sup> ]				Średnia Mean	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>
	0	20	40	60		
Arginina Arginine	5,53	5,82	5,82	5,88	5,76	0,28
Fenylalanina Phenylalanine	4,85	5,04	4,98	4,92	4,95	n.i.–n.s.
Histydyna Histidine	2,62	2,82	2,87	2,85	2,79	0,13
Lizyna Lysine	5,07	5,39	5,38	5,45	5,32	0,35
Metionina Methionine	2,10	2,23	2,25	2,33	2,23	0,19
Treonina Threonine	3,96	4,06	4,02	3,92	3,99	n.i.–n.s.
Izoleucyna Isoleucine	4,10	4,27	4,28	4,30	4,24	n.i.–n.s.
Leucyna Leucine	7,22	7,45	7,49	7,51	7,42	n.i.–n.s.
Walina Valine	5,08	5,24	5,30	5,29	5,22	0,15
Suma aminokwasów egzogennych Total exogenous amino acids	40,53	42,32	42,39	42,45	41,92	1,71
Alanina Alanine	4,12	4,24	4,30	4,33	4,25	0,20
Glicyna Glycine	4,29	4,41	4,36	4,32	4,35	n.i.–n.s.
Kwas asparaginowy Aspartic acid	8,59	8,67	8,79	8,80	8,71	n.i.–n.s.
Kwas glutaminowy Glutamic acid	16,75	17,27	17,47	17,64	17,28	0,76
Seryna Serine	3,41	3,60	3,65	3,57	3,56	0,17
Tyrozyna Tyrosine	2,38	2,50	2,53	2,52	2,48	0,12
Suma aminokwasów endogennych Total endogenous amino acids	39,54	40,69	41,10	41,18	40,63	0,21

n.i. – n.s. – różnice nieistotne – non-significant differences

Byers i Bolton 1979, Eriksen i Mortensen 2002, Smatanova i in. 2004, na ogół są zgodni co do tego, że dodatnie oddziaływanie nawożenia siarką na zawartość metioniny w białku zwiększa się wraz ze wzrostem zastosowanych dawek azotu, gdyż wysoka podaż obydwu składników zapewnia roślinom optymalne warunki do syntezy tego aminokwasu.

Pod wpływem dawki 40 kg S·ha<sup>-1</sup> w białku ziarna jęczmienia jarego i nasion gorzycy wykazano istotny (o 4,3%) przyrost w stosunku do obiektu kontrolnego zawartości kwasu glutaminowego oraz seryny, odpowiednio o: 5,7% i 7,0% (tab. 13 i 15). Po zastosowaniu 40 kg S·ha<sup>-1</sup> w białku ziarna jęczmienia jarego stwierdzono również istotny przyrost zawartości fenyloalaniny (o 5,6%), izoleucyny (o 6,6%), leucyny (o 7,6%), lizyny (o 5,8%) w porównaniu z obiektem nienawożonym. Nawożenie dawką 60 kg S·ha<sup>-1</sup> powodowało natomiast zwiększenie zawartości fenyloalaniny (o 6,9%), izoleucyny (o 5,2%), kwasu glutaminowego (o 4,5%) i tyrozyny (o 9,4%). W gorzycy odnotowano statystycznie potwierdzone zwiększenie udziału argininy (o 6,3%), leucyny (o 4,0%), waliny (o 4,1%) i alaniny (o 5,1%) po zastosowaniu 60 kg S·ha<sup>-1</sup>. Jedynym aminokwasem, którego zawartość w białku jęczmienia jarego w wyniku zastosowania siarki istotnie obniżała się, była histydyna (różnice dla dawek 40 i 60 kg S·ha<sup>-1</sup> w porównaniu z obiektem kontrolnym wynosiły odpowiednio: 4,8 i 5,5%) (tab. 13). Zwiększenie zawartości większości aminokwasów w białku ziarna pszenicy jarej pod wpływem nawożenia siarką wykazano również w badaniach Byersa i Boltona (1979), którzy stwierdzili ponadto po zastosowaniu wyższych dawek tego składnika rozszerzanie się ilościowej proporcji cysteiny do metioniny.

Nawożenie siarką najsilniej oddziaływało na zawartość aminokwasów w białku ziarna jęczmienia jarego, a w dalszej kolejności – nasion gorzycy. Skład aminokwasowy białka nasion łubinu w warunkach zróżnicowanego nawożenia siarką okazał się najbardziej stabilny – wzrastające dawki tego składnika powodowały istotne zmiany tylko zawartości metioniny i leucyny. Niewątpliwie reakcja łubinu na siarkę była związana ze specyficznym metabolizmem azotowym tego gatunku.

Zmiany składu aminokwasowego białka w wyniku zastosowania siarki można tłumaczyć zmianami proporcji poszczególnych jego frakcji. Badania składu frakcyjnego białka jęczmienia jarego wykazały (tab. 10), że wzrost jego zawartości w ziarnie spowodowany był przede wszystkim zwiększeniem udziału białek zarodka i warstwy aleuronowej, czyli albumin i globulin. Są to frakcje bogate w aminokwasy egzogenne, w szczególności w lizynę, metioninę, leucynę, walinę i argininę (Barczak i Nowak 1995). W znacznie mniejszym stopniu pod wpływem nawożenia siarką zwiększała się zawartość prolamin, frakcji ubogich w aminokwasy egzogenne, a zwłaszcza w lizynę.

Założeniem chemicznej metody oceny wartości odżywczej białka jest porównanie jego składu aminokwasowego ze składem białka wzorcowego, które teoretycznie powinno w pełni pokrywać zapotrzebowanie danego organizmu na ten składnik. Opierając się na tych przesłankach obliczono wartości wskaźników uwzględniających zawartość aminokwasów egzogennych. Jednym z nich

jest wskaźnik aminokwasu ograniczającego – CS (*Chemical Score*) (Mitchell i Block 1946), który wyraża stosunek zawartości aminokwasu w badanym białku do zawartości danego aminokwasu w białku jaja kurzego, uważanym za wzorcowe, o optymalnej wartości odżywczej. Analiza wartości wskaźników CS wykazała, że pierwszym aminokwasem ograniczającym u wszystkich badanych gatunków roślin była zawierająca siarkę metionina (tab. 18). Dowodzi to niezbędności tego pierwiastka w procesie biosyntezy białka nasion badanych gatunków, a tym samym jego bardzo ważnej roli w kształtowaniu ilości i jakości białka roślinnego.

Tabela 18. Wartości wskaźników aminokwasów egzogennych [%] dla białka ziarna jęczmienia jarego oraz nasion łubinu i gorczycy – średnie z lat badań  
Table 18. Values of exogenous amino acid indices [%] of spring barley grain protein and lupin and mustard seed protein – means for the experiment years

Wskaźnik aminokwasu ograniczającego Chemical score	Dawki siarki – Sulphur doses [kg S·ha <sup>-1</sup> ]				Średnia Mean	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>
	0	20	40	60		
Jęczmień jary – Spring barley						
dla metioniny for methionine	43,1	46,3	47,6	48,1	46,4	2,2
dla izoleucyny for isoleucine	55,3	54,7	56,3	55,6	55,5	1,1
dla waliny for valine	59,1	61,7	62,5	62,0	61,3	3,2
Łubin wąskolistny – Narrow-leaf lupin						
dla metioniny for methionine	40,5	40,0	47,5	47,6	43,9	6,8
dla izoleucyny for isoleucine	60,8	61,9	61,9	61,7	61,6	n.i.–n.s.
dla waliny for valine	61,6	63,5	62,4	61,6	62,3	n.i.–n.s.
Gorczyca biała – White mustard						
dla metioniny for methionine	59,6	61,6	62,3	64,8	62,1	2,1
dla izoleucyny for isoleucine	60,2	62,1	61,8	62,5	61,6	n.i.–n.s.
dla waliny for valine	68,8	70,1	71,5	71,5	70,5	n.i.–n.s.
Zintegrowany wskaźnik aminokwasów egzogennych – Essential Amino Acid Index						
Jęczmień jary Spring barley	70,1	73,0	73,4	72,7	72,3	1,5
Łubin wąskolistny Narrow-leaf lupin	71,5	73,1	73,8	73,6	73,0	n.i.–n.s.
Gorczyca biała White mustard	77,0	79,8	80,7	80,9	79,6	2,9

n.i. – n.s. – różnice nieistotne – non-significant differences



Wykazano, podobnie jak w badaniach Eriksena i Mortensena (2002), że wraz ze wzrostem dawek siarki istotnie zwiększają się wartości  $CS_{met}$ . W białku ziarna jęczmienia jarego potwierdzono statystycznie wpływ wszystkich dawek siarki na wartości tego wskaźnika, a w białku nasion łubinu i gorczycy – tylko 40 i 60 kg S·ha<sup>-1</sup>.

Średnie wartości  $CS_{met}$  białka ziarna jęczmienia jarego i nasion łubinu (46,4 i 43,9%) były znacznie niższe od wartości tego wskaźnika dla białka nasion gorczycy (62,1%) (tab. 18); może to wskazywać na szczególne znaczenie nawożenia siarką dla biosyntezy białka gatunków z rodziny *Poaceae* i *Fabaceae*.

Rolę drugiego aminokwasu ograniczającego dla wszystkich badanych gatunków spełniała izoleucyna, natomiast trzeciego – w przypadku jęczmienia – lizyna, a łubinu i gorczycy – walina. Zdaniem niektórych autorów (Gawęcki 2003), pierwszym aminokwasem pozostającym w minimum dla ziarna zbóż, jest lizyna, nie brakuje jednak doniesień wskazujących na taką pozycję metioniny (Barczak i Nowak 1998, Majcherczak i in. 2005). Białko roślin bobowatych i oleistych również nie zawiera dostatecznej ilości niektórych aminokwasów egzogennych. Według Sujak i in. (2006) białko nasion łubinu cechuje niedobór metioniny, lizyny, izoleucyny i waliny. Z kolei w nasionach roślin oleistych, w zależności od gatunku i odmiany, z reguły odnotowuje się niedobór: metioniny, lizyny i tryptofanu (Gawęcki 2003).

Drugim kryterium wartości odżywczej białka jest zintegrowany wskaźnik aminokwasów egzogennych – EAAI (*Essential Amino Acid Index*) (Oser 1951), definiowany jako średnia geometryczna z iloczynu wyrażonych w procentach stosunków zawartości poszczególnych aminokwasów egzogennych w badanym białku do ich zawartości w białku wzorcowym. Wydawałoby się, że wskaźnik ten pozwala na pełniejszą charakterystykę wartości odżywczej białka w porównaniu ze wskaźnikiem CS, gdyż jego wartość zależy od udziału wszystkich aminokwasów egzogennych. Niektórzy autorzy (Rutkowska 1981, Jones i in. 1982, Barczak 1999, Lubowicki i in. 2000) zwracają jednak uwagę, że w przypadku EAAI nadwyżki pewnych aminokwasów mogą kompensować niedobór innych, a w biosyntezie białka, a tym samym w żywieniu zwierząt i człowieka, nie może zabraknąć żadnego z aminokwasów egzogennych. Konieczna w związku z tym jest biologiczna weryfikacja wyników oznaczeń chemicznych.

Dla białka nasion gorczycy wykazano znacząco wyższe średnie wartości wskaźnika EAAI (79,6%) w porównaniu z białkiem ziarna jęczmienia (72,3%) i nasion łubinu (73,0%). Jest to konsekwencją wyższej zawartości aminokwasów egzogennych w białku tego gatunku. W następstwie zastosowania siarki, która powodowała zwiększenie w białku ziarna jęczmienia jarego oraz nasion łubinu i gorczycy zawartości większości aminokwasów (tab. 13-15), w tym – egzogennych, stwierdzono istotny wzrost wartości omawianego wskaźnika w stosunku do obiektu kontrolnego. Dla jęczmienia jarego wartość wskaźnika zwiększyła się już po zastosowaniu 20 kg S·ha<sup>-1</sup>, a dla gorczycy – od 40 kg S·ha<sup>-1</sup>.

Analiza wartości obydwu wskaźników wskazuje na wyraźny dodatni wpływ siarki na kształtowanie się składu aminokwasowego białka badanych gatunków

roślin, w tym aminokwasów ograniczających jego biosyntezę. Zdaniem Lubowickiego i in. (1997), istnieje wprawdzie niezbyt wysoka, ale istotna korelacja między wskaźnikami obliczonymi na podstawie składu aminokwasowego a wartością biologiczną białka, co powinno znaleźć potwierdzenie w badaniach biologicznych z udziałem zwierząt nad jego strawnością i przyswajalnością.

### 5.3. SIARKA W PŁONIE BADANYCH GATUNKÓW ROŚLIN

#### 5.3.1. ZAWARTOŚĆ SIARKI CAŁKOWITEJ I SIARCZANOWEJ(VI)

Najwyższe średnie zawartości siarki całkowitej i siarczanowej(VI) stwierdzono w nasionach gorczycy (odpowiednio 9,88 i 4,25 g·kg<sup>-1</sup>) (tab. 19 i 20). Znacznie niższymi zawartościami tych form cechowały się nasiona łubinu (2,98 i 1,56 g·kg<sup>-1</sup>), zaś najniższymi – ziarno jęczmienia jarego (1,10 i 0,25 g·kg<sup>-1</sup>).

Zróźnicowanie zawartości tego składnika w roślinach wynika z charakteru i funkcji fizjologicznych związków siarkowych syntetyzowanych przez dany gatunek. Wyższa zawartość obydwu form tego pierwiastka w nasionach łubinu w porównaniu z ziarnem jęczmienia jarego wynika ze znacznie wyższej zawartości białka w roślinach gatunków z rodziny *Fabaceae* i intensywniejszej w związku z tym biosyntezy aminokwasów siarkowych. Siarka jest również niezbędna do prawidłowego przebiegu procesu mikrobiologicznej redukcji azotu atmosferycznego, zachodzącej w wyniku symbiozy motylkowatych z bakteriami z rodzaju *Rhizobium* (Kopcewicz i Lewak 2005).

Znacząco najwyższą zawartość siarki całkowitej wykazano w nasionach gorczycy; jest to uzasadnione nie tylko wysoką zawartością białka, ale i obecnością metabolitów wtórnych, jakimi są bogate w siarkę glukozytolany. Oprócz czynników genetycznych, o zawartości tego pierwiastka w roślinach decydują: zasobność gleb w jego przyswajalne formy, warunki pogodowe, nawożenie, a także sąsiedztwo zakładów przemysłowych emitujących SO<sub>2</sub> (Motowicka-Terelak i Terelak 2000).

W przeprowadzonych badaniach za stosunkowo niewysoką zawartość obydwu form siarki w nasionach roślin z obiektów kontrolnych odpowiedzialna mogła być niska zasobność gleby, na której prowadzono doświadczenie polowe (6,5-12,2 mg S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>·kg<sup>-1</sup>, średnio 9,4 mg S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>·kg<sup>-1</sup>) (tab. 1) oraz niewielkie stężenie SO<sub>2</sub> w powietrzu atmosferycznym (Stan środowiska... 2008).

Wyniki badań własnych wykazały, że nawożenie siarką – przedsiewne i w trakcie wegetacji – poprawiało zaopatrzenie roślin w ten składnik oraz istotnie zwiększało jego zawartość w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorczycy. W przeciwieństwie do sposobu aplikacji, forma siarki na ogół istotnie determinowała zawartość siarki ogólnej i siarczanowej(VI) w nasionach badanych gatunków roślin (tab. 19 i 20).

Tabela 19. Zawartość siarki całkowitej [g·kg<sup>-1</sup>] w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach lubinu i gorczycy – średnie z lat badań  
 Table 19. Content of total sulphur [g·kg<sup>-1</sup>] in spring barley grain and lupin and mustard seed – means for the experiment years

Dawka – Dose [kg S·ha <sup>-1</sup> ] (III)	Sposób aplikacji – Application method										Forma – Form (II)		Średnia Mean
	(I)					doglebowe nawożenie – soil fertiliser					Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
	dolistne nawożenie – foliar fertiliser		średnia – mean			Siarkol		średnia – mean					
	Jęczmień jary – Spring barley												
0	1,04	1,04	1,04	1,02	1,06	1,04	1,03	1,03	1,03	1,05	1,05	1,04	
20	1,07	1,07	1,07	1,04	1,10	1,07	1,05	1,05	1,05	1,09	1,09	1,07	
40	1,09	1,15	1,12	1,09	1,15	1,12	1,09	1,09	1,09	1,15	1,15	1,12	
60	1,11	1,18	1,15	1,11	1,20	1,16	1,11	1,11	1,11	1,19	1,19	1,15	
Średnia – Mean	1,08	1,11	1,09	1,07	1,13	1,10	1,07	1,07	1,07	1,12	1,12	1,10	
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> :	I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 0,04; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; III × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.												
	Lubin wąskolistny – Narrow-leaf lupin												
0	2,49	2,50	2,50	2,77	2,55	2,66	2,63	2,63	2,63	2,53	2,53	2,58	
20	2,73	2,93	2,83	2,78	2,99	2,89	2,76	2,76	2,76	2,96	2,96	2,86	
40	3,03	3,25	3,14	3,13	3,29	3,21	3,08	3,08	3,08	3,27	3,27	3,18	
60	3,13	3,25	3,19	3,27	3,57	3,42	3,20	3,20	3,20	3,41	3,41	3,30	
Średnia – Mean	2,85	2,98	2,92	2,99	3,10	3,05	2,92	2,92	2,92	3,04	3,04	2,98	
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> :	I – n.i.–n.s.; II – 0,08; III – 0,29; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.												
	Gorczyca biała – White mustard												
0	9,37	9,38	9,37	9,32	9,36	9,34	9,35	9,35	9,35	9,37	9,37	9,36	
20	9,54	9,86	9,70	9,65	10,29	9,97	9,60	9,60	9,60	10,07	10,07	9,84	
40	9,87	10,10	9,98	10,01	10,29	10,15	9,94	9,94	9,94	10,19	10,19	10,07	
60	9,94	10,18	10,06	10,20	10,65	10,42	10,07	10,07	10,07	10,41	10,41	10,24	
Średnia – Mean	9,68	9,88	9,78	9,80	10,15	9,97	9,74	9,74	9,74	10,01	10,01	9,88	
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> :	I – 0,16; II – 0,14; III – 0,23; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.												

n.i. – n.s. – różnice nieistotne – non-significant differences

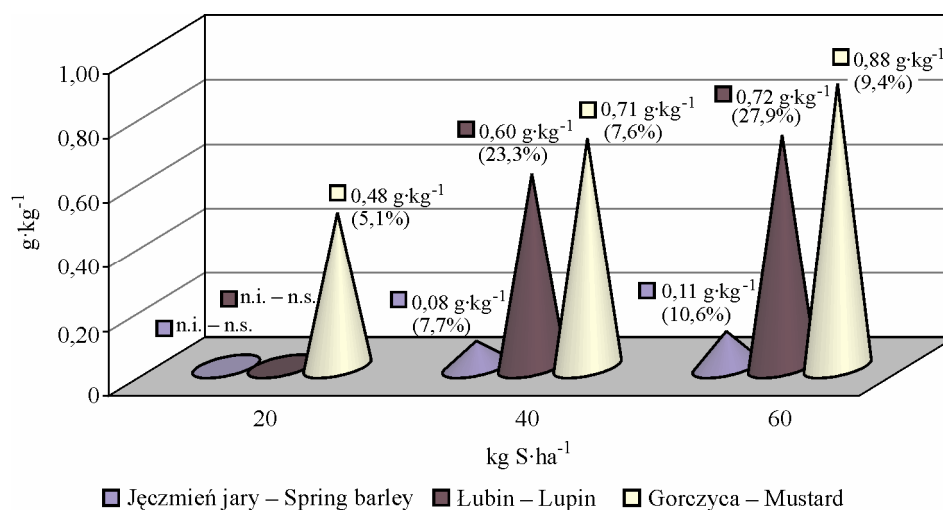
Tabela 20. Zawartość siarki siarczanowej(VI) [g·kg<sup>-1</sup>] w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorczycy – średnie z lat badań  
 Table 20. Content of sulphate(VI) sulphur [g·kg<sup>-1</sup>] in spring barley grain and lupin and mustard seed – means for the experiment years

Dawka – Dose [kg S·ha <sup>-1</sup> ] (III)	Sposób aplikacji – Application method										Forma – Form (II)		Średnia Mean
	(I)					średnia – mean					Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
	dolistne nawożenie – foliar fertiliser		doglebowe nawożenie – soil fertiliser			średnia – mean		średnia – mean					
	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		
Jęczmień jary – Spring barley													
0	0,22	0,22	0,22	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
20	0,25	0,25	0,25	0,25	0,23	0,24	0,25	0,25	0,24	0,25	0,25	0,24	0,25
40	0,25	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,25	0,25	0,25	0,26	0,25
60	0,27	0,34	0,30	0,25	0,27	0,26	0,25	0,27	0,26	0,26	0,26	0,30	0,28
Średnia – Mean	0,25	0,27	0,26	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – 0,01; III – 0,03; I × II – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.;													
Łubin wąskolistny – Narrow-leaf lupin													
0	1,26	1,32	1,29	1,27	1,30	1,29	1,27	1,31	1,29	1,27	1,31	1,29	1,29
20	1,44	1,63	1,54	1,45	1,49	1,47	1,45	1,44	1,47	1,44	1,56	1,50	1,50
40	1,61	1,88	1,75	1,59	1,68	1,64	1,59	1,60	1,64	1,60	1,78	1,69	1,69
60	1,76	1,83	1,80	1,68	1,74	1,71	1,68	1,72	1,71	1,72	1,78	1,75	1,75
Średnia – Mean	1,52	1,66	1,59	1,50	1,56	1,53	1,50	1,51	1,53	1,51	1,61	1,56	1,56
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – 0,06; III – 0,16; I × II – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.;													
Gorczyca biała – White mustard													
0	4,03	4,00	4,02	3,99	4,02	4,01	3,99	4,01	4,01	4,01	4,01	4,01	4,01
20	4,18	4,18	4,18	4,13	4,25	4,19	4,13	4,15	4,19	4,15	4,22	4,18	4,18
40	4,29	4,35	4,32	4,33	4,46	4,40	4,33	4,31	4,40	4,31	4,41	4,36	4,36
60	4,42	4,29	4,36	4,44	4,64	4,54	4,44	4,43	4,54	4,43	4,46	4,45	4,45
Średnia – Mean	4,23	4,20	4,22	4,22	4,34	4,28	4,22	4,22	4,28	4,22	4,27	4,25	4,25
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 0,11; I × II – 0,12; II × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.;													

n.i. – n.s. – różnice nieistotne – non-significant differences

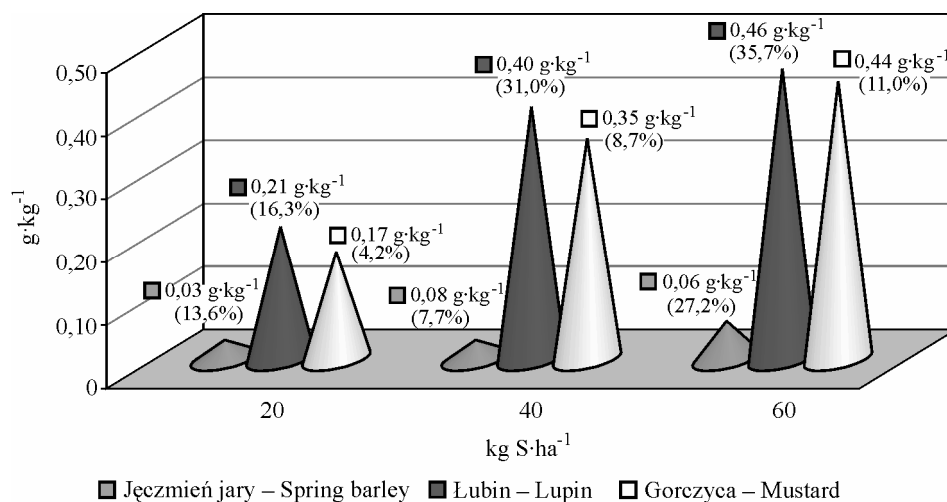
Stwierdzono korzystniejsze działanie formy jonowej w porównaniu z pierwiastkową dla kumulacji siarki ogólnej w nasionach łubinu (odpowiednia różnica:  $0,12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  – 4,1%) i gorczycy ( $0,27 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  – 2,8%). Silniejszy wpływ nawożenia tym składnikiem w postaci jonowej odnotowano również w przypadku kumulacji siarki siarczanowej(VI) w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorczycy, ale dla nasion gorczycy nie była to zależność potwierdzona statystycznie. Zawartość siarki w plonach roślin w dużej mierze jest warunkowana jej dostępnością z gleby, dlatego szybsze efekty daje zastosowanie formy siarczanowej(VI) niż aplikacja formy pierwiastkowej, działającej wolniej ze względu na konieczność utlenienia do  $\text{S}\cdot\text{SO}_4^{2-}$ . Wskazują na to badania Granta i in. (2003), a także Jakubus i Tobiły (2005), którzy – niezależnie od siebie – wykazali wyraźnie niższe zawartości  $\text{S}\cdot\text{SO}_4^{2-}$  w rzepaku nawożonym siarką elementarną niż siarczanem(VI) amonu oraz gipsem. Klikocka (2004a) natomiast, stosując w nawożeniu ziemniaka te same związki siarki, stwierdziła w bulwach znacznie większy przyrost zawartości  $\text{S}\cdot\text{SO}_4^{2-}$  po zastosowaniu siarki elementarnej niż  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  i  $\text{CaSO}_4$ .

Należy podkreślić, że dawka siarki była tym czynnikiem, który bez względu na formę i sposób aplikacji wywierał największy, potwierdzony statystycznie wpływ na zawartość siarki całkowitej i siarczanowej(VI) w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorczycy (tab. 19 i 20). Nawożenie siarką na poziomie  $40$  i  $60 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  powodowało znaczne zwiększenie – w porównaniu z obiektem kontrolnym – zawartości ogólnej (rys. 22) i siarczanowej(VI) (rys. 23) formy tego składnika.



Rys. 22. Przyrosty zawartości siarki ogólnej w porównaniu z obiektem kontrolnym w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorczycy pod wpływem nawożenia siarką

Fig. 22. Increases in the content of total sulphur, as compared with the control, in spring barley grain and lupin and mustard seed due to sulphur fertilisation



Rys. 23. Przyrosty zawartości siarki siarczanowej(VI) w porównaniu z obiektem kontrolnym w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorczycy pod wpływem nawożenia siarką

Fig. 23. Increases in the content of sulphate(VI) sulphur, as compared with the control, in the spring barley grain and lupin and mustard seeds due to sulphur fertilisation

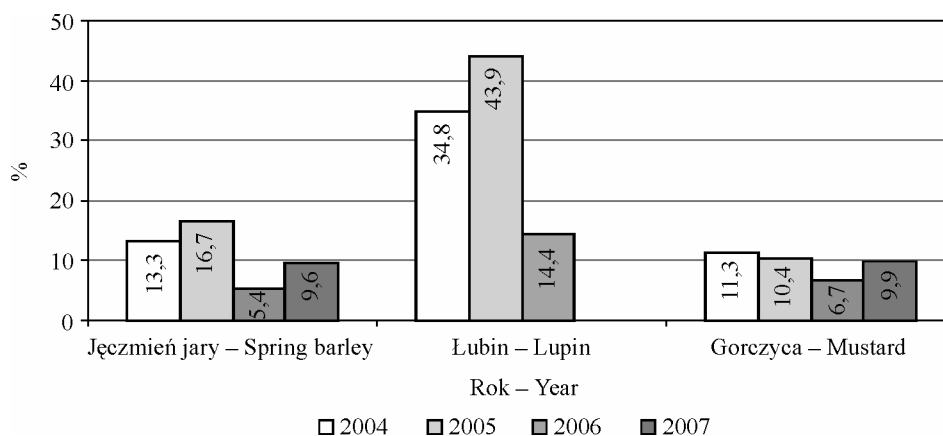
Warto zwrócić uwagę, że dla nasion gorczycy już zastosowanie 20 kg S·ha<sup>-1</sup> powodowało na ogół istotny przyrost zawartości obydwu form tego pierwiastka w stosunku do obiektu nienawożonego (rys. 22 i 23).

Nawożenie siarką wywierało największy wpływ na kumulację obydwu jej form w nasionach łubinu. Bez względu na poziom dawki istotnie największe przyrosty zawartości siarki ogólnej i siarczanowej(VI) odnotowano w nasionach tego gatunku (rys. 22 i 23, tab. 19 i 20). Uzyskane dane potwierdzają wyniki badań innych autorów, według których wzrost zawartości siarki w roślinach jest konsekwencją dostępności tego składnika w środowisku glebowym (Riley i in. 2000).

Efekt ten można osiągnąć, stosując nawożenie siarką w badaniach różnych gatunków roślin (Klikocka 2004a, Hlušek i in. 1999, Richter i Hrivna 1999, Sator i in. 2002, Wieser i in. 2004). Potarzycki (2004b) zwraca jednak uwagę, że wielkość i szybkość absorpcji siarki z roztworu glebowego przez korzenie roślin wynika nie tylko z dostępności tego składnika w glebie, ale zależy również od sprawności procesu pobierania i transportu siarczanów(VI) w roślinie. Podstawowym problemem zatem jest nie tylko ilość dostępnej siarki w glebie, ale także efektywna gospodarka zasobami tego składnika oraz azotu, zakumulowanymi w organach rośliny.

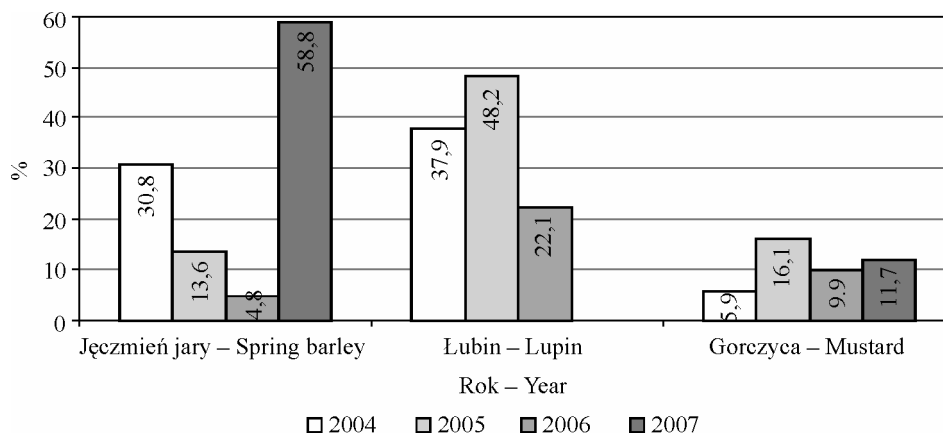
Zwraca uwagę wysoce istotna dodatnia korelacja między wielkością plonu nasion łubinu i gorczycy a zawartością w nich siarki ogólnej (odpowiednio:  $r = 0,901$  i  $r = 0,794$ ) (tab. 24 i 25). Można na tej podstawie sądzić, że siarka nie

ulegała rozcieńczeniu i była pobierana do końca wegetacji roślin, co jest zgodne z wynikami badań Monaghana i in. (1999), według których 50% siarki zakumulowanej w ziarniakach pszenica pobiera po kwitnieniu. Również Eriksen i Mortensen (2002) wskazują na silne oddziaływanie opóźnionego stosowania siarki na kształtowanie zawartości jej różnych form w ziarnie jęczmienia.



Rys. 24. Przyrosty zawartości siarki ogólnej pod wpływem dawki  $60 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$  w porównaniu z obiektem kontrolnym w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorzycy

Fig. 24. Increases in the content of total sulphur, as compared with the control, in the spring barley grain and lupin and mustard seeds as affected by the dose of  $60 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$



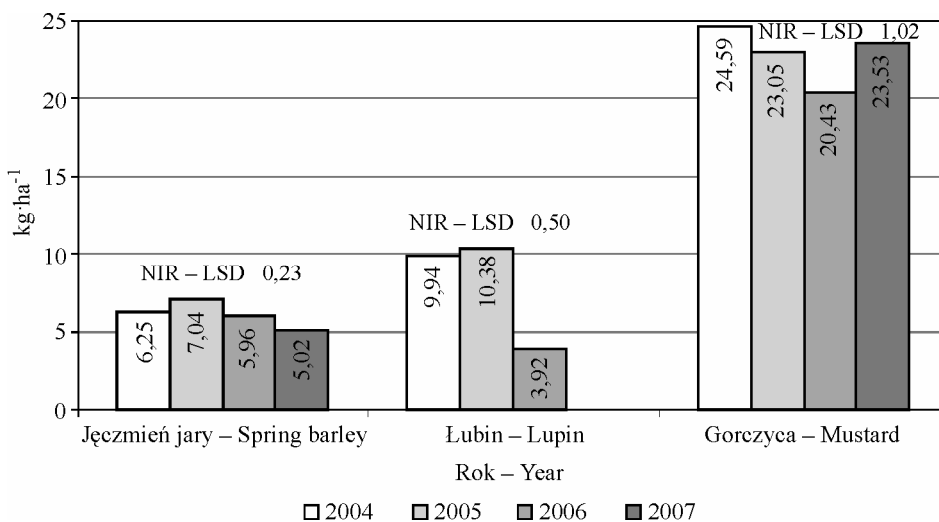
Rys. 25. Przyrosty zawartości siarki siarczanowej(VI) pod wpływem dawki  $60 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$  w porównaniu z obiektem kontrolnym w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorzycy

Fig. 25. Increases in the content of sulphate(VI) sulphur, as compared with the control, in the spring barley grain and lupin and mustard seeds as affected by the dose  $60 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$

Zmiany ilościowe obydwu form w nasionach badanych gatunków roślin pod wpływem stosowania tego składnika były zróżnicowane w poszczególnych latach badań. W roku 2006, który wyróżniał się na tle pozostałych lat badań najniższymi wartościami współczynnika Sielianiowa w czerwcu i lipcu, przyrosty zawartości siarki ogólnej i siarczanowej(VI) w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorczycy były najniższe (wyjątek – S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> w nasionach gorczycy) (rys. 24 i 25).

W latach 2004 i 2005, w których utrzymywały się korzystniejsze warunki wilgotnościowo-termiczne niż w 2006 i 2007 r., zmiany zawartości omawianych form siarki były na ogół znacznie wyższe. Słabsza reakcja roślin na nawożenie siarką w sytuacji, gdy okres suchy wypada w fazie najbardziej intensywnego pobierania składników pokarmowych, miała zapewne związek z obniżoną w tych warunkach aktywnością biologiczną gleby i zahamowaniem procesów mikrobiologicznych. Reakcja badanych gatunków roślin dowodzi, że czynnik hydrotermiczny wpływa na pobieranie siarki i ma zasadnicze znaczenie dla oceny efektywności nawożenia tym składnikiem, powinien być więc uwzględniany przy ustalaniu dawek tego składnika.

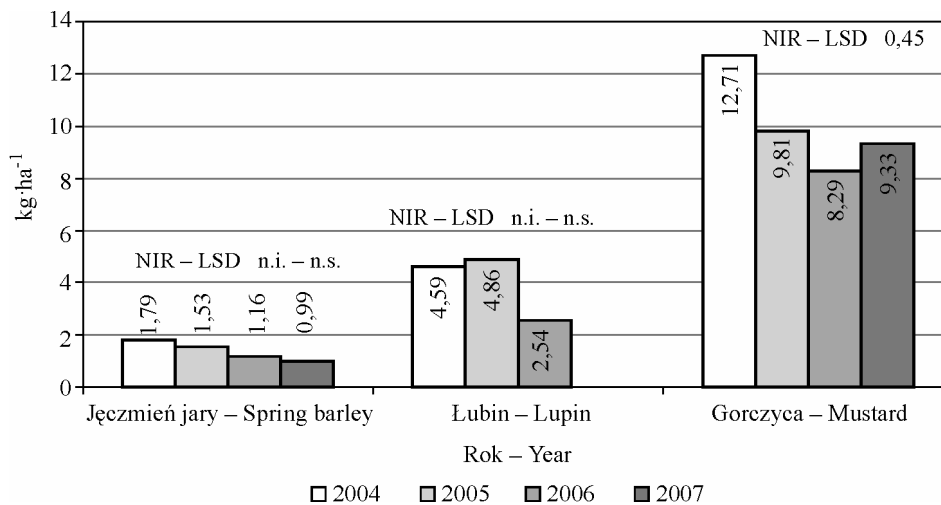
Najniższe ilości siarki ogólnej i siarczanowej(VI) pobranej z nasionami łubinu i gorczycy – w stosunku do pozostałych lat badań – stwierdzono w roku 2006 (rys. 26 i 27), który był najmniej korzystny pod względem plonów tych gatunków (rys. 10 i 12). Dla jęczmienia jarego najniższe ilości obydwu form siarki pobranej z ziarnem odnotowano w roku 2007.



Rys. 26. Ilości pobranej siarki ogólnej z ziarnem jęczmienia jarego oraz nasionami łubinu i gorczycy w zależności od roku badań

Fig. 26. Amounts of total sulphur uptaken with spring barley grain and lupin and mustard seeds depending on the experiment year





Rys. 27. Ilości siarki siarczanowej(VI) pobranej z ziarnem jęczmienia jarego oraz nasionami łubinu i gorzycy w zależności od roku badań

Fig. 27. Amounts of sulphate(VI) sulphur uptaken with spring barley grain and lupin and mustard seeds depending on the experiment year

### 5.3.2. UDZIAŁ SIARKI SIARCZANOWEJ(VI) W SIARCE OGÓLNEJ

Konsekwencją przedstawionych zmian zawartości siarki ogólnej i siarczanowej(VI) w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorzycy pod wpływem nawożenia siarką były zmiany udziału formy  $S-SO_4^{2-}$  w jej ogólnej zawartości (tab. 21). Najniższe wartości cechowały ziarno jęczmienia jarego (średnio – 22,5%), znacznie wyższą średnią wartość wykazano dla nasion łubinu (54,0%) i gorzycy (43,7%). Warto zwrócić uwagę na wyraźnie niższą wartość omawianego parametru dla ziarna jęczmienia jarego w porównaniu z nasionami pozostałych badanych gatunków. W ziarnie jęczmienia jarego niskiemu udziałowi siarczanów(VI) w siarce ogólnej towarzyszył wysoki udział azotu białkowego w azocie ogólnym (88,5% – tab. 8). Może to wskazywać na wyjątkowo wysoką efektywność siarki w biosyntezie białka tego gatunku.

Badania Scotta i in. (1984) nad jęczmieniem ozimym wykazały, że wyrażony w procentach udział siarki siarczanowej(VI) w siarce ogólnej może być przydatny w diagnostyce potrzeb pokarmowych roślin względem tego składnika. Jego wartość mniejsza niż 10%, według autorów, wskazuje na niedostatek siarki dostępnej w glebie. Zdaniem Brodowskiej i Kaczora (2003), przy dobrym zaopatrzeniu roślin w siarkę udział siarczanów(VI) może stanowić nawet 50-90% całkowitej zawartości pierwiastka, natomiast przy niedoborze tego składnika w glebie nieorganiczne związki siarki występują w roślinach w śladowych ilościach.

Tabela 21. Udział siarki siarczanowej(VI) w siarce ogólnej [%] w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach tubinu i gorzycy – średnie z lat badań  
 Table 21. Share of sulphate(VI) sulphur in total sulphur [%] in spring barley grain and lupin and mustard seeds – means for the experiment years

Dawka – Dose [kg S·ha <sup>-1</sup> ] (III)	Sposób aplikacji – Application method										Forma – Form (II)		Średnia Mean
	dolistne nawożenie – foliar fertiliser					doglebowe nawożenie – soil fertiliser					Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnio – mean	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnio – mean	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnio – mean				
Jęczmień jary – Spring barley													
0	21,5	21,2	21,4	21,0	20,9	20,9	21,2	21,0	20,9	21,2	21,0	21,1	
20	23,4	23,5	23,5	22,5	21,1	21,8	23,0	22,5	21,8	23,0	22,3	22,6	
40	22,8	21,9	22,3	22,5	22,1	22,3	22,6	22,5	22,3	22,6	22,0	22,3	
60	24,5	25,0	24,7	23,1	22,8	23,0	23,6	23,1	22,8	23,6	23,9	23,8	
Średnia – Mean	23,0	22,9	23,0	22,3	21,7	22,0	22,7	22,3	22,0	22,7	22,3	22,5	
NIR <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 1,81; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.													
Łubin wąskolistny – Narrow-leaf lupin													
0	51,4	53,6	52,5	52,8	51,9	52,4	52,1	52,8	51,9	52,1	53,8	52,5	
20	55,3	56,8	56,1	53,0	51,3	52,1	54,1	53,0	51,3	54,1	54,1	54,1	
40	54,4	59,0	56,7	51,8	52,9	52,4	53,1	51,8	52,9	53,1	55,9	54,5	
60	57,8	57,4	57,6	53,0	51,8	52,4	55,4	53,0	51,8	55,4	54,6	55,0	
Średnia – Mean	54,8	56,7	55,7	52,7	52,0	52,3	53,7	52,7	52,0	53,7	54,3	54,0	
NIR <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 2,41; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.													
Gorzycyca biała – White mustard													
0	43,7	43,4	43,6	43,4	43,7	43,5	43,6	43,4	43,7	43,5	43,6	43,6	
20	44,6	43,0	43,8	43,4	42,6	43,0	44,0	43,4	42,6	44,0	42,8	43,4	
40	44,2	43,5	43,8	43,8	44,1	44,0	44,0	43,8	44,1	44,0	43,8	43,9	
60	45,0	42,7	43,8	43,9	44,0	43,9	44,4	43,8	44,0	44,4	43,3	43,9	
Średnia – Mean	44,4	43,1	43,7	43,6	43,6	43,6	44,0	43,6	43,6	44,0	43,4	43,7	
NIR <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – n.i.–n.s.; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.													

n.i. – n.s. – różnice nieistotne – non-significant differences

Analiza wariancji nie potwierdziła wprawdzie wpływu sposobu stosowania oraz formy siarki na kształtowanie się udziału siarczanów(VI) w ogólnej zawartości tego pierwiastka, można jednak sądzić, że dolistna jego aplikacja, w porównaniu ze stosowaniem doglebowym, podwyższała wartość tego parametru dla ziarna jęczmienia jarego i nasion łubinu (tab. 21).

Zwiększenie dawek siarki wpływało dodatnio na wartość omawianej relacji u wszystkich objętych badaniami gatunków roślin, ale dla nasion gorczycy nie była to zależność potwierdzona statystycznie. Należy jednak podkreślić, że istotny jej przyrost w stosunku do obiektu kontrolnego dla jęczmienia i łubinu stwierdzono dopiero po zastosowaniu dawki  $60 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$ .

### 5.3.3. STOSUNEK AZOTU OGÓLNEGO DO SIARKI OGÓLNEJ

W warunkach niedoboru siarki wartość stosunku N:S w roślinie ulega rozszerzeniu w wyniku zwiększenia zawartości niebiałkowych związków azotowych, przede wszystkim glutaminy i asparaginy (Goźliński 1970a, Podleśna 2005). Wiele badań (Aulakh i in. 1980, Janzen i Bettany 1984, Schnug i Haneklaus 2000) wskazuje na silną interakcję między poziomem siarki i azotu jako pierwiastków niezbędnych do syntezy aminokwasów wchodzących w skład białek. Proporcja ilościowa N:S we wskaźnikowych częściach roślin stanowi jeden z lepszych i powszechnie akceptowanych testów potrzeb nawożenia siarką (Spencer i Freney 1980, Withers i in. 1995, Schnug i Haneklaus 2000, Blake-Kalff i in. 2003, Fotyma 2003, Grant i in. 2003, Kalembasa i Godlewska 2004, Jakubus i Toboła 2005). Wiarygodność wartości stosunku N:S podważają jedynie Zhao i in. (1997a), których zdaniem stosunek ten jest uwarunkowany stanem odżywienia roślin i zależy od ich odmiany.

Średnie wartości N:S w badanych gatunkach wynosiły: dla ziarna jęczmienia jarego – 14,8:1, dla nasion łubinu i gorczycy odpowiednio: 16,4:1 i 5,0:1 (tab. 22).

Znacznie niższa wartość omawianej proporcji w nasionach gorczycy wynika z wysokiej w nich zawartości siarki, co wiąże się z dużą zawartością białka, a tym samym aminokwasów siarkowych oraz innych, zawierających siarkę, metabolitów wtórnych (glukozynolany). Dla porównania: w badaniach Klikockiej (2004b) nad pszenżytem jarym średnia wartość N:S w ziarnie wynosiła 14,1:1, u Gainesa i Phataka (1982) dla nasion grochu – 15:1, u Browna i in. (2000) w biomacie użytków zielonych w zależności od miejsca, nawożenia i pokosu – (8,5÷18,4):1, u Klikockiej (2004a) w bulwach ziemniaka – 12,0:1, u Jacksona (2000) w nasionach rzepaku ozimego w zależności od lokalizacji badań – (8,6÷10,6):1. Withers i in. (1995) przyjęli jako wartość krytyczną N:S dla ziarna pszenicy 17:1, a McGrath i Zhao (1996) dla nasion rzepaku – (6÷10):1. Zdaniem Krzywego i in. (2002), w roślinach przeznaczonych na paszę optymalna relacja ilościowa między azotem i siarką wynosi (15÷16):1.

Tabela 22. Stosunek azotu ogólnego do siarki ogólnej w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach lubinu i gorczycy – średnie z lat badań  
 Table 22. Ratio of total nitrogen to total sulphur in spring barley grain and lupin and mustard seed – means for the experiment years

Dawka – Dose [kg S·ha <sup>-1</sup> ] (III)	Sposób aplikacji – Application method										Forma – Form (II)		Średnia Mean
	(I)					doglebowe nawożenie – soil fertiliser					Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
	dolistne nawożenie – foliar fertiliser		średnia – mean			Siarkol		Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>					
	Jęczmień jary – Spring barley												
0	15,2:1	15,3:1	15,2:1	15,4:1	15,1:1	15,2:1	15,4:1	15,1:1	15,2:1	15,3:1	15,2:1	15,2:1	15,2:1
20	15,2:1	15,1:1	15,1:1	15,3:1	14,7:1	15,0:1	15,3:1	14,7:1	15,0:1	15,2:1	14,9:1	14,9:1	15,1:1
40	14,8:1	14,1:1	14,5:1	14,8:1	14,2:1	14,5:1	14,8:1	14,2:1	14,5:1	14,8:1	14,1:1	14,1:1	14,5:1
60	14,8:1	14,0:1	14,4:1	14,7:1	13,8:1	14,2:1	14,7:1	13,8:1	14,2:1	14,7:1	13,9:1	13,9:1	14,3:1
Średnia – Mean	15,0:1	14,6:1	14,8:1	15,0:1	14,4:1	14,7:1	15,0:1	14,4:1	14,7:1	15,0:1	14,5:1	14,5:1	14,8:1
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> :	I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 0,476; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.												
	Lubin wąskolistny – Narrow-leaf lupin												
0	19,7:1	18,7:1	19,2:1	19,1:1	18,4:1	18,7:1	19,1:1	18,4:1	18,7:1	19,4:1	18,5:1	18,5:1	19,0:1
20	17,6:1	16,9:1	17,2:1	16,6:1	15,2:1	15,9:1	16,6:1	15,2:1	15,9:1	17,1:1	16,0:1	16,0:1	16,6:1
40	15,5:1	14,8:1	15,2:1	15,3:1	15,0:1	15,1:1	15,3:1	15,0:1	15,1:1	15,4:1	14,9:1	14,9:1	15,2:1
60	16,0:1	14,7:1	15,3:1	15,2:1	13,6:1	14,4:1	15,2:1	13,6:1	14,4:1	15,6:1	14,1:1	14,1:1	14,9:1
Średnia – Mean	17,2:1	16,3:1	16,7:1	16,5:1	15,5:1	16,0:1	16,5:1	15,5:1	16,0:1	16,9:1	15,9:1	15,9:1	16,4:1
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> :	I – 0,65; II – 0,35; III – 1,19; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.												
	Gorczyca biała – White mustard												
0	5,3:1	5,2:1	5,2:1	5,3:1	5,3:1	5,3:1	5,3:1	5,3:1	5,3:1	5,3:1	5,2:1	5,2:1	5,3:1
20	5,2:1	5,0:1	5,1:1	5,1:1	4,9:1	5,0:1	5,1:1	4,9:1	5,0:1	5,2:1	4,9:1	4,9:1	5,0:1
40	5,1:1	4,9:1	5,0:1	5,0:1	4,9:1	4,9:1	5,0:1	4,9:1	4,9:1	5,1:1	4,9:1	4,9:1	5,0:1
60	5,1:1	5,0:1	5,0:1	4,9:1	4,7:1	4,8:1	4,9:1	4,7:1	4,8:1	5,0:1	4,9:1	4,9:1	4,9:1
Średnia – Mean	5,2:1	5,0:1	5,1:1	5,1:1	4,9:1	5,0:1	5,1:1	4,9:1	5,0:1	5,1:1	5,0:1	5,0:1	5,0:1
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> :	I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 0,249; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.												

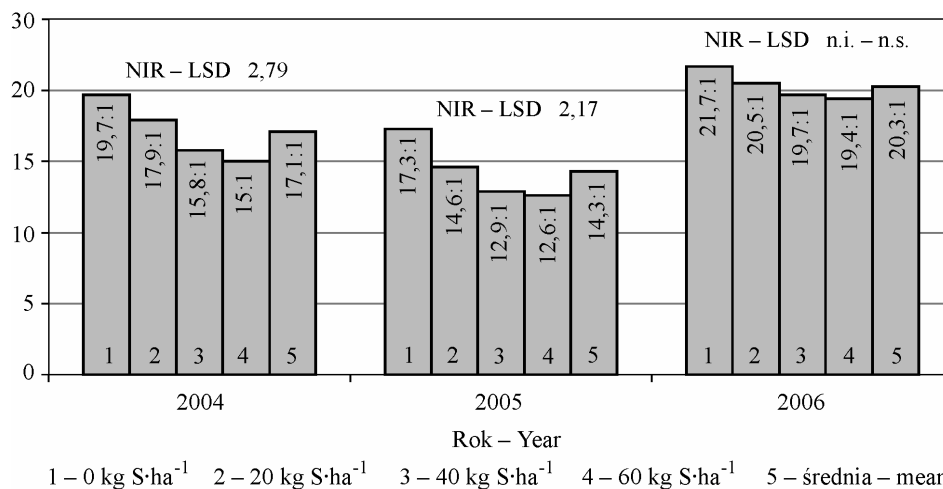
n.i. – n.s. – różnice nieistotne – non-significant differences

Należy jednak pamiętać, że stosunek N:S wyraża jedynie proporcję ilościową pierwiastków, a nie rzeczywistą ich zawartość. Poza tym, pomimo że jest on determinowany genetycznie, może się wahać w pewnych granicach w zależności od fazy wegetacji (Spencer i Freney 1980) oraz zasobności gleby w przyswajalne formy tych składników, a także dawek zastosowanych nawozów (Gaines i Phatak 1982, Bertilsson 1994, Withers i in. 1997, Zhao i in. 1997a, Potarzycki i Grzebisz 2007).

Badania własne wykazały, że dla nasion łubinu wszystkie testowane czynniki miały potwierdzony statystycznie wpływ na kształtowanie N:S (zawartość siarki całkowitej przyjęto za 1), a w przypadku ziarna jęczmienia jarego i nasion gorczycy – istotne znaczenie miała tylko dawka siarki (tab. 22). Po zastosowaniu siarki doglebowo wartość N:S w nasionach łubinu (średnio 16,0:1) była istotnie niższa niż w warunkach nawożenia dolistnego (16,7:1). Forma jonowa tego składnika, podobnie jak w badaniach Klikockiej (2004a) nad ziemniakiem, zawężała w łubinie wartości omawianego stosunku w porównaniu z formą pierwiastkową, średnio z 16,9:1 do 15,9:1.

Wzrostowi dawek siarki towarzyszyło obniżanie wartości N:S z uwagi na większe przyrosty zawartości siarki niż azotu w warunkach dobrego zaopatrzenia roślin w ten składnik. Dawka siarki w największym stopniu różnicowała stosunek N:S u łubinu (dla obiektu kontrolnego – średnio: 19,0:1, a po zastosowaniu  $60 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$  – 14,9:1) (tab. 22). Omawiana proporcja w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach gorczycy w warunkach zróżnicowanego nawożenia siarką była znacznie bardziej stabilna. Taki kierunek zmian stosunku N:S pod wpływem wzrastających dawek siarki jest zgodny z badaniami dotyczącymi biomasy rzepaku ozimego (Jackson 2000, Lośak i in. 2000) oraz gorczycy (Filipek-Mazur i in. 2006, Kulczycki 2007), a także nasion soi (Gaines i Phatak 1982), rzepaku (Jackson 2000) i ziarna pszenicy ozimej (Wieser i in. 2004). W badaniach Aulakha i Deva (1978) nad lucerną zastosowanie tego składnika obniżyło wartość N:S, rozszerzając jednocześnie proporcję między azotem białkowym a siarką białkową.

Należy podkreślić, że wyniki badań własnych, podobnie jak Klikockiej (2004a) nad ziemniakiem, wskazują, że bardziej aniżeli sposób aplikacji, forma i dawka siarki omawianą cechą zmieniał czynnik hydrotermiczny związany z rokiem badań. Ta zależność szczególnie uwidaczniała się u łubinu (rys. 28).



Rys. 28. Stosunek N:S w nasionach łubinu w zależności od zastosowanych dawek siarki  
 Fig. 28. Ratio N:S in lupin seed depending on the sulphur dose applied

#### 5.3.4. ZALEŻNOŚĆ POMIĘDZY PLONEM ZIARNA JĘCZMIENIA JAREGO ORAZ NASION ŁUBINU WĄSKOLISTNEGO I GORCZYCY BIAŁEJ A ELEMENTAMI ICH SKŁADU CHEMICZNEGO

Wykazano zależność pomiędzy plonem badanych gatunków roślin, zwłaszcza łubinu wąskolistnego i gorczycy białej, a zawartością azotu i siarki w ich nasionach bądź wartościami stosunków, w których te składniki występują ( $N_b:N_{og}$ ,  $S_{SO_4}:S_{og}$  i N:S) (tab. 23-25).

Zwracają uwagę wysokie wartości współczynników korelacji pomiędzy plonem nasion łubinu oraz gorczycy a zawartością w nich: azotu ogólnego, azotu białkowego, siarki ogólnej, a także udziałem siarki siarczanowej(VI) w ogólnej (tab. 24 i 25). Silny korelacyjny związek między wymienionymi parametrami jest konsekwencją bardzo ważnej roli siarki w metabolizmie azotu i potwierdza jej wysoką plonotwórczą efektywność.

Dla nasion łubinu oraz gorczycy, podobnie jak Klikocka (2004a) w bulwach ziemniaka oraz Eriksen i Mortensen (2002) w ziarnie pszenicy, stwierdzono również wysoce dodatnią korelację pomiędzy zawartościami azotu ogólnego i siarki ogólnej (odpowiednio:  $r = 0,566$  i  $r = 0,790$ ). W ziarnie jęczmienia jarego wykazano z kolei ścisłą zależność pomiędzy zawartością azotu ogólnego w ziarnie a zawartością siarki siarczanowej(VI) i udziałem tej formy w siarce ogólnej (tab. 23).

Przedstawione zależności wynikają z faktu ścisłego powiązania pobierania azotu i siarki przez roślinę, gdyż przy stosowaniu wysokich dawek azotu jego wykorzystanie z nawozów oraz efektywność rolnicza i fizjologiczna są znacznie większe w warunkach dobrego zaopatrzenia w siarkę (Byers i Bolton 1979, Janzen i Bettany 1984, Griffiths i in. 1995, Zhao i in. 1997a, Lośak i in. 2000).

Tabela 23. Współczynniki korelacji prostej ( $r_{xy}$ ) między plonem jęczmienia jarego oraz elementami składu chemicznego jego ziarna  
 Table 23. Coefficients of simple correlation ( $r_{xy}$ ) between the spring barley yield and the chemical composition components of grain

Numer cechy Character number	Cecha skorelowana – Correlated character								
	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	0,168	0,395	0,081	-0,163	-0,022	0,517	0,505	0,205	
2		-0,235	-0,663*	-0,749*	0,380	-0,082	-0,204	-0,462	
3			0,722*	0,301	0,087	0,836*	0,777*	0,388	
4				0,877*	0,147	0,470	0,418	0,205	
5					0,147	0,067	0,035	0,009	
6						0,007	-0,305	-0,882*	
7							0,949*	0,376	
8								0,640*	

\* współczynnik korelacji statystycznie istotny ( $p < 0,05$ )  
 coefficients correlation significant ( $p < 0.05$ )

Objaśnienia – Explanations:

1. Plon nasion – Seed yield
2. Plon słomy – Straw yield
3.  $N_{og.} - N_{total}$
4.  $N_b - N_{prot.}$
5.  $N_b/N_{og.} - N_{prot.}/N_{total}$
6.  $S_{og.} - S_{total}$
7.  $S_{SO_4}$
8.  $S_{SO_4}/S_{og.} - S_{SO_4}/S_{total}$
9.  $N_{og.}/S_{og.} - N_{total.}/S_{total}$

gdzie – where:

- $N_b - N_{prot.}$  – azot białkowy – protein nitrogen  
 $N_{og.} - N_{total}$  – azot ogólny – total nitrogen  
 $S_{og.} - S_{total}$  – siarka ogólna – total sulphur  
 $S_{SO_4}$  – siarka siarczanowa(VI) – sulphate(VI) sulphur

Tabela 24. Współczynniki korelacji prostej ( $r_{xy}$ ) między plonem łubinu oraz elementami składu chemicznego jego nasion  
 Table 24. Coefficients of simple correlation ( $r_{xy}$ ) between the lupin yield and the chemical composition components of seed

Numer cechy Character number	Cecha skorelowana – Correlated character								
	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	0,691*	0,779*	0,501*	-0,499*	0,901*	0,396	0,887*	-0,835*	
2		0,921*	0,900*	0,210	0,542*	-0,001	-0,748*	-0,412	
3			0,932*	0,095	0,566*	-0,083	0,926*	-0,396	
4				0,464	0,037	-0,273	-0,687*	-0,101	
5					-0,552*	-0,514	0,293	0,654*	
6						0,736*	-0,628*	-0,973*	
7							0,059	-0,818*	
8								0,507*	

Tabela 25. Współczynniki korelacji prostej ( $r_{xy}$ ) między plonem gorczycy oraz elementami składu chemicznego jej nasion  
 Table 25. Coefficients of simple correlation ( $r_{xy}$ ) between the mustard yield and the chemical composition components of seed

Numer cechy Character number	Cecha skorelowana – Correlated character								
	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	0,786*	0,614*	-0,445	0,332	0,794*	-0,083	0,869*	-0,764*	
2		-0,904*	-0,752*	0,237	0,726*	-0,387	0,629*	0,555*	
3			0,914*	-0,346	0,790*	0,700*	0,566*	-0,599*	
4				0,351	0,610*	-0,328	-0,328	-0,404	
5					-0,327	0,287	0,509*	0,398	
6						0,549*	-0,910*	-0,962*	
7							-0,157	-0,392	
8								0,954*	

\* współczynnik korelacji statystycznie istotny ( $p \leq 0,05$ )  
 significant correlation coefficient ( $p \leq 0,05$ )

Objaśnienia jak w tabeli 23 – For explanations, see Table 23



#### 5.4. STOSUNKI JONOWE W ZIARNIE JĘCZMIENIA JAREGO ORAZ NASIONACH ŁUBINU WĄSKOLISTNEGO I GORCZYCY BIAŁEJ

W ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorczycy oznaczono, oprócz azotu i siarki, zawartość innych podstawowych składników mineralnych (Ca, Mg, K, Na, P). Ich fizjologiczna rola jest w zasadzie poznana (Kopcewicz i Lewak 2005), natomiast mniej danych dotyczy oceny równoważnikowych stosunków między tymi pierwiastkami, a zwłaszcza wpływu nawożenia siarką na ich wartość. Proporcje makroskładników, decydujące o równowadze jonowej w nasionach wykorzystywanych jako składnik diety człowieka bądź przeznaczonych na paszę dla zwierząt, mogą determinować ich wartość odżywczą. Zdaniem Filipka (1987), utrzymanie równowagi kationowo-anionowej jest jednym z podstawowych czynników, jakie decydują o prawidłowym przebiegu metabolizmu, w końcowym zaś efekcie – o wielkości i jakości plonu. Na podstawie przeprowadzonych oznaczeń makroskładników, których zawartości wyrażono w gramorównoważnikach, obliczono dla ziarna jęczmienia jarego oraz nasion łubinu i gorczycy wartości następujących stosunków jonowych:  $K^+ : Ca^{2+}$  (tab. 26),  $K^+ : Mg^{2+}$  (tab. 27) i  $(K^+ + Na^+) : (Ca^{2+} + Mg^{2+})$  (tab. 28).

Wykazano znacznie wyższe wartości stosunków  $K^+ : Ca^{2+}$  i  $K^+ : Mg^{2+}$  dla jęczmienia jarego (średnio – 5,92 i 1,15) oraz łubinu (3,94 i 1,72) w porównaniu z wartościami określonymi dla gorczycy (1,37 i 0,88) (tab. 26 i 27), co było konsekwencją stosunkowo wysokiej zawartości wapnia i magnezu w jej nasionach (Paszkievicz-Jasińska 2005).

Stwierdzono, że w roślinach z obiektów o dolistnej aplikacji siarki ilościowa proporcja potasu do wapnia, a także potasu do magnezu jest zwykle wyższa niż z obiektów, na których siarka była stosowana doglebowo. Odpowiednie różnice wynosiły (w %) średnio: dla ziarna jęczmienia jarego – 10,7 i 2,7, dla nasion łubinu – 6,6 i 3,6, dla nasion gorczycy – 7,6 i 7,1. Pierwiastkowa forma siarki istotnie podwyższała, w porównaniu z formą jonową, wartość stosunku  $K^+ : Ca^{2+}$  tylko w nasionach łubinu, a w przypadku  $K^+ : Mg^{2+}$  – w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorczycy.

Analiza wariancji potwierdziła wpływ przede wszystkim dawki siarki na wartości omawianych stosunków w ziarnie jęczmienia jarego oraz w nasionach łubinu i gorczycy. Najwyższe wartości osiągały one na ogół po zastosowaniu dawki  $60 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Odpowiednie różnice dla obydwu proporcji w porównaniu z obiektem bez siarki w liczbach względnych wynosiły: dla jęczmienia jarego – 11,3 i 15,1%, dla łubinu – 12,9 i 7,8%, dla gorczycy – 7,6 i 7,1%.

Można sądzić, opierając się na wynikach badań Filipka (1987) dotyczących wpływu nawożenia potasem i azotem na równowagę jonową roślin, że zastosowanie siarki w wyniku oddziaływania na stężenie jonów w roztworze glebowym oraz na stopień wysycenia nimi glebowego kompleksu sorpcyjnego zmieniło warunki odżywiania roślin i zróżnicowało kumulację poszczególnych jonów w nasionach.

Tabela 26. Wyrażone w gramorównoważnikach stosunki zawartości potasu do wapnia w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorczycy – średnie z lat badań

Table 26. Expressed in gram-equivalents, ratios of the content of potassium to calcium in spring barley grain and lupin and mustard seeds – means for the experiment years

Dawka – Dose [kg S·ha <sup>-1</sup> ] (III)	Sposób aplikacji – Application method										Forma – Form (II)		Średnia Mean
	(I)					doglebowe nawożenie – soil fertiliser					Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
	dolistne nawożenie – foliar fertiliser		średnia – mean		średnia – mean		Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean				
0	5,70	6,17	5,93	5,32	5,15	5,23	5,51	5,66	5,58	5,51	5,66	5,58	
20	5,78	6,28	6,03	5,69	5,50	5,59	5,74	5,89	5,81	5,74	5,89	5,81	
40	6,15	6,60	6,37	5,85	5,72	5,78	6,00	6,16	6,08	6,00	6,16	6,08	
60	6,51	6,57	6,54	6,12	5,64	5,88	6,31	6,11	6,21	6,31	6,11	6,21	
Średnia – Mean	6,03	6,40	6,22	6,74	5,50	5,62	5,89	5,95	5,92	5,89	5,95	5,92	
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – 0,31; II – n.i.-n.s.; III – 0,34; I × II – 0,43; II × I – 0,43; I × III – n.i.-n.s.; III × I – n.i.-n.s.; II × III – n.i.-n.s.;													
Łubin wąskolistny – Narrow-leaf lupin													
0	3,85	3,74	3,79	3,68	3,58	3,63	3,77	3,66	3,71	3,77	3,66	3,71	
20	4,09	4,04	4,07	4,15	3,59	3,87	4,12	3,82	3,97	4,12	3,82	3,97	
40	4,15	3,78	3,97	3,94	3,59	3,77	4,05	3,69	3,87	4,05	3,69	3,87	
60	4,71	4,13	4,42	4,13	3,80	3,97	4,42	3,96	4,19	4,42	3,96	4,19	
Średnia – Mean	4,20	3,92	4,06	3,98	3,64	3,81	4,09	3,78	3,94	4,09	3,78	3,94	
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – 0,10; II – 0,20; III – 0,26; I × II – n.i.-n.s.; II × I – n.i.-n.s.; I × III – n.i.-n.s.; III × I – n.i.-n.s.; II × III – n.i.-n.s.;													
Gorczyca biała – White mustard													
0	1,36	1,34	1,35	1,29	1,28	1,28	1,32	1,31	1,31	1,32	1,31	1,31	
20	1,43	1,42	1,42	1,35	1,31	1,23	1,39	1,36	1,38	1,39	1,36	1,38	
40	1,47	1,42	1,44	1,34	1,31	1,32	1,40	1,36	1,38	1,40	1,36	1,38	
60	1,48	1,45	1,47	1,37	1,34	1,35	1,42	1,40	1,41	1,42	1,40	1,41	
Średnia – Mean	1,43	1,41	1,42	1,34	1,31	1,32	1,38	1,36	1,37	1,38	1,36	1,37	
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – 0,05; II – n.i.-n.s.; III – 0,05; I × II – n.i.-n.s.; II × I – n.i.-n.s.; I × III – n.i.-n.s.; III × I – n.i.-n.s.; II × III – n.i.-n.s.;													

n.i. – n.s. – różnice nieistotne – non-significant differences

Tabela 27. Wyrażone w gramorównoważnikach stosunki zawartości potasu do magnezu w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorczycy – średnie z lat badań  
 Table 27. Expressed in gram-equivalents, ratios of the content of potassium to magnesium in spring barley grain and lupin and mustard seeds – means for the experiment years

Dawka – Dose [kg S·ha <sup>-1</sup> ] (III)	Sposób aplikacji – Application method (I)										Forma – Form (II)		Średnia Mean
	dolistne nawożenie – foliar fertiliser					doglebowe nawożenie – soil fertiliser					Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean	Siarkol			
0	1,06	1,07	1,06	1,07	1,05	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
20	1,22	1,13	1,18	1,11	1,08	1,09	1,16	1,16	1,16	1,11	1,11	1,13	1,13
40	1,21	1,16	1,19	1,16	1,13	1,14	1,16	1,16	1,16	1,18	1,18	1,14	1,16
60	1,26	1,16	1,21	1,28	1,20	1,24	1,16	1,16	1,16	1,27	1,18	1,18	1,22
Średnia – Mean	1,19	1,13	1,16	1,15	1,11	1,13	1,16	1,16	1,16	1,17	1,17	1,12	1,15
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – 0,05; III – 0,06; I × II – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.;													
Łubin wąskolistny – Narrow-leaf lupin													
0	1,68	1,66	1,67	1,67	1,61	1,64	1,67	1,67	1,67	1,68	1,68	1,64	1,66
20	1,71	1,73	1,72	1,76	1,62	1,69	1,76	1,76	1,76	1,74	1,74	1,69	1,70
40	1,84	1,73	1,79	1,75	1,62	1,68	1,79	1,75	1,75	1,80	1,80	1,68	1,74
60	1,82	1,80	1,81	1,78	1,74	1,76	1,82	1,78	1,78	1,80	1,80	1,77	1,79
Średnia – Mean	1,77	1,73	1,75	1,74	1,65	1,69	1,74	1,74	1,74	1,76	1,76	1,69	1,72
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – 0,06; III – 0,08; I × II – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.;													
Gorczyca biała – White mustard													
0	0,86	0,86	0,86	0,83	0,82	0,82	0,86	0,86	0,86	0,84	0,84	0,82	0,84
20	0,96	0,86	0,91	0,87	0,83	0,85	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,85	0,88
40	0,94	0,89	0,92	0,88	0,83	0,86	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91	0,86	0,89
60	0,97	0,92	0,95	0,88	0,85	0,86	0,95	0,95	0,95	0,93	0,93	0,86	0,90
Średnia – Mean	0,93	0,88	0,91	0,86	0,83	0,85	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,85	0,88
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – 0,03; II – 0,02; III – 0,04; I × II – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.;													
III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.													

n.i. – n.s. – różnice nieistotne – non-significant differences

Tabela 28. Wyrażone w gramorównoważnikach stosunki zawartości potasu i sodu do wapnia i magnezu w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorczycy – średnie z lat badań

Table 28. Expressed in gram-equivalents, ratios of the content of potassium and sodium to calcium and magnesium in spring barley grain and lupin and mustard seeds – means for the experiment years

Dawka – Dose [kg S·ha <sup>-1</sup> ] (III)	Sposób aplikacji – Application method										Forma – Form (II)		Średnia Mean
	dolistne nawożenie – foliar fertiliser (I)					doglebowe nawożenie – soil fertiliser					Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean				
Jęczmień jary – Spring barley													
0	0,89	0,90	0,90	0,88	0,87	0,87	0,89	0,88	0,87	0,87	0,89	0,88	0,89
20	1,00	0,96	0,98	0,92	0,90	0,90	0,96	0,93	0,91	0,91	0,96	0,93	0,94
40	1,00	0,98	0,99	0,96	0,94	0,94	0,98	0,96	0,95	0,95	0,96	0,96	0,97
60	1,04	0,98	1,01	1,05	0,99	0,99	1,05	0,98	1,02	1,02	1,05	0,98	1,01
Średnia – Mean	0,98	0,96	0,97	0,95	0,92	0,92	0,97	0,94	0,94	0,94	0,97	0,94	0,95
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> :	I – 0,02; II – 0,03; III – 0,05; I × II – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.												
Łubin wąskolistny – Narrow-leaf lupin													
0	1,04	1,03	1,04	1,17	1,00	1,00	1,11	1,01	1,08	1,08	1,11	1,01	1,06
20	1,07	1,08	1,08	1,10	1,01	1,01	1,09	1,05	1,06	1,06	1,09	1,05	1,07
40	1,14	1,06	1,10	1,08	1,00	1,00	1,11	1,03	1,04	1,04	1,11	1,03	1,07
60	1,15	1,11	1,13	1,11	1,07	1,07	1,13	1,09	1,09	1,09	1,13	1,09	1,11
Średnia – Mean	1,10	1,07	1,08	1,12	1,02	1,02	1,11	1,05	1,07	1,07	1,11	1,05	1,08
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> :	I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 0,04; I × II – n.i.–n.s.; I × III – 0,06; III × I – 0,06; III × II – 0,06; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.												
Gorczyca biała – White mustard													
0	0,54	0,54	0,54	0,52	0,51	0,51	0,53	0,52	0,51	0,51	0,53	0,52	0,53
20	0,59	0,55	0,57	0,54	0,52	0,52	0,57	0,54	0,53	0,53	0,57	0,54	0,55
40	0,59	0,57	0,58	0,55	0,52	0,52	0,59	0,54	0,53	0,53	0,57	0,54	0,55
60	0,60	0,59	0,59	0,55	0,54	0,54	0,60	0,54	0,54	0,54	0,57	0,56	0,57
Średnia – Mean	0,58	0,56	0,57	0,54	0,52	0,52	0,58	0,54	0,53	0,53	0,56	0,54	0,55
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> :	I – 0,02; II – 0,01; III – 0,02; I × II – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.												

n.i. – n.s. – różnice nieistotne – non-significant differences

Według Kopcewicza i Lewaka (2005), równowaga pomiędzy kationami jedno- i dwuwartościowymi ma duży wpływ na utrzymanie biokoloidów cytoplazmy w odpowiednim stopniu uwodnienia, a także przez udział w układach buforowych determinuje wartości pH komórki oraz jej potencjał osmotyczny.

Na rozszerzanie wartości stosunków ilościowych między potasem a wapniem oraz potasem a magnezem w biomacie słonecznika i seradeli w wyniku stosowania siarki zwracają uwagę Uziak i Szymańska (1987), które wykazały, że omawiane proporcje rozszerzały się nie tylko pod wpływem wyższych dawek siarki, ale także w warunkach lepszego zaopatrzenia roślin w NPK.

Wartości stosunków  $K^+ : Ca^{2+}$  i  $K^+ : Mg^{2+}$  (tab. 26 i 27) pozostawały w zależności z relacją ilościową sumy potasu i sodu do sumy wapnia i magnezu ( $K^+ + Na^+ : Ca^{2+} + Mg^{2+}$ ) (tab. 28). Proporcja między zawartościami tych jonów osiągała najwyższe wartości dla nasion łubinu (1,08), niższe – dla ziarna jęczmienia jarego (0,95), a najniższe – dla nasion gorczycy (0,55). Duże zróżnicowanie wartości omawianego stosunku wynikało z różnej zdolności akumulacji makroskładników w nasionach, która zależy od zdolności wymiennej korzeni w stosunku do kationów (CEC – *Cation Exchange Capacity*) (Filipek 1987). Korzenie roślin dwuliściennych na ogół pobierają więcej kationów dwuwartościowych ( $Ca^{2+}$  i  $Mg^{2+}$ ), a jednoliścienne – jednowartościowych ( $K^+$  i  $Na^+$ ) (Filipek 1987). Badania własne potwierdziły tę prawidłowość tylko dla proporcji między potasem a wapniem (tab. 26).

Sposób stosowania siarki miał istotne znaczenie dla kształtowania omawianego parametru w ziarnie jęczmienia jarego i nasionach gorczycy, dla których jej dolistna aplikacja powodowała rozszerzenie proporcji ( $K^+ + Na^+ : Ca^{2+} + Mg^{2+}$ ) średnio o 3,2 i 7,5% w porównaniu z nawożeniem doglebowym. Dla nasion wszystkich badanych gatunków roślin pierwiastkowa forma siarki pozwalała osiągnąć istotnie wyższe wartości stosunku potasu i sodu do wapnia i magnezu niż forma jonowa.

Wzrastające dawki siarki powodowały, podobnie jak w badaniach Uziak i Szymańskiej (1987) dotyczących biomasy łubinu, kukurydzy i kapusty pastewnej oraz Kozłowskiej (2000) – biomasy rzepaku jarego, istotne rozszerzenie proporcji ( $K^+ + Na^+ : Ca^{2+} + Mg^{2+}$ ) w nasionach badanych gatunków roślin. Taki kierunek oddziaływania dotyczył przede wszystkim ziarna jęczmienia jarego, dla którego zastosowanie dawki  $60 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$  powodowało przyrost wartości omawianego stosunku o 13,5% w porównaniu z obiektem kontrolnym. Odpowiednie różnice dla nasion łubinu i gorczycy wynosiły: 4,7 i 7,5%.

Zawartość makroskładników, m.in. potasu, wapnia, magnezu i sodu, oraz stosunki ilościowe pomiędzy nimi są miarą przydatności żywieniowej paszy otrzymanej z roślin uprawianych na cele pastewne, a także wartości odżywczej plonu roślin przeznaczonych do konsumpcji. Stan równowagi jonowej w roślinie jest bowiem jednym z ważnych czynników determinujących jakość paszy, gdyż nadmierne pobieranie określonych kationów lub anionów ogranicza zawartość innych, często cennych makro- i mikroelementów. Powszechnie sądzi się, że wysokie zawartości potasu pogarszają, a wapnia i magnezu – poprawiają ja-

kość paszy (Brodowska i Kaczor 2002, Krzywy i in. 2002). Należy zwrócić uwagę na rozszerzanie się proporcji  $K^+ : Ca^{2+}$ ,  $K^+ : Mg^{2+}$  oraz  $(K^+ + Na^+) : (Ca^{2+} + Mg^{2+})$  w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorczycy w wyniku zwiększania dawek siarki, zwłaszcza podawanych dolistnie w formie elementarnej. Taki kierunek zmian jest konsekwencją określonego oddziaływania siarki na skład pierwiastkowy organów generatywnych badanych gatunków. W praktyce, w paszach znacznie częściej występuje nadmiar potasu niż jego niedobór (Kotlarz 2000). Szczególnie niepożądana według autorki jest zbyt duża rozpiętość wartości stosunku  $(K^+ + Na^+) : (Ca^{2+} + Mg^{2+})$  w paszach przeżuwaczy, która może wskutek hypomagnezjemii doprowadzić u bydła do tężyczki pastwiskowej. Ważną rolę w utrzymywaniu równowagi między jonami jedno- i dwuwartościowymi przypisuje się odpowiedniej zawartości wapnia, który – podobnie jak magnez – może działać antagonistycznie w stosunku do potasu (Filipek 1987). Antagonizm ten prawdopodobnie polega na współzawodnictwie pomiędzy jonami w stosunku do nośników znajdujących się w błonie plazmatycznej. Nadmiar jednego jonu może wpływać hamująco na wiązanie się innego jonu z nośnikiem i w ten sposób powodować zmniejszanie jego pobierania (Kopcewicz i Lewak 2005).

Analiza wartości omówionych stosunków jonowych wskazuje na niezbyt korzystny kierunek zmian składu chemicznego ziarna jęczmienia jarego oraz nasion łubinu i gorczycy pod wpływem nawożenia siarką dla ich wartości paszowej. Spośród badanych gatunków jedynie jęczmień jary i łubin uprawia się na cele paszowe. Obliczone dla tych gatunków średnie wartości  $K^+ : Mg^{2+}$ ,  $K^+ : Ca^{2+}$  oraz  $(K^+ + Na^+) : (Ca^{2+} + Mg^{2+})$  były niższe od uznawanych za optymalne dla nasion na paszę, wynoszących odpowiednio: 6,0; 1,5; 1,6-2,2 (Krzywy i in. 2002). Należy jednak podkreślić, że rozszerzanie się wartości omawianych proporcji pod wpływem nawożenia siarką, teoretycznie niekorzystne, pozwalało osiągnąć wartości bardziej zbliżone do optymalnych. Można więc sądzić, że nie ma wyraźnych przesłanek do wnioskowania o ujemnym oddziaływaniu nawożenia siarką na jonowy skład badanego ziarna i nasion.

## 5.5. ZAWARTOŚĆ GLUKOZYNOANÓW W NASIONACH GORCZYCY BIAŁEJ

Całkowita suma glukozyzolanów w nasionach gorczycy wynosiła średnio dla czterech lat badań  $143,7 \mu M \cdot g^{-1}$ , a suma ich form alkenowych –  $4,0 \mu M \cdot g^{-1}$  (tab. 29).

Najbardziej sprzyjające kumulacji tych związków warunki hydrotermiczne wystąpiły w roku 2007 (tab. 30).

Najniższe zawartości glukozyzolanów w nasionach gorczycy oznaczono w roku 2006, który wyróżniał się nie tylko wysokimi temperaturami powietrza, ale i bardzo niskimi opadami w czerwcu oraz w pierwszej połowie lipca.

Tabela 29. Zawartość glukozynolanów [ $\mu\text{M}\cdot\text{g}^{-1}$ ] w nasionach gorczyicy białej – średnie z lat 2004-2007  
 Table 29. Content of glucosinolates [ $\mu\text{M}\cdot\text{g}^{-1}$ ] in white mustard seeds – means for 2004-2007

Dawka – Dose [ $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ ] (III)	Sposób aplikacji – Application method (I)										Forma – Form		Średnia Mean
	Dolistne nawożenie – foliar fertiliser				doglebowe nawożenie – soil fertiliser				Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>			
	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean	4	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	średnia – mean	7			8	9	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10			
Suma całkowita glukozynolanów – Total glucosinolates													
0	129,9	126,4	128,3	128,7	129,7	129,2	129,3	128,2	128,7				
20	141,0	135,2	138,1	139,5	153,4	146,6	140,2	144,4	142,4				
40	149,1	148,8	149,1	137,6	142,9	140,3	143,4	145,8	144,6				
60	153,2	166,3	158,0	162,8	153,7	158,2	157,9	160,0	159,0				
Średnia – Mean	143,3	144,2	143,8	142,2	145,0	143,6	142,7	144,6	143,7				
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 14,4; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.													
Suma glukozynolanów alkenowych – Total alkenyl glucosinolates													
0	3,5	3,2	3,4	3,5	3,3	3,4	3,5	3,3	3,4				
20	3,9	4,0	4,0	4,1	4,1	4,1	4,0	4,1	4,0				
40	4,4	4,2	4,3	4,3	4,6	4,5	4,4	4,4	4,4				
60	4,1	4,3	4,2	4,0	4,0	4,0	4,1	4,1	4,3				
Średnia – Mean	4,0	3,9	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0				
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 0,5; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.													
Zawartość progoitryny – Progoitrin content													
0	3,0	2,7	2,9	3,0	2,8	2,9	3,0	2,8	2,9				
20	3,1	3,5	3,3	3,5	3,5	3,5	3,3	3,5	3,4				
40	3,9	3,6	3,8	3,7	4,0	3,9	3,8	3,8	3,8				
60	3,6	3,7	3,7	3,5	3,5	3,5	3,5	3,6	3,6				
Średnia – Mean	3,4	3,4	3,4	3,4	3,5	3,5	3,4	3,4	3,4				
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 0,6; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.													

cd. tabeli 29 – Table 29 continued

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zawartość sinalbiny – Sinalbin content									
0	126,1	122,8	124,5	124,7	126,1	125,4	125,4	124,5	124,9
20	137,3	131,0	134,1	135,2	148,9	142,1	136,2	140,0	138,1
40	144,6	144,4	144,5	133,2	138,2	135,7	138,9	141,3	140,1
60	149,1	162,0	155,6	158,8	149,5	154,1	153,9	155,8	154,8
Średnia – Mean	139,3	140,1	139,7	138,0	140,7	139,3	138,6	140,4	139,5
NIR <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 14,4; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.									
Zawartość glukobrazyyny – Glucobrassicin content									
0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
20	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3
40	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
60	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Średnia – Mean	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
NIR <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – n.i.–n.s.; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.									
Zawartość 4-OH glukobrazyyny – 4-OH-glucobrassicin content									
0	0,6	0,7	0,7	0,8	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7
20	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,5	0,6	0,6
40	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
60	0,3	0,4	0,4	0,3	0,5	0,4	0,3	0,4	0,4
Średnia – Mean	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6	0,5
NIR <sub>0,05</sub> : I – 0,1; II – n.i.–n.s.; III – 0,1; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.									

n.i. – n.s. – różnice nieistotne – non-significant differences



Tabela 30. Zawartość wybranych glukozynolanów [ $\mu\text{M}\cdot\text{g}^{-1}$ ] w nasionach gorczycy  
 Table 30. Content of selected glucosinolates [ $\mu\text{M}\cdot\text{g}^{-1}$ ] in mustard seeds

Glukozynolany – Glucosinolates	Rok badań – Years of study				NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>
	2004	2005	2006	2007	
Suma całkowita – Total	143,4	143,6	132,9	154,9	7,7
Suma alkenowych – Total alkenic glucosinolates	3,9	4,2	3,6	4,3	0,3
Progoitryna – Progoitrin	3,3	3,8	3,4	3,1	0,3
Sinalbina – Sinalbin	140,0	138,6	128,5	151,3	7,7
Glukobrassicyna – Glucobrassicin	0,2	0,3	0,3	0,2	n.i.–n.s.

n.i. – n.s. – różnica nieistotna – non-significant differences

Oleszek (1995) podkreśla, że dla kształtowania zawartości glukozynolanów o wiele większe znaczenie ma zaopatrzenie roślin w wodę niż warunki termiczne. Jest to związane z dostępnością i translokacją siarki, której pobieranie w okresie suszy przez rośliny jest ograniczone, co negatywnie może oddziaływać na biosyntezę tych związków.

Zwraca uwagę bardzo wysoka zawartość całkowitej sumy glukozynolanów w nasionach gorczycy w porównaniu z ich zawartością w nasionach podwójnie ulepszonych, dwuzerowych odmian rzepaku, w których w wyniku wieloletnich prac hodowlanych zredukowano zawartość tych związków ze 170 do 15-25  $\mu\text{M}\cdot\text{g}^{-1}$  beztłuszczowej masy nasion (Zduńczyk 1995). Odmiany rzepaku aktualnie uprawiane mają niską (10-20  $\mu\text{M}\cdot\text{g}^{-1}$ ) lub bardzo niską (<5  $\mu\text{M}\cdot\text{g}^{-1}$ ) zawartość tych związków (Wielebski 2000). Zmniejszaniu zawartości glukozynolanów w ulepszonych odmianach rzepaku towarzyszyła ilościowa zmiana składu tej grupy związków, a zwłaszcza, uważanych za najbardziej szkodliwe dla zwierząt i człowieka, form alkenowych. Dzięki istotnemu obniżeniu poziomu tych glukozynolanów przełamana została główna bariera uniemożliwiająca wykorzystanie śrutu rzepakowej do celów paszowych. Warto podkreślić, że w zmodyfikowanych odmianach rzepaku ich zawartość stanowi 30-50% całkowitej ilości glukozynolanów (Zduńczyk 1995), a w badanych nasionach gorczycy – tylko 2,8%.

Wysoka zawartość ogólnej sumy glukozynolanów w nasionach gorczycy jest jedną z przyczyn ograniczonego wykorzystania nasion tego gatunku do produkcji pasz oraz obniżania się ich wartości jako surowca dla przemysłu spożywczego. Należy jednak zaznaczyć, że wykazana w badaniach własnych zawartość glukozynolanów alkenowych w nasionach gorczycy (średnio – 4,0  $\mu\text{M}\cdot\text{g}^{-1}$ ) nie przekraczała dopuszczalnego przez normy poziomu 18  $\mu\text{M}\cdot\text{g}^{-1}$  (albo 25  $\mu\text{M}\cdot\text{g}^{-1}$  suchej masy beztłuszczowej) (PN-90/R-66151).

Jedynym czynnikiem istotnie determinującym zawartość sumy glukozynolanów w nasionach gorczycy była dawka siarki. Po zastosowaniu 40 kg S·ha<sup>-1</sup> stwierdzono, w porównaniu z obiektem kontrolnym, udowodniony statystycznie przyrost zawartości całkowitej sumy glukozynolanów, a także ich form alkenowych (tab. 29). Nie wykazano, w przeciwieństwie do Schnuga (1997) i Bloem i in. (2005), istotnej korelacji między zawartością siarki ogólnej w nasionach gorczycy a sumą całkowitą tych związków, natomiast potwierdzono statystycznie zależność między sumą glukozynolanów a zawartością siarki siarczanowej(VI)

( $r = 0,826$ ). Podobnie jak w badaniach Fimesa i in. (2000) oraz Wielebskiego i Wójtowicza (2003) nad rzepakiem, zastosowanie siarki powodowało mniejszy przyrost zawartości całkowitej sumy glukozynolanów niż ich form alkenowych (średnie różnice dla 0-40 kg S·ha<sup>-1</sup> wynosiły odpowiednio: 12,4 i 29,4%). Większa wrażliwość glukozynolanów alkenowych na odpowiednie zaopatrzenie roślin w siarkę jest prawdopodobnie związana ze stymulującą rolą tego składnika w biosyntezie metioniny, będącej ich prekursorem (Halkier i Gershenzon 2006).

Głównym przedstawicielem glukozynolanów alkenowych w nasionach gorczycy jest progoitryna, której średnia zawartość, jak wykazały badania własne, wynosiła 3,4 μM·g<sup>-1</sup> (tab. 29), co stanowiło 85,0% całkowitej zawartości tych związków. Jedynym z badanych czynników, wywierającym statystycznie potwierdzony wpływ na zawartość progoitryny, była dawka siarki. W badaniach własnych, w przeciwieństwie do doświadczeń Figas i in. (2008), nie wykazano istotnych różnic dla sposobu stosowania i formy tego składnika. Zawartość progoitryny stabilizowała się po zastosowaniu 40 kg S·ha<sup>-1</sup>. Warto wspomnieć, że związek ten jest substancją o działaniu goitrogennym (wolotwórczym), gdyż w organizmie uniemożliwia wbudowywanie jodu w pierścień tyrozyny i tym samym utrudnia syntezę hormonów tarczycy, mogąc powodować jej niedoczynność (Bloem i in. 2001, Wathelet 2004, Halkier i Gershenzon 2006). Zduńczyk (1995) przedstawia badania nad zwierzętami, których wyniki wykazały wyraźne zmniejszenie spożycia mieszanki paszowej z udziałem śruty rzepakowej o zawartości progoitryny powyżej 4,65 μM·g<sup>-1</sup>.

W oznaczonym dla nasion gorczycy profilu glukozynolanów ilościowo dominowała sinalbina, zaliczana ze względu na charakter aglikonu do związków arylowych. Z synalbiny pod wpływem działania enzymu mirozynazy powstają: nietłoty olejek gorczyczny (izotiocyanian p-hydroksybenzylu) o piekącym smaku, a także siarczan sinapiny oraz glukoza (Wathelet 2004). Zawartość olejku w jednym gramie odtłuszczonych nasion gorczycy białej wynosi 2,7-3,0% (Josefsson (1970), cyt. za Paszkiewicz-Jasińską 2005). Jego obecność sprawia, że nasiona gorczycy wprawdzie nie mogą być wykorzystywane do celów paszowych, ale są cenionym surowcem do wyrobu musztardy oraz proszku gorczycznego, używanego jako przyprawa w konserwach (Paszkiewicz-Jasińska 2005). Średnia dla wszystkich lat badań zawartość sinalbiny w nasionach gorczycy wynosiła 139,5 μM·g<sup>-1</sup>, stanowiąc 97,1% całkowitej sumy glukozynolanów (tab. 29). Na dominujący udział tego związku wśród glukozynolanów nasion gorczycy białej zwracają uwagę Murawa i in. (1999) oraz Paszkiewicz-Jasińska (2005). Zawartość sinalbiny w nasionach gorczycy była determinowana przez dawkę siarki. Wykazano, że zastosowanie 40 i 60 kg S·ha<sup>-1</sup> powodowało istotny wzrost zawartości tego związku w porównaniu z obiektem kontrolnym średnio (w μmol·kg<sup>-1</sup>) odpowiednio o: 15,2 (12,2%) i 29,9 (23,9%).

W nasionach gorczycy, oprócz glukozynolanów alkenowych i arylowych, oznaczono zawartość ich form indolowych, będących pochodnymi tryptofanu. Warto nadmienić, że w wyniku hydrolizy glukozynolanów indolowych powstają jony tiocyanianowe o właściwościach goitrogennych. Jony te mają zdolność przenikania do mleka ssaków, występują też w jajach kurzych (Drozdowska

1994). Znane są jednak również dane o pożytecznym wykorzystaniu tych związków; udokumentowano na przykład ich działanie przeciwnowotworowe (Rotkiewicz i in. 2000). W nasionach gorczycy glukozynolany indolowe są reprezentowane przez glukobrassicynę i 4-hydroksyglukobrassicynę. W badaniach własnych wykazano pewne zróżnicowanie zawartości tych związków w wyniku zastosowania nawożenia siarką, jednak nie potwierdzono statystycznie wpływu żadnego z objętych badaniami czynników na ich poziom (tab. 29). Warto zauważyć, że zastosowanie siarki nieco różnicowało zawartości omawianych glukozynolanów, jednak, podobnie jak w badaniach Szulca i in. (2003) oraz Wielebskiego i Wójtowicza (2003), ich suma nie zwiększała się.

Badania dotyczące roślin z rodziny *Brassicaceae* wskazują na dodatnią zależność między zawartością glukozynolanów w nasionach a zaopatrzeniem roślin w siarkę (Wielebski i Muśnicki 1998, Fismes i in. 2000, Szulc i in. 2003, Wielebski i Wójtowicz 2003, Figas i in. 2008). Zdaniem Wielebskiego (1997), nawożenie siarką na początku okresu wegetacji jest korzystniejsze niż jej aplikacja w późniejszych fazach rozwoju, gdyż w mniejszym stopniu wpływa na zawartość glukozynolanów w nasionach rzepaku. Na zasadność tego wniosku wskazują badania Bootha i in. (1995), które potwierdziły znaczące podwyższenie zawartości tej grupy związków pod wpływem dolistnego stosowania siarki w fazie pąkowania rzepaku. Wielebski (1997) podkreśla, że optymalną pod rośliny z rodziny *Brassicaceae* jest dawka siarki, która zapewnia roślinom niezbędną ilość składnika, a jednocześnie nie powoduje zwiększenia zawartości glukozynolanów. Nie brakuje jednak doniesień, z których wynika, że nawożenie siarką nie zawsze powoduje taką reakcję. Person (1994) wykazał wyraźny wzrost zawartości tej grupy związków w dwóch, spośród trzech, badanych odmian rzepaku jarego, a Asare i Scarisbrick (1995) obserwowali duże zróżnicowanie wpływu siarki w zależności od warunków termiczno-wilgotnościowych sezonu wegetacyjnego. Rolę czynników pogodowych i charakteru odmiany, a także czynników agrotechnicznych, w tym poziomu nawożenia i dostępności poszczególnych jego składników, dla syntezy glukozynolanów akcentują też: Zhao i in. (1997a), Rotkiewicz i in. (2000), Zukałova i in. (2001b), Paszkiewicz-Jasińska (2005). Należy zaznaczyć, że wyniki badań własnych, w przeciwieństwie do uzyskanych przez Szulca i in. (2003), nie potwierdziły oddziaływania sposobu aplikacji i formy siarki na zawartość i skład glukozynolanów w nasionach gorczycy. Szulc i in. (2003) wykazali istotne obniżenie zawartości glukozynolanów alkenowych oraz indolowych w nasionach rzepaku jarego po dolistnym nawożeniu siarką elementarną, natomiast ta forma aplikowana doglebowo powodowała, podobnie jak w badaniach Figas i in. (2008), zwiększenie ogólnej sumy glukozynolanów.

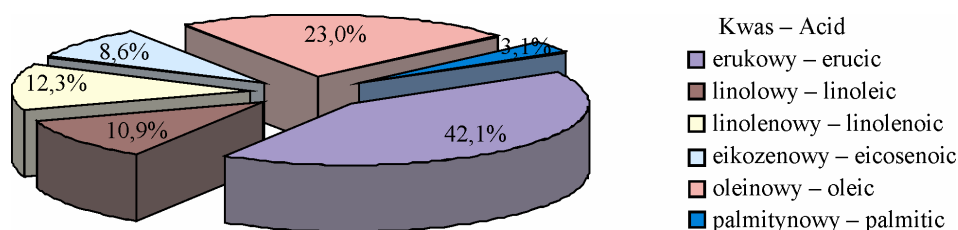
Wyniki badań własnych wykazały, że niezależnie od czynników genetycznych różnicujących rodzaj i poziom glukozynolanów w nasionach gorczycy zawartość tych związków może ulec modyfikacji pod wpływem nawożenia siarką. Stwierdzone po zastosowaniu tego składnika podwyższenie zawartości ich ogólnej sumy, a zwłaszcza frakcji alkenowej, uważanej za najbardziej szkodliwą dla zdrowia człowieka i zwierząt, może obniżać wartość technologiczną nasion gor-

czy. Jednakże zróżnicowana stosowaniem siarki zawartość glukozynolanów wpływała prawdopodobnie na relacje patogen – roślina. Wprawdzie na doświadczalnej plantacji nie prowadzono obserwacji fitopatologicznych, ale na podstawie wyników uzyskanych przez innych autorów (Jędrzycka i in. 2002, Sadowski i in. 2002, Halkier i Gershenzon 2006, Figas i in. 2008) można spodziewać się, że podwyższona w wyniku aplikacji siarki zawartość tych związków, łącznie z rozkładającym je enzymem mirozynazą ( $\beta$ -tioglukozydaza), stanowiły dwuskładnikowy system obronny roślin przeciwko patogenom i roślinożercom. Rozwiązaniem kompromisowym byłoby stworzenie odmian o bogatych w glukozynolany liściach i pędach, przy jednocześnie jak najniższej ich koncentracji w nasionach. Należy nadmienić, że są prowadzone prace hodowlane nad nowymi odmianami gorczycy białej podwójnie ulepszonej, a osiągnięta zmienność genetyczna wewnątrz wytworzonych populacji gwarantuje możliwości dalszego postępu hodowlanego (Sawicka i Kotiuk 2007). Wydaje się, że wobec coraz większej popularności systemów rolnictwa zintegrowanego i ekologicznego możliwość wykorzystania glukozynolanów jako naturalnych pestycydów stwarza ciekawą alternatywę dla konwencjonalnych metod ochrony roślin, zwłaszcza z rodziny *Brassicaceae*.

## 5.6. ZAWARTOŚĆ KWASÓW TŁUSZCZOWYCH W NASIONACH GORCZYCY BIAŁEJ

Najważniejszym źródłem roślinnych kwasów tłuszczowych są rośliny oleiste, wśród których w Polsce dominuje rzepak ozimy. Uprawę jarych roślin oleistych ogranicza niższe w stosunku do odmian ozimych plonowanie oraz mniejsza wydajność tłuszczu z hektara, a także większa wrażliwość na niedobór wilgoci w glebie. W ostatnich latach w Polsce obserwuje się jednak zwiększenie zainteresowania tą grupą roślin, w tym gorczycą białą (*Sinapis alba* L.), zaliczaną do grupy roślin oleistych specjalnego przeznaczenia (Paszkiwicz-Jasińska 2005).

Przeprowadzone badania wykazały, że profil kwasów tłuszczowych nasion gorczycy stanowią kwasy nasycone (erukowy i palmitynowy) oraz nienasycone (linolowy,  $\alpha$ -linolenowy, eikozenowy i oleinowy) (rys. 29, tab. 31).



Rys. 29. Zawartość kwasów tłuszczowych w oleju nasion gorczycy białej – średnie z lat 2004-2007

Fig. 29. Content of the fatty acids in the white mustard seed oil – means for 2004-2007

Tabela 31. Zawartość kwasów tłuszczowych [ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] w oleju nasion gorczycy – średnie z lat 2004-07  
 Table 31. Content of the fatty acids [ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] in mustard seed oil – means for 2004-07 years

Dawka – Dose [ $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ ] (III)	Sposób aplikacji – Application method											Forma – Form (II)		Średnia Mean
	(I)					(I)					Śiarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		
	dolistne nawożenie – foliar fertiliser		doglebowe nawożenie – soil fertiliser		średnia – mean		Śiarkol		Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>				średnia – mean	
2	3	4	5	6	7	8	9	10						
0	397	402	400	417	408	412	407	405	406	406	406	407	405	406
20	407	410	409	405	405	405	406	408	407	407	407	406	408	407
40	419	424	422	408	423	415	413	423	418	418	418	413	423	418
60	408	431	420	418	424	421	413	428	420	420	420	413	428	420
Średnia – Mean	408	417	412	412	415	413	410	416	413	413	413	410	416	413
NIR <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – 0,8; III – 16,2; I × II – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.;														
III × II – n.i.–n.s.; I × II × III –														
Kwas linolowy – Linoleic acid														
0	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104
20	105	105	105	109	112	111	107	109	108	107	107	107	109	108
40	105	107	106	105	108	107	105	108	108	107	105	105	108	107
60	115	107	111	109	112	111	119	112	112	111	119	119	110	112
Średnia – Mean	107	106	106	107	109	108	107	107	109	108	107	107	107	107
NIR <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 4,1; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.;														
III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.														
Kwas α-linolenowy – α-linolenic acid														
0	120	119	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	119	120
20	119	119	119	119	124	121	119	124	121	121	119	119	121	120
40	123	122	123	122	121	122	123	122	122	122	123	123	121	122
60	118	123	121	122	121	122	120	122	122	122	120	120	121	121
Średnia – Mean	120	121	121	121	121	121	120	121	121	121	120	120	122	121
NIR <sub>0,05</sub> : I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 4,24; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – 2,64; III × I – 3,02; II × III – n.i.–n.s.;														
III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.														

cd. tabeli 31 – Table 31 continued

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Kwas eikozenowy – Eicosenoic acid								
0	81	80	81	81	81	81	81	81	81
20	85	91	88	83	83	83	84	87	86
40	82	81	82	83	86	85	83	84	83
60	87	84	86	90	84	87	89	84	86
Średnia – Mean	84	84	84	84	83	84	84	84	84
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> :	I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – 2,06; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – 2,32; III × I – 2,86; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.								
	Kwas oleinowy – Oleic acid								
0	229	224	227	224	222	223	226	223	224
20	226	221	224	225	226	225	225	224	224
40	221	221	221	233	225	229	227	223	225
60	233	220	226	226	227	227	229	224	226
Średnia – Mean	226	222	224	227	225	226	227	223	225
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> :	I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – n.i.–n.s.; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.								
	Kwas palmitynowy – Palmitic acid								
0	30	30	30	30	30	30	30	30	30
20	29	29	29	30	31	31	30	30	30
40	30	30	30	30	30	30	30	30	30
60	30	31	31	31	30	30	30	30	30
Średnia – Mean	30	30	30	30	30	30	30	30	30
NIR <sub>0,05</sub> – LSD <sub>0,05</sub> :	I – n.i.–n.s.; II – n.i.–n.s.; III – n.i.–n.s.; I × II – n.i.–n.s.; II × I – n.i.–n.s.; I × III – n.i.–n.s.; III × I – n.i.–n.s.; II × III – n.i.–n.s.; III × II – n.i.–n.s.; I × II × III – n.i.–n.s.								

n.i. – n.s. – różnice nieistotne – non-significant differences

Wyniki wielu badań świadczą o tym, że tłuszcze nasycone, tak zwierzęce, jak i roślinne, stwarzają ryzyko powstawania chorób serca, zwłaszcza choroby wieńcowej, wpływając na wzrost poziomu cholesterolu w osoczu krwi, a zwłaszcza jego frakcji LDL (*Low Density Lipoproteins* – niskocząsteczkowe lipoproteiny). Ograniczając spożycie tłuszczów ogółem, należy zachować równowagę, aby nie redukować udziału bardziej pożądanej, wysokocząsteczkowej frakcji HDL (*High Density Lipoproteins*), a zwłaszcza niezbędnych wielonienasyconych kwasów tłuszczowych (NNKT), które obok innych ważnych funkcji spełniają rolę nośnika dla rozpuszczalnych w nich witamin A, E i K (Jerzewska i Ptasznik 2000).

Przeprowadzone badania wykazały, że w profilu kwasów tłuszczowych oleju gorczycznego ilościowo dominował kwas erukowy ( $C_{22:1}$ ) (średnio –  $413 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  oleju). Stwierdzona w badaniach własnych, a także przez Paszkiewicz-Jasińską (2005), bardzo wysoka zawartość tego kwasu uniemożliwia wykorzystanie oleju gorczycznego do celów konsumpcyjnych. Dla porównania – dostarczane do punktów skupu nasiona rzepaku nie mogą zawierać więcej niż do  $20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  kwasu erukowego w oleju (Bartkowiak-Broda i in. 2005). Olej z nasion gorczycy, pozyskiwany w warunkach tłoczenia na zimno, jest wykorzystywany w przemyśle kosmetycznym, farmaceutycznym, a także do celów technicznych (Toboła i Muśnicki 1999). Ze względu na całkowite zaniechanie uprawy wysokoerukowych odmian rzepaku w naszym kraju kwas erukowy jest importowany. W związku z tym wydaje się, że gorczyca może stać się alternatywnym źródłem oleju o wysokiej zawartości tego kwasu.

Jednym z warunków poprawy wartości gorczycy jako rośliny oleisto-białkowej jest jej uszlachetnianie poprzez wyhodowanie nowych odmian podwójnie ulepszonych, to jest bezerukowych i niskoglukozynolanowych. W 2006 roku zarejestrowano pierwszą odmianę niskoerukową ‘Bamberka’. Zaawansowane są prace nad otrzymaniem odmian dwuzerowych, równolegle prowadzi się selekcję nasion w kierunku podwyższenia zawartości tłuszczu i białka (Sawicka i Kotiuk 2007). Można sądzić, że wyhodowanie tych odmian otworzy nowe możliwości wykorzystania nasion gorczycy do celów konsumpcyjnych i paszowych.

W profilu kwasów tłuszczowych w oleju gorczycznym drugim po kwasie erukowym pod względem ilościowego udziału był kwas oleinowy ( $C_{18:1}$ ) (średnio  $225 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  – tab. 31). Dla porównania – jego zawartość w nasionach rzepaku waha się w zależności od odmiany w granicach od 272 do  $337 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (Jędrzejak i in. 2005), a w bardzo cenionej oliwie z oliwek wynosi około  $770 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (Jerzewska i Ptasznik 2000).

Spośród pozostałych oznaczanych kwasów szczególne znaczenie mają należące do grupy witamin F kwasy:  $\alpha$ -linolenowy ( $C_{18:3}$ ) i linolowy ( $C_{18:2}$ ). Ich zawartość w nasionach gorczycy wynosiła średnio 121 i  $107 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (tab. 31). Kwasy te, w przeciwieństwie do kwasów nasyconych (np. palmitynowego  $C_{16:0}$ ) i jednonienasyconych (np. eikozenowego  $C_{20:1}$ ), które organizm człowieka samodzielnie syntetyzuje, muszą być dostarczone z dietą.

Ważnym wskaźnikiem jakości oleju jest odpowiedni stosunek zawartości kwasu linolowego do  $\alpha$ -linolenowego, który zapewnia prawidłową syntezę długo-

łańcuchowych wielonienasyconych kwasów tłuszczowych (NNKT) (Jerzewska i Ptasznik 2000). U współczesnych, podwójnie ulepszonych odmian rzepaku, wartość tego stosunku wynosi około 2:1, tymczasem badania żywieniowe wskazują, że powinna się mieścić w granicach od 3:1 do 6:1. W badaniach własnych dotyczących gorczycy proporcja ilościowa tych kwasów znacznie odbiegała od cytowanych danych dla rzepaku i wynosiła średnio 0,88:1. Należy jednak podkreślić, że dla obiektów nawożonych siarką wartości tego stosunku były wyższe niż dla obiektu kontrolnego i wynosiły średnio: 0,87:1 (0 kg·ha<sup>-1</sup>), 0,90:1 (20 kg·ha<sup>-1</sup>), 0,88:1 (40 kg·ha<sup>-1</sup>), 0,93:1 (60 kg·ha<sup>-1</sup>). Istnieje genetycznie uwarunkowana zależność pomiędzy zawartością 18-węglowych kwasów nienasyconych (oleinowego, linolowego i linolenowego), która jest determinowana aktywnością enzymów – denaturaz, przekształcających wiązania pojedyncze w podwójne pomiędzy dwoma atomami węgla w łańcuchu arylowym kwasu tłuszczowego (Kopcewicz i Lewak 2005).

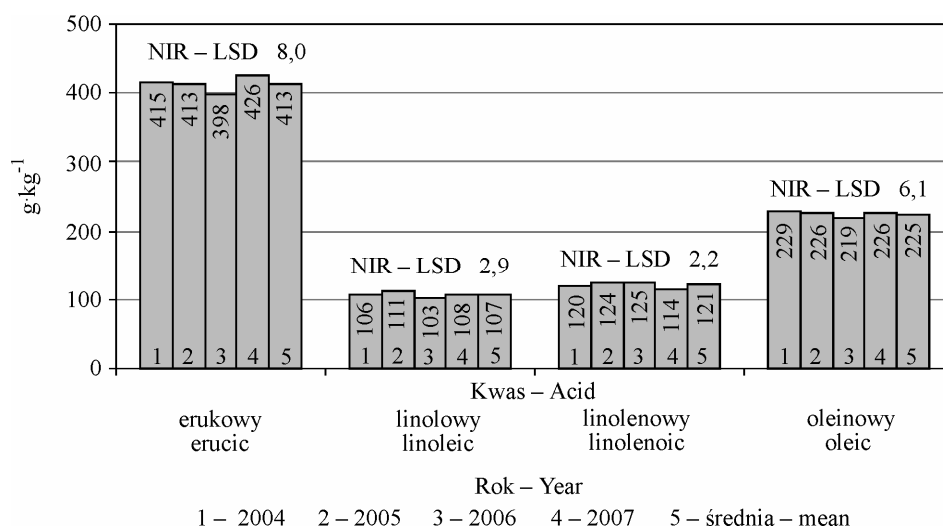
Sposób aplikacji siarki nie miał potwierdzonego statystycznie znaczenia dla kształtowania zawartości żadnego z oznaczanych kwasów, natomiast jej forma istotnie wpływała jedynie na kumulację kwasu erukowego – wyższą zawartość pozwalało osiągnąć zastosowanie postaci jonowej (tab. 31). Wzrastające dawki siarki powodowały niewielkie, ale potwierdzone statystycznie zwiększenie zawartości kwasów: erukowego, linolowego,  $\alpha$ -linolenowego i eikozenowego. W największym stopniu w wyniku zaopatrzenia roślin w ten składnik zmieniała się zawartość kwasu linolowego (różnica między obiektem nawożonym dawką 60 kg S·ha<sup>-1</sup> a kontrolnym – 7,7%), należącego – obok kwasu  $\alpha$ -linolenowego – do grupy kwasów hipocholesterolemicznych, pełniących ważną rolę w profilaktyce choroby wieńcowej oraz miażdżycy. Nie wykazano natomiast, podobnie jak w badaniach Krauze i Bowszys (2001) nad rzepakiem jarym, ale w przeciwieństwie do Kaczora i Kozłowskiej (2002), by siarka istotnie oddziaływała na zawartość kwasu oleinowego.

Wyniki badań własnych wskazują na niewielkie i na ogół nieudowodnione statystycznie różnice zawartości poszczególnych kwasów tłuszczowych w nasionach gorczycy wywołane nawożeniem siarką, co pozwala sądzić, że o ich udziale w lipidach przesądza przede wszystkim czynnik genetyczny, a nie środowiskowy. Rolę odmiany w kształtowaniu składu kwasów w oleju rzepakowym potwierdzają badania Jędrzejak i in. (2005) oraz Paszkiewicz-Jasińskiej (2005), dowodząc jednocześnie ograniczonego wpływu czynników agrotechnicznych. Zdaniem Krauze i Bowszys (2000), zawartość kwasów tłuszczowych w oleju rzepakowym w większym stopniu jest modyfikowana przez formę siarki i termin jej stosowania niż przez dawkę. W badaniach reakcji ozimych (Rotkiewicz i in. 1996) i jarych (Szulc i in. 2003) odmian rzepaku na nawożenie siarką wykazano, że może ono powodować obniżenie zawartości kwasu oleinowego w lipidach, jednocześnie na ogół korzystnie wpływając na wzrost ogólnej zawartości tłuszczu. Ahmad i Abdin (1999) w wyniku nawożenia gorczycy sarepskiej i kapusty polnej gipsem (CaSO<sub>4</sub>) stwierdzili obniżenie zawartości kwasu arachidowego (C<sub>20:0</sub>) i dokozanowego (C<sub>22:1</sub>), przy jednoczesnym podwyższeniu zawar-



tości kwasów oleinowego i linolowego. Badania Jacksona (2000) wykazały, że zawartość i wydajność oleju rzepakowego była ujemnie skorelowana z zawartością przyswajalnego azotu w glebie. Zdaniem Wielebskiego (2000) wpływ nawożenia azotem i siarką na zawartość tłuszczu w nasionach rzepaku ozimego jest niewielki, zwłaszcza w warunkach dużego deficytu wody.

Wyniki badań własnych, podobnie jak uzyskane przez Szulca i in. (2001), a także Paszkiewicz-Jasińską (2005), potwierdziły istotną rolę układu warunków wilgotnościowo-termicznych w kształtowaniu profilu kwasów tłuszczowych. Cytowani autorzy są zgodni co do tego, że susza niekorzystnie wpływa na kumulację lipidów w nasionach. Według Vasaka i in. (1997) (cyt. za Bartkowiak-Brodą i in. 2005) większe zaolejenie nasion, średnio o 1,3%, występuje w chłodnych latach o większej ilości opadów, mniejsze natomiast – w latach ciepłych. Zależność ta znalazła potwierdzenie w wynikach uzyskanych w 2006 roku, najbardziej suchym z lat, w których prowadzono badania. W nasionach gorczyicy wykazano istotnie niższe średnie zawartości kwasu erukowego, linolowego i oleinowego (rys. 30).



Rys. 30. Zawartość kwasów tłuszczowych w oleju z nasion gorczyicy w poszczególnych latach badań w zależności od dawki siarki

Fig. 30. Content of fatty acids in mustard seed oil in respective experiment years depending on the sulphur dose applied

## 5.7. BADANIA BIOLOGICZNE

Można sądzić, że spowodowane zróżnicowanym nawożeniem siarką zwiększenie zawartości azotu ogólnego oraz białkowego w ziarnie jęczmienia jarego oraz zmiany proporcji poszczególnych frakcji białkowych i składu aminokwasowego białka determinowały jego wartość odżywczą. Analiza składu aminokwasowego i frakcyjnego białka nie zawsze jednak stanowi podstawę do pełnej

oceny jego wartości żywieniowej. Wprawdzie metody chemiczne dają pogląd na wzajemne ilościowe relacje między frakcjami, a także aminokwasami; pozwalają też wnioskować, który aminokwas może ograniczać biosyntezę białka, znane są jednak doniesienia, zgodnie z którymi nie ma pełnej zgodności między oceną chemiczną i biologiczną wartości białka (Barczak 1999, Kotlarz 2000). Teoretycznie korzystne zmiany składu aminokwasowego nie zawsze bowiem znajdują pełne odzwierciedlenie w praktycznych efektach żywieniowych z uwagi na ograniczoną przyswajalność niektórych aminokwasów, szczególnie lizyny (Lubowicki i in. 2000), a także ze względu na rolę innych czynników w kształtowaniu wartości pokarmowej paszy, np. obecność błonnika lub zawartość związków antyżywniowych. Istnieje więc potrzeba prowadzenia doświadczeń na zwierzętach, których rezultaty – zdaniem wielu autorów (Rutkowska 1981, Barczak 1999, Kotlarz 2000) – stanowią najlepszą weryfikację chemicznej oceny białka i pozwalają na najpełniejsze oszacowanie jego potencjalnej wartości. Należy z całą mocą podkreślić, że w dostępnym piśmiennictwie jest bardzo niewiele wyników badań żywieniowych, które weryfikowałyby wartość biologiczną białka plonów o przeznaczeniu paszowym, uzyskanych w warunkach zróżnicowanego nawożenia siarką.

Badania żywieniowe dotyczyły wyłącznie jęczmienia jarego, gatunku uprawianego przede wszystkim na cele paszowe, którego ziarno stanowi główny składnik pasz treściwych. Badania na zwierzętach utrzymywanych na diecie, której głównym składnikiem było ziarno jęczmienia jarego, wykazały istotne zróżnicowanie takich mierników wartości białka, jak: strawność rzeczywista (TD – *True Digestibility*), wykorzystanie białka netto (NPU – *Net Protein Utilization*, wskaźnik będący miarą ilości azotu zatrzymanego w ustroju młodych szczurów), wartość biologiczna (BV – *Biological Value*, wskaźnik określający tę część wchłoniętego azotu, która została zatrzymana w ustroju w celu pokrycia potrzeb syntezy białka w okresie wzrostu, z uwzględnieniem poprawek na ilość azotu wydalonego z kałem i moczem w okresie karmienia dietą bezbiałkową) oraz wydajność wzrostowa białka (PER – *Protein Efficiency Ratio*, przyrost masy ciała zwierzęcia na 1 g spożytego białka) (tab. 32).

We wszystkich grupach doświadczalnych, którym podawano mieszanki z udziałem ziarna jęczmienia nawożonego siarką, stwierdzono wyższe wartości tych wskaźników w porównaniu z grupą kontrolną, co dowodzi dużej roli siarki w utrzymaniu dodatniego bilansu azotowego zwierząt doświadczalnych. Sposób aplikacji siarki wpływał jednak tylko na strawność rzeczywistą białka (TD) (dogłębowe stosowanie składnika istotnie podwyższało wartość tego parametru), a jej forma nie miała statystycznie potwierzonego działania. Czynnikiem działającym najsilniej była dawka siarki. Istotne różnice w stosunku do obiektu kontrolnego uzyskano w przypadku wartości biologicznej (BV) po zastosowaniu dawki 40 kg S·ha<sup>-1</sup> (przyrost wynosił 8,9%), a dla wykorzystania białka netto (NPU) – pod wpływem dawek 40 i 60 kg S·ha<sup>-1</sup> (odpowiednio: 13,6 i 13,4%). Wartości strawności rzeczywistej (TD) nie były istotnie różnicowane przez nawożenie siarką.

Tabela 32. Wskaźniki wartości odżywczej białka ziarna jęczmienia jarego – badania biologiczne, średnie z lat 2004-2007  
 Table 32. Nutritious value indicators of spring barley grain protein – biological experiment, means 2004-2007

Wskaźnik Indicator	Sposób aplikacji Application method (I)		Forma – Form (II)		Dawka – Dose [kg S·ha <sup>-1</sup> ] (III)			
	doglebowe nawożenie soil fertiliser	dolistne nawożenie soliar fertiliser	Siarkol	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0	20	40	60
Strawność rzeczywista białka True Digestibility (TD) [%]	82,4	79,1	78,4	79,7	80,2	82,1	81,7	82,9
	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	2,5	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	n.i.–n.s.	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	n.i.–n.s.	n.i.–n.s.	n.i.–n.s.
Wartość biologiczna Biological Value (BV) [%]	76,7	77,8	79,9	80,4	74,2	76,0	80,8	77,4
	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	n.i.–n.s.	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	n.i.–n.s.	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	n.i.–n.s.	5,9	
Wykorzystanie białka netto Net Protein Utilization (NPU) [%]	63,2	61,5	62,6	64,1	58,1	62,4	66,0	65,9
	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	n.i.–n.s.	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	n.i.–n.s.	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	n.i.–n.s.	5,1	
Współczynnik wydajności wzrostowej Protein Efficiency Ratio (PER)	1,64	1,57	1,55	1,52	1,55	1,70	1,67	1,64
	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	n.i.–n.s.	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	n.i.–n.s.	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	n.i.–n.s.	0,11	
Standardowy współczynnik wydajności wzrostowej Protein Efficiency Ratio Standard (PER <sub>stand</sub> )	1,71	1,64	1,61	1,58	1,61	1,77	1,74	1,71
	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	n.i.–n.s.	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	n.i.–n.s.	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	n.i.–n.s.	0,13	
Zużycie paszy na 1g przyrostu masy ciała Animal feed consumption per 1 g of the weight increase [g]	6,55	6,45	6,49	6,58	6,74	6,07	5,97	6,41
	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	n.i.–n.s.	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	n.i.–n.s.	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	n.i.–n.s.	n.i.–n.s.	n.i.–n.s.
Przyrost masy ciała w okresie prowadzenia badań Increase in the body weight during the research period [g]	86,73	81,44	81,99	82,44	78,89	79,26	86,55	82,23
	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	n.i.–n.s.	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	n.i.–n.s.	NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	n.i.–n.s.	4,32	

n.i. – n.s. – różnice nieistotne – non-significant differences

Wobec trudności z konfrontacją uzyskanych wyników z danymi literaturowymi z uwagi na brak publikacji dotyczących omawianej problematyki w dostępnym piśmiennictwie, z dużą ostrożnością można je odnieść do rezultatów badań nad wpływem nawożenia azotem na wartość odżywczą białka roślinnego.

Uzyskane wskaźniki badań biologicznych, oprócz wykorzystania białka netto (NPU), różnią się od przedstawionych przez Egguma i Juliano (1997). Autorzy dla białka ziarna zbóż wykazali, że wysokie dawki azotu powodują na ogół obniżanie wartości takich wskaźników, jak: TD (strawności rzeczywistej białka), BV (wartości biologicznej), PER (współczynnika wydajności wzrostowej), NPR (retencji białka netto). Intensywne nawożenie azotem, w przeciwieństwie do nawożenia siarką, powoduje bowiem niejednokrotnie niekorzystne dla wartości odżywczej ziarna zmiany składu frakcyjnego (Barczak 1995, Domska 1996) i aminokwasowego białka (Majcherczak i in. 2005), co może tłumaczyć taki kierunek zmian wartości omawianych wskaźników.

Zdaniem Rutkowskiej (1981), jakość białka jest determinowana przez stopień jego rozkładu enzymatycznego w toku procesu trawienia. Nawet najbardziej wartościowe białko nie zostanie bowiem wykorzystane przez organizm, jeżeli nie ulegnie całkowitemu strawieniu, a uwolnione aminokwasy nie zostaną wchłonięte w jelicie cienkim. Stosunek strawionej i wchłoniętej ilości białka do jego ilości spożytej z pożywieniem jest miarą strawności białka, która zależy m.in. od jego budowy III-rzędowej, warunkowanej obecnością mostków disulfidowych -S-S- (Rutkowska 1981). Wykazany w badaniach własnych wzrost strawności białka (TD), czyli podatności na działanie enzymów trawiennych w przewodzie pokarmowym, w przypadku ziarna jęczmienia jarego uzyskanego po nawożeniu siarką można wiązać ze stwierdzonym w warunkach nawożenia tym składnikiem zwiększeniem ilości prolamin (tab. 10). Frakcja ta, zlokalizowana w skrobiowej sferze bielma ziarniaka, jest znacznie lepiej przyswajalna przez zwierzęta niż białka występujące w komórkach aleuronowych i zarodku (albuminy i globuliny). Charakteryzuje się ona jednocześnie wyższą w porównaniu z białkami konstytucyjnymi zawartością kwasu glutaminowego i proliny, a niższą – lizyny, waliny, tyrozyny (Barczak i Nowak 1995). Przyrost udziału prolamin uzyskany w wyniku zastosowania siarki nie był jednak na tyle duży (różnica między obiektem nawożonym dawką  $60 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$  a obiektem kontrolnym wynosiła średnio 7,1%), by spowodować znaczące obniżenie zawartości aminokwasów egzogennych w białku ziarna jęczmienia jarego. Wskazuje na to otrzymane w badaniach bilansowych zwiększenie wartości biologicznej białka (BV), zależnej od jego składu aminokwasowego. Wskaźnik BV jest miarą efektywności zaspokajania potrzeb budulcowych organizmu zwierząt doświadczalnych otrzymujących dietę zawierającą badane białko. Na podstawie bilansu azotu określono, jaka część azotu aminokwasów uwolnionych z danego białka w przewodzie pokarmowym została w organizmie zatrzymana w postaci nowo zbudowanych białek, a jaka wydalona z kałem i moczem. Można sądzić, że uzyskane w przeprowadzonych badaniach zmiany wartości biologicznej białka (BV) ziarna jęczmienia jarego są konsekwencją wzrostu udziału w białku frakcji boga-

tych w aminokwasy egzogenne, czyli albumin i globulin. Korzystne zmiany składu frakcyjnego białka ziarna jęczmienia jarego wykazane po zastosowaniu siarki znalazły potwierdzenie w zmianach jego składu aminokwasowego, o czym świadczyło osiągnięte w tych warunkach zwiększenie zawartości wielu aminokwasów, w szczególności – egzogennych. Korzystne dla wartości odżywczej białka zmiany jego właściwości potwierdza też analiza odpowiednich wskaźników: wskaźnika aminokwasu ograniczającego (CS) oraz zintegrowanego wskaźnika aminokwasów egzogennych (EAAI). Analiza wartości wskaźników CS (tab. 18) wykazała, że pierwszym aminokwasem ograniczającym syntezę białka u wszystkich badanych gatunków roślin była zawierająca siarkę metionina, której zawartość determinowało istotnie nawożenie siarką (tab. 13-15).

Ostateczną weryfikację oddziaływania siarki na wartość odżywczą białka ziarna jęczmienia jarego uzyskano w wyniku analizy wartości wskaźnika wydajności wzrostowej (PER), wyrażającego wielkość przyrostu masy ciała rosnących zwierząt doświadczalnych w stosunku do ilości spożytego przez nie białka. Zastosowanie w żywieniu szczurów laboratoryjnych mieszanek doświadczalnych z ziarnem jęczmienia jarego z obiektów nawożonych dawkami 40 i 60 kg S·ha<sup>-1</sup> zwiększyło przyrosty masy ciała zwierząt w okresie doświadczalnym (28 dni) w porównaniu z obiektem kontrolnym, średnio w gramach na zwierzę, odpowiednio o: 7,66 g (9,7%) i 4,34 g (5,5%). Dla porównania – Jones i in. (1982) w badaniach dotyczących owiec stwierdzili, że zastosowanie siarki w uprawie życicy wielokwiatowej spowodowało zwiększenie dziennych przyrostów masy jagniąt żywionych paszą z obiektów doświadczalnych – z 32 g do 84 g.

Mimo że jęczmień jary nie jest zaliczany do gatunków siarkolubnych, wykazano wyraźny wpływ siarki na jakość białka jego ziarna. Jej uwzględnienie w nawożeniu tego gatunku, dzięki pozytywnemu oddziaływaniu na ilość i wartość biologiczną białka, potwierdzonemu w badaniach chemicznych i biologicznych, zmienia istotnie w korzystnym kierunku wartości wskaźników wartości odżywczej. Istnieją zatem przesłanki, by uznać, że uwzględnienie siarki w agrotechnice zbóż paszowych, zwłaszcza uprawianych w warunkach jej niedoboru, może zwiększać efektywność żywienia zwierząt i przyczyniać się do poprawy opłacalności produkcji zwierzęcej.

## 6. PODSUMOWANIE

Publikacja stanowi próbę kompleksowego opracowania roli siarki w nawożeniu roślin w odniesieniu do wybranych gatunków o zróżnicowanych wymaganiach pokarmowych w stosunku do tego składnika. Podjęte badania pozwoliły uzasadnić pogląd, iż nawożenie siarką oddziałuje nie tylko na wielkość plonu, ale i w sposób istotny decyduje o jego jakości, determinując zawartość makroskładników, w tym azotu, oraz skład białka roślinnego, a także zawartość niektórych metabolitów wtórnych.

Badania przeprowadzone na glebie o niskiej zasobności w siarkę dowodzą jej wyraźnego wpływu, niezależnie od badanych czynników, na wielkość i skład chemiczny plonów nie tylko łubinu wąskolistnego i gorczycy białej, gatunków uważanych za siarkolubne, ale i jęczmienia jarego – przedstawiciela grupy roślin o niewielkich wymaganiach w stosunku do tego składnika.

Wykazano wyższą efektywność plonotwórczą siarki stosowanej doglebowo przedsięwzięcie w porównaniu z jej aplikacją dolistną. Wpływ formy siarki na plon był niewielki: dla plonu ziarna jęczmienia jarego i nasion gorczycy nieco korzystniejszą od formy elementarnej okazała się postać jonowa ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), ale różnice na ogół nie były potwierdzone statystycznie. Spośród badanych czynników największy wpływ na plon nasion i słomy badanych gatunków roślin miała dawka siarki. Dla ziarna jęczmienia jarego i nasion łubinu zależność między dawkami siarki a wielkością plonu najlepiej opisywały równania regresji drugiego stopnia, a dla gorczycy – pierwszego stopnia. Z analizy równań regresji wynika, że maksymalny plon nasion jęczmienia jarego odpowiadał dawce  $38,50 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ , łubinu –  $41,75 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ , a gorczycy – około  $60 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Wykazano, że pozytywna reakcja plonu badanych gatunków roślin na nawożenie siarką była wyraźnie silniejsza w latach suchych. W przypadku łubinu i gorczycy najsłabsze plonotwórcze oddziaływanie siarki stwierdzono w roku 2004, w którym uzyskano najwyższe plony nasion tych gatunków. Stosunkowo duże zróżnicowanie reakcji plonów: ich wielkości i składu chemicznego w poszczególnych latach badań dowodzi, że ustalanie optymalnej dawki nawozowej siarki nie może być rozpatrywane w oderwaniu nie tylko od warunków glebowych, ale i klimatycznych panujących na danym obszarze.

Bardzo ważnym aspektem podjętych badań była ocena wpływu nawożenia siarką na zawartość i jakość białka, istotnego kryterium wartości paszowej, konsumpcyjnej i technologicznej plonów. Na podstawie analizy zawartości azotu białkowego i ogólnego w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorczycy, a także składu frakcyjnego i aminokwasowego białka stwierdzono na ogół dodatni wpływ nawożenia siarką na zawartość białka oraz na wskaźniki jego wartości biologicznej. Największe w porównaniu z obiektem kontrolnym zawartości obydwu form azotu w nasionach uzyskano po zastosowaniu najwyższej dawki ( $60 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), niezależnie od jej formy i sposobu aplikacji. Nawożenie  $40 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$  spowodowało istotne zwiększenie udziału azotu białkowego

w azocie ogólnym w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorzycy w stosunku do obiektu kontrolnego. Wskazuje to na intensyfikację biosyntezy białka wraz ze zwiększaniem zaopatrzenia roślin w siarkę i potwierdza bardzo ważną rolę tego składnika w metabolizmie azotu. Warto podkreślić, że dogłębowa aplikacja siarki na ogół bardziej niż jej zastosowanie dolistne sprzyjała zwiększeniu udziału azotu białkowego w ogólnej jego zawartości, będącemu miarą przemiany związków azotowych w białko.

Na dodatnie oddziaływanie siarki na jakość białka wskazuje również analiza jego składu frakcyjnego i aminokwasowego. Zastosowanie tego pierwiastka korzystnie zmienia w ziarnie jęczmienia jarego ilościową relację pomiędzy białkami konstytucyjnymi a zapasowymi, powodując rozszerzenie proporcji pomiędzy sumą zawartości albumin i globulin, frakcji stosunkowo bogatych w aminokwasy egzogenne, a sumą prolamin i glutelin, frakcji uboższych w te związki. Nawożenie siarką, bez względu na sposób aplikacji i formę, spowodowało zwiększenie, w porównaniu z obiektem kontrolnym, zawartości metioniny i leucyny w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorzycy. W białku ziarna jęczmienia jarego wykazano również istotny wzrost zawartości lizyny, izoleucyny, fenyloalaniny i tyrozyny, a w białku gorzycy – argininy, waliny i alaniny. Jedyńm aminokwasem, którego zawartość w białku jęczmienia jarego istotnie obniżała się w wyniku zastosowania siarki, była histydyna. Nawożenie tym składnikiem w najmniejszym stopniu modyfikowało skład aminokwasowy białka łubinu.

Niezbędność siarki w procesie biosyntezy białka nasion potwierdza analiza wartości wskaźnika aminokwasu ograniczającego (CS), która wykazała, że metionina, jedyny spośród oznaczanych aminokwas zawierający siarkę, w białku wszystkich badanych gatunków roślin pełniła taką rolę. Warto zwrócić uwagę, że średnie wartości  $CS_{met}$  białka ziarna jęczmienia jarego i nasion łubinu były znacznie niższe od wartości tego wskaźnika dla białka nasion gorzycy; może to wskazywać na duże znaczenie nawożenia siarką dla kształtowania ilości i jakości białka nasion gatunków z rodzin: *Poaceae* i *Fabaceae*.

Nawożenie siarką powodowało na ogół zwiększenie wartości wskaźników odżywienia roślin tym składnikiem, czyli zawartości siarki ogólnej i siarczanowej(VI) oraz udziału siarki siarczanowej(VI) w siarce ogólnej. Natomiast wartości stosunku N:S obniżały się pod wpływem wzrastających dawek siarki z uwagi na większe przyrosty zawartości siarki niż azotu w warunkach dobrego zaopatrzenia roślin w ten składnik. Należy podkreślić, że ziarno jęczmienia jarego w porównaniu z nasionami pozostałych badanych gatunków cechował wyraźnie niższy udział  $S_{SO_4}$  w  $S_{og.}$ , przy jednocześnie wysokim udziale azotu białkowego w jego ogólnej zawartości. Można zatem wnioskować o wyjątkowo wysokiej efektywności siarki w biosyntezie białka jęczmienia, który powszechnie zaliczany jest do gatunków o niewielkich wymaganiach w stosunku do tego składnika.

Warto nadmienić, że na wysoką plonotwórczą efektywność siarki oraz jej bardzo ważną rolę w metabolizmie azotu wskazują na ogół wysokie wartości współczynników korelacji obliczone pomiędzy plonem ziarna jęczmienia jarego

oraz nasion łubinu i gorczycy a zawartością w nich: azotu ogólnego, azotu białkowego, siarki ogólnej, a także udziałem siarki siarczanowej(VI) w całkowitej.

Należy podkreślić pozytywny wpływ nawożenia siarką na wartość odżywczą białka nasion, potwierdzony w stosunku do wszystkich badanych gatunków roślin w badaniach chemicznych, a dla ziarna jęczmienia jarego, uprawianego przede wszystkim w celach paszowych, również w badaniach biologicznych z udziałem zwierząt doświadczalnych. Ich celem była weryfikacja wartości biologicznej białka ziarna, oznaczonej wcześniej za pomocą metod chemicznych. Badania z wykorzystaniem młodych szczurów laboratoryjnych wykazały dla ziarna nawożonego siarką na ogół wyższe w porównaniu z obiektem kontrolnym wartości takich wskaźników, jak: TD (strawności rzeczywistej), BV (wartości biologicznej) i NPU (wykorzystania białka netto); dowodzi to dużej roli tego składnika w utrzymaniu dodatniego bilansu azotowego zwierząt doświadczalnych. Również wskaźnik wydajności wzrostowej (PER), wyrażający przyrost masy zwierząt w stosunku do ilości spożytego białka, był istotnie determinowany przez dawki siarki. Wprawdzie trudno skonfrontować otrzymane wyniki z literaturą przedmiotu z uwagi na niewielką liczbę danych dotyczących tej problematyki, jednak zakres przeprowadzonych badań wskazuje jednoznacznie na znaczącą rolę siarki w kreowaniu wartości żywieniowej ziarna jęczmienia jarego i upoważnia do twierdzenia, że uwzględnienie tego składnika w agrotechnice roślin o przeznaczeniu paszowym może przyczynić się do poprawy efektywności żywienia zwierząt.

O wartości odżywczej nasion w dużym stopniu decyduje ich skład pierwiastkowy, a ściślej – stosunki jonowe makroskładników. Wzrastające dawki siarki powodowały rozszerzenie proporcji  $K^+ : Mg^{2+}$ ,  $K^+ : Ca^{2+}$  oraz  $(K^+ + Na^+) : (Ca^{2+} + Mg^{2+})$ , mogące wskazywać na niezbyt korzystny kierunek zmian składu jonowego ziarna jęczmienia jarego oraz nasion łubinu i gorczycy ze względu na ich wartość paszową. Biorąc jednak pod uwagę fakt, że średnie wartości omawianych stosunków były niższe od uznawanych za optymalne, zastosowane nawożenie siarką zmieniło wartości omawianych stosunków w korzystnym dla żywienia zwierząt kierunku.

W nasionach gorczycy białej oznaczono zawartość metabolitów wtórnych: glukozyzolanów i kwasów tłuszczowych jako ważnych kryteriów jakości nasion roślin oleistych z rodziny *Brassicaceae*. Zastosowanie siarki, niezależnie od sposobu jej aplikacji i formy, powodowało podwyższanie zawartości ogólnej sumy glukozyzolanów, a zwłaszcza frakcji alkenowej, uważanej za szkodliwą dla zdrowia człowieka i zwierząt, która może obniżyć wartość technologiczną nasion gorczycy. Pod wpływem wzrastających dawek siarki uzyskano niewielkie, ale potwierdzone statystycznie zwiększenie zawartości kwasów: erukowego, linolowego, linolenowego i eikozenowego oraz stosunku zawartości kwasu linolowego do  $\alpha$ -linolenowego. Nie wykazano na ogół istotnego zróżnicowania zawartości oznaczanych metabolitów wtórnych w zależności od sposobu aplikacji i formy siarki.



## 7. WNIOSKI

1. Dawka siarki, niezależnie od badanego gatunku rośliny, istotnie determinowała ich plonowanie. W przypadku jęczmienia jarego oraz łubinu wąskolistnego najwyższe plony w stosunku do obiektu kontrolnego stwierdzono po zastosowaniu  $40 \text{ kg S}\cdot\text{kg}^{-1}$ , a dla gorczycy białej – po aplikacji  $60 \text{ kg S}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Dogłębne przedsięwzięcie zastosowanie siarki pozwalało uzyskać istotnie wyższe plony ziarna jęczmienia jarego i nasion gorczycy niż aplikacja dolistna. Efektywność plonotwórcza obydwu form siarki, zarówno jonowej, jak i elementarnej, była zbliżona dla badanych gatunków roślin.
2. Kryteria wartości odżywczej ziarna jęczmienia jarego oraz nasion łubinu i gorczycy, zwłaszcza zawartości azotu ogólnego i białkowego, ich ilościowy stosunek oraz plon białka ogólnego istotnie zależały od zastosowanej dawki siarki. Największe zawartości obydwu form azotu w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorczycy stwierdzono po zastosowaniu  $60 \text{ kg S}\cdot\text{kg}^{-1}$ , niezależnie od jej formy i sposobu aplikacji.
3. W ziarnie jęczmienia jarego w wyniku zastosowania wyższych dawek siarki wykazano istotne podwyższenie zawartości albumin, globulin i prolamin oraz niewielkie obniżenie glutelin, mające korzystny wpływ na zmianę proporcji między białkami konstytucyjnymi (albuminami i globulinami) i zapasowymi (prolaminami i glutelinami).
4. Sposób aplikacji siarki modyfikował istotnie w nasionach łubinu tylko zawartość metioniny, alaniny i seryny, a w nasionach gorczycy – leucyny i kwasu glutaminowego. Wyższej zawartości aminokwasów sprzyjało na ogół dolistne stosowanie siarki. Jej forma nie miała istotnego wpływu na kształtowanie składu aminokwasowego białka ziarna jęczmienia jarego oraz nasion łubinu i gorczycy. Zastosowane dawki siarki powodowały w porównaniu z obiektem nienawożonym na ogół istotne zwiększenie zawartości większości aminokwasów w białku, a także mierników jego wartości biologicznej: wskaźnika aminokwasu ograniczającego (CS) oraz zintegrowanego wskaźnika aminokwasów egzogennych (EAAI). Metionina pełniła rolę aminokwasu ograniczającego dla białka ziarna jęczmienia jarego oraz nasion łubinu i gorczycy.
5. Analiza badanych wskaźników stanu odżywienia roślin siarką (zawartości siarki ogólnej i siarczanowej(VI), ich proporcji ilościowej oraz wartości stosunku N:S) wykazała, że były one na ogół istotnie determinowane wielkością dawki tego składnika. Jęczmień jary wyróżniał się – w porównaniu z pozostałymi badanymi gatunkami roślin – niskim udziałem siarki siarczanowej(VI) w siarce ogólnej oraz wysokim udziałem azotu białkowego w azocie ogólnym. Może to wskazywać na wyjątkowo wysoką efektywność siarki w biosyntezie białka tego gatunku.

6. Dawka siarki była jedynym czynnikiem istotnie modyfikującym zawartość metabolitów wtórnych (glukozynolanów i kwasów tłuszczowych) w nasionach gorzycy białej. Zastosowanie tego składnika powodowało większy przyrost zawartości form alkenowych glukozynolanów niż ich sumy całkowitej. Spośród oznaczonych metabolitów wtórnych, aplikacja siarki w największym stopniu zwiększała zawartości sinalbiny oraz kwasu linolowego.
7. Badania biologiczne na szczurach laboratoryjnych wykazały istotnie wyższe wskaźniki wartości odżywczej białka (wykorzystania białka netto – NPU, wartości biologicznej – BV oraz wskaźnika wydajności wzrostowej – PER) ziarna jęczmienia jarego uzyskanego z obiektów nawożonych siarką w porównaniu z ziarnem z obiektów kontrolnych. Analiza wartości tych wskaźników dowodzi dużej roli siarki w utrzymaniu dodatniego bilansu azotowego zwierząt doświadczalnych. Uwzględnienie tego składnika w nawożeniu gatunków o przeznaczeniu paszowym może więc przyczynić się do wzrostu efektywności żywienia zwierząt.

## LITERATURA

- [1] Adamczewski K., Matysiak K., 2002. Klucz do określania faz rozwojowych roślin jedno- i dwuliściennych w skali BBCH. IOR, Główny Inspektorat Inspekcji Ochrony Roślin i Nasiennictwa.
- [2] Ahmad A., Abdin M.Z., 1999. Interactive effect on sulphur and nitrogen on the oil and protein contents and on the fatty acid profiles of oil in the seeds of rapeseed (*Brassica campestris* L.) and mustard (*Brassica juncea* L. Czern. and Coss.). J. Agron. Crop Sci. 185(1), 49-54.
- [3] Ahmad A., Abdin M.Z., 2000. Effect of sulphur application on lipid, RNA and fatty acid content in developing seeds of rapeseed (*Brassica campestris* L.). Plant Sci. 150, 71-76.
- [4] Ahmad A., Abrol Y.P., Abdin M.Z., 1999. Effect of split application of sulphur and nitrogen on growth and yield attributes of *Brassica* genotypes differing in time of flowering. Can. J. Plant Sci. 79(2), 175-180.
- [5] Asare E., Scarisbrick D.H., 1995. Rate of nitrogen and sulphur fertilizers on yield, yield components and seed quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.). Field Crops Res. 44, 41-46.
- [6] Aulakh M.S., Dev G., 1978. Interaction effect of calcium and sulphur on growth and nutrient composition of alfalfa (*Medicago sativa* L. Pers) using <sup>35</sup>S. Plant Soil 50, 125-134
- [7] Aulakh M.S., Pasricha N.S., 1977. Interaction effect of sulphur and phosphorus on growth and nutrient content of moong (*Phaseolus aureus* L.). Plant Soil 47, 341-350.
- [8] Aulakh M.S., Pasricha N.S., Sahota N.S., 1980. Yield, nutrient concentration and quality of mustard crops as influenced by nitrogen and sulphur fertilizers. J. Agric. Sci. Camb. 94, 545-549.
- [9] Barczak B., 1995. Wpływ nawożenia azotem na jakość białka ziarna jęczmienia ozimego. Cz. I. Frakcje białkowe. Roczn. Nauk Rol. A 111(1/2), 85-98.
- [10] Barczak B., 1999. Rola nawożenia azotem w kształtowaniu wartości biologicznej białka ziarna jęczmienia ozimego. Roczn. Nauk Rol. A 114, 205-218.
- [11] Barczak B., Majcherczak E., 2008. Effect of varied fertilization with sulphur on selected spring barley yield structure components. J. Cent. Europ. Agric. 9(4), 777-784.
- [12] Barczak B., Nowak K., 1995. Wpływ nawożenia azotem na jakość białka ziarna jęczmienia ozimego. Cz. II. Skład aminokwasowy frakcji białkowych. Roczn. Nauk Rol. A 111(1/2), 99-116.
- [13] Barczak B., Nowak K., 1998. Wpływ nawożenia azotem oraz przedplonu na jakość białka ziarna jęczmienia ozimego. Cz. II. Skład aminokwasowy białka. Roczn. Nauk Rol. A 113(1/2), 43-58.
- [14] Bartkowiak-Broda I., Wałkowski T., Ogrodowczyk M., 2005. Przyrodnicze i agrotechniczne możliwości kształtowania jakości nasion rzepaku. Pam. Puł. 139, 7-25.

- [15] Bell C., Jones J., Franklin J., Milford G., Leigh R., 1995. Sulphate supply and its effects on sap quality during growth in sugar beet storage roots. *Z. Pflanzernähr. Bodenk.* 158, 93-95.
- [16] Bertilsson G., 1994. Effect of sulphur fertilization on oilseed drops and cereals in Sweden. *Norw. J. Agric. Sci.* 15, 111-118.
- [17] Blake-Kalff M., Harrison K., Hawkesford J., Zhao F., Mc Grath S., 1998. Distribution of sulphur within oilseed rape leaves in response to sulphur deficiency during vegetative growth. *Plant Physiol.* 118, 1337-1344.
- [18] Blake-Kalff M., Zhao F.J., McGrath S.P., 2003. Sulphur deficiency diagnosis using plant tissue analysis. *Fertilizers Fertilization* 3, 5-25.
- [19] Blaschke W., 1999. Węgiel kamienny w Polsce na tle górnictwa w świecie. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* 15(3), 5-28.
- [20] Bloem E., Haneklaus E., Schnug E., 2001. Significance of the sulphur nutrition for the pharmaceutical quality of medicinal plants. *Proc. Fertilization in the Third Millenium – Fertilizer, Food Security and Environmental Protection*, 12 World Fertilizer Congress of CIEC, 1573-1580.
- [21] Bloem E., Haneklaus E., Schnug E., 2004. Influence of nitrogen and sulphur fertilization on the alliin content of onions and garlic. *J. Plant Nutr.* 27(10), 1827-1839.
- [22] Bloem E., Haneklaus E., Schnug E., 2005. Relation between total sulphur analysed by ICP-AES and glucosinolates in oilseed rape and Indian Mustard seeds. *Landbauforschung Völkenrode* 4(55), 205-210.
- [23] Booth E., Batchelor S.E., Walker K.C., 1995. The effect of foliar sulphur on individual glucosinolates in oilseed rape seed. *Z. Pflanzenernähr. Bodend.* 158, 87-88.
- [24] Boreczek B., 2001. Bilans siarki w uprawie wybranych roślin polowych. *Fragm. Agron.* 4, 118-133.
- [25] Brodowska M., 2003. Wpływ wapnowania i nawożenia siarką na wzrost, rozwój i plonowanie jarych form pszenicy i rzepaku. Cz. I. Pszenica jara. *Acta Agrophys.* 1(4), 617-622.
- [26] Brodowska M., 2004. Wpływ nawożenia siarką na zawartość azotu w roślinach w warunkach zróżnicowanego zaopatrzenia gleby w wapń i magnez. *Ann. Univ. Mariae Curie Skłodowska, Sect. E, Agricultura* LIX(4), 1861-1869.
- [27] Brodowska M., Kaczor A., 2002. Skład kationowy roślin uprawianych w warunkach zróżnicowanego zaopatrzenia gleby w magnez, wapń i siarkę. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 484, 61-67.
- [28] Brodowska M., Kaczor A., 2003. Wpływ nawożenia siarką i wapnowania na skład anionowy pszenicy i rzepaku. *Fertilizers Fertilization* 4, 92-103.
- [29] Brown L., Scholefield D., Jewkes E.C., Preedy N., Wadge K., Butler M., 2000. The effect of sulphur application on the efficiency of nitrogen use in two contrasting grassland soils. *J. Agricult. Sci. (Cambridge)* 135, 131-138.

- [30] Budzyński W., Jankowski K., 2001. Wpływ nawożenia siarką, magnezem i azotem na wzrost, rozwój i plonowanie gorzycy białej i sarepskiej. *Rośl. Oleiste XXII*, 45-58.
- [31] Byers M., Bolton J., 1979. Effects of nitrogen and sulphur fertilisers on the yield, N and S content and amino acid composition of the grain of spring wheat. *J. Sci. Food Agric.* 30, 251-263.
- [32] Cacak-Pietrzak H., Ceglińska A., Haber L., Lisiecki M., Podleśna A., 2004. Wpływ różnych parametrów nawożenia azotem i siarką na parametry jakościowe ziarna pszenicy. *Prz. Zboż.-Młyn.* 5, 28-30.
- [33] Ceccotti S.P., Morris R.J., Messick D.L., 1998. A global overview of the sulphur situation: industrial background, market trends, and commercial aspects of sulphur fertilizers. [W:] *Sulphur in agrosystems*, E. Schnug (red.), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 175-202.
- [34] Cofala J., Amann M., Gyarfás F., Schoepp W., Boudri J., Hordijk L., Krocze C., Junfeng L., Dai Lin, Panwar T., Gupta S., 2004. Cost-effective control of SO<sub>2</sub> emissions in Asia. *J. Environ. Manag.* 72, 149-161.
- [35] Cyna K., Grzebisz W., 2003. Wpływ nawożenia siarką elementarną na zawartość siarczanów w glebie i plonowanie rzepaku ozimego. *Fertilizers Fertilization* 4, 104-116.
- [36] Domska D., 1996. Porównanie wpływu doglebowego i dolistnego nawożenia azotem i miedzią na zawartość białka w ziarnie pszenicy ozimej i jego jakość. *Acta Acad. Agricult. Tech. Olst., Agricultura* 63, 97-105.
- [37] Drozdowska L., 1994. Rola biologiczna glukozyolanów. *Post. Nauk Rol.* 5, 63-76.
- [38] Eggum B.O., Juliano B.O., 1997. Properties and protein quality in growing rats of a low-glutelin content rice mutant. *Cereal Chem.* 74(3), 200-201.
- [39] Eriksen J., Mortensen J.V., 2002. Effects of timing of sulphur application on yield, S-uptake and quality of barley. *Plant Soil* 242, 283-289.
- [40] Eriksen J., Nielsen M., Mortensen J., Schjorring J., 2001. Redistribution of sulphur during generative growth of barley plants with different sulphur and nitrogen status. *Plant Soil* 230, 239-246.
- [41] Fečenko J., Ložek O., 1999. Ecological and economic aspects of spring barley nitrogenous fertilization. *Zesz. Nauk. AR w Krakowie, Sesja Nauk.* 64, 67-71.
- [42] Figas A., Drozdowska L., Sadowski C., 2008. Zależność między nawożeniem siarką a zawartością glukozyolanów i zasiedleniem nasion rzepaku jarego 'Margo' przez *Alternaria brassicae*. *Acta Sci. Pol., Agricultura* 7(3), 43-52.
- [43] Filipek T., 1987. Wyczerpiecie kompleksu sorpcyjnego gleby kationami oraz równowaga jonowa w roślinach w warunkach zróżnicowanego nawożenia azotem i potasem. *Rozpr. Nauk.* 104, AR w Lublinie.
- [44] Filipek-Mazur B., Gondek K., Mazur K., 2006. Wpływ nawożenia siarką na plonowanie oraz zawartość siarki i azotanów(V) w gorzycy białej. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 513, 99-106.

- [45] Fismes J., Vong P.C., Guckert A., Frossard E., 2000. Influence of sulphur on apparent N-use efficiency, yield and quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown on a calcareous soil. *Europ. J. Agron.* 12, 127-141.
- [46] Fotyma E., 2003. Wpływ nawożenia siarką na wykorzystanie azotu z nawozów mineralnych przez rośliny uprawy polowej. *Fertilizers Fertilization* 4, 117-136.
- [47] Gaines T.P., Phatak S.C., 1982. Sulphur fertilization effects on the constancy of the protein N:S ratio in low and high sulphur accumulating crops. *Agron. J.* 74, 415-418.
- [48] Ganeshamurthy A.N., Reddy K.S., 2000. Effect of integrated use farmyard manure and sulphur in a soybean and wheat cropping system on nodulation, dry matter production and chlorophyll content of soybean on swell-shrink soils in central India. *J. Agron. Crop Sci.* 185, 91-97.
- [49] Gawęcki J. (red.), 2003. Białka w żywności i żywieniu. Wyd. AR w Poznaniu.
- [50] Girma K., Mosali J., Freeman K.W., Raun W.R., Martin K.L., Thomason W.E., 2005. Forage and grain yield response to applied sulphur in winter wheat as influenced by source and rate. *J. Plant Nutr.* 28, 1541-1553.
- [51] Goźliński H., 1970a. Działanie nawozowe siarki ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) przy różnych poziomach nawożenia roślin azotem. Cz. I. Badania z owsem i jęczmieniem. *Rocz. Nauk Rol. A* 96(4), 133-148.
- [52] Goźliński H., 1970b. Działanie nawozowe siarki ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) przy różnych poziomach nawożenia azotem. Cz. II. Badania nad peluszką, bobem, koniczyną, gorczycą i ziemniakami. *Rocz. Nauk Rol. A* 97(1), 95-112.
- [53] Grant C.A., Johnston A.M., Clayton G.W., 2003. Sulphur fertilizer and tillage effects on early season sulphur availability and N:S ratio in canola in western Canada. *Can. J. Soil Sci.* 83(4), 451-462.
- [54] Griffiths M.W., Kettlewell P.S., Hocking T.J., 1995. Effects of foliar-applied sulphur and nitrogen on grain growth, grain sulphur and nitrogen concentrations and yield of winter wheat. *J. Agric. Sci.* 125, 331-339.
- [55] Grzebisz W., Fotyma E., 1996. Ocena odżywienia siarką rzepaku uprawianego w północno-zachodniej Polsce. *Rośl. Oleiste XVII*, 275-280.
- [56] Grzebisz W., Przygocka-Cyna K., 2000. Aktualne problemy gospodarowania siarką w rolnictwie polskim. [W:] Zbilansowane nawożenie rzepaku. Aktualne problemy, W. Grzebisz (red.), AR w Poznaniu, 64-77.
- [57] Grzebisz W., Przygocka-Cyna K., 2007. Spring malt barley response to elemental sulphur – the prognostic value of N and S concentrations in malt barley leaves. *Plant Soil Environ.* 53(9), 388-394.
- [58] Grześkowiak A., 2005. Kierunki zmian w asortymencie nawozów mineralnych. <http://www.ppr.pl/artukul.php?id=2905>
- [59] Halkier B.A., Gershenzon J., 2006. Biology and biochemistry of glucosinolates. *Ann. Rev. Plant Biol.* 57, 303-333.
- [60] Haneklaus S., Bloem E., Schnug E., 2000. Sulphur in agroecosystems. *Fol. Univ. Agric. Stetin., Agricultura* 81, 17-32.

- [61] Haneklaus S., Evans E., Schnug E., 1992. Baking quality and sulphur content of wheat. I. Influence of grain sulphur and protein concentrations on loaf volume. *Sulph. Agric.* 16, 31-35.
- [62] Haneklaus S., Paulsen H.M., Gupta A.K., Bloem E.A., Schnug E., 1999. Influence of sulphur fertilization on yield and quality of oilseed rape and mustard. *Proc. 10<sup>th</sup> Inter. Rapeseed Cong.* Canberra.
- [63] Hlušek J., Richter R., Hrivna L., 1999. Yields and quality of onions fertilised with nitrogen and sulphur. *Zesz. Nauk. AR w Krakowie, Sesja Nauk.* 64, 121-125.
- [64] Hoffmann Ch., Stockfisch N., Koch H.J., 2004. Influence of sulphur supply on yield and quality of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) – determination of a threshold value. *Europ. J. Agron.* 21(1), 69-80.
- [65] Hrivna L., Richter R., Ryant P., 1999. Possibilities of improving the technological quality of winter wheat after sulphur fertilization. *Zesz. Nauk. AR w Krakowie, Sesja Nauk.* 64, 143-150.
- [66] Inal A., Günes A., Alpaslan M., Adak M., Taban S., Eraslan F., 2003. Diagnosis of sulphur deficiency and effects of sulphur on yield and yield components of wheat grown in central Anatolia, Turkey. *J. Plant Nutr.* 26(7), 1483-1498.
- [67] Jabłoński E., 2000. Czynniki determinujące i modyfikujące wartość odżywcza białka. *Pediatrics Współczesna* 2(2), 83-87.
- [68] Jackson G., 2000. Effects of nitrogen and sulphur on canola yield and nutrient uptake. *Agron. J.* 92, 644-649.
- [69] Jakubus M., 2006. Siarka w środowisku. *Wyd. AR w Poznaniu.*
- [70] Jakubus M., Toboła P., 2005. Zawartość siarki ogólnej i siarczanowej w rzepaku ozimym w zależności od nawożenia. *Rośl. Oleiste XXVI*, 149-161.
- [71] Janzen H.H., Bettany J.R., 1984. Sulphur nutrition of rapeseed. I. Influence of fertilizer nitrogen and sulphur rates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48, 100-106.
- [72] Jerzewska M., Ptasznik S., 2000. Ocena występujących na rynku krajowym olejów rzepakowych pod względem zmienności składu kwasów tłuszczowych. *Rośl. Oleiste XXI*, 558-569.
- [73] Jędrzycka M., Podleśna A., Lewartowska E., 2002. Wpływ nawożenia azotem i siarką na zdrowotność roślin rzepaku ozimego. *Pam. Puł.* 130(I), 329-338.
- [74] Jędrzejak M., Kotecki A., Kozak M., Malarz W., 2005. Wpływ zróżnicowanych dawek azotu na profil kwasów tłuszczowych oleju rzepaku jarego. *Rośl. Oleiste XXV*, 139-148.
- [75] Jones M.B., Rendig V.V., Torrell D.T., Inouye T.S., 1982. Forage quality for sheep and chemical composition associated with sulphur fertilization on a sulphur deficient site. *Agron. J.* 74(5), 775-780.
- [76] Kaczor A., Brodowska M., 2002. Wpływ wapnowania i nawożenia siarką na zawartość azotu mineralnego w jarych formach pszenicy i rzepaku. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 484, 237-242.

- [77] Kaczor A., Brodowska M., 2003. Wpływ wapnowania i nawożenia siarką na wzrost, rozwój i plonowanie jarych form pszenicy i rzepaku. Cz. II. Rzepak jary. *Acta Agrophys.* 1(4), 661-666.
- [78] Kaczor A., Kozłowska J., 2002. Wpływ nawożenia siarką i wapnowania na ogólną zawartość tłuszczu i skład kwasów tłuszczowych w nasionach roślin krzyżowych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 482, 245-250.
- [79] Kaczor A., Łaszcz-Zakorczmenna J., 2003. Wpływ nawożenia siarką i potasem na plonowanie i zawartość różnych form siarki w jęczmieniu jarym. *Acta Agrophys.* 1(2), 239-244.
- [80] Kaczor A., Zuzañska J., 2009. Znaczenie siarki w rolnictwie. *Chem. Dydak. Ekol. Metr.* 14(1-2), 69-78.
- [81] Kalembasa S., Godlewska A., 2004. Metody diagnozowania potrzeb nawożenia siarką w zrównoważonym systemie nawożenia. *Diagnostyka gleb i roślin w rolnictwie zrównoważonym. Monografie 54*, Wyd. AP w Siedlcach, 59-81.
- [82] Klikocka H., 2004a. Nawożenie ziemniaka siarką. *Fragm. Agron.* 21, 3(83), 80-93.
- [83] Klikocka H., 2004b. Wpływ nawożenia siarką na plon i skład chemiczny ziarna pszenżyta jarego oraz właściwości gleby. *Fragm. Agron.* 22, 3(83), 70-78.
- [84] Kłobukowski J., Cichon R., Kozikowski W., 1993. Badania nad wpływem wieku, początkowej masy ciała, spożycia suchej masy diety na ilość wydalonego metabolicznego i endogenego azotu u szczurów. *Zwierzęta Labor.* 29/30, 1-2.
- [85] Kopcewicz J., Lewak S., 2005. *Fizjologia roślin*. PWN Warszawa.
- [86] Kotlarz A., 2000. Wartość pokarmowa nasion łubinów oraz wartość biologiczna białka zestawów zbożowo-łubinowych w badaniach na szczurach laboratoryjnych. [W:] *Zastosowania metod statystycznych w badaniach naukowych*. StatSoft Polska, Kraków, 1-13.
- [87] Kozłowska J., 2000. Wpływ nawożenia siarką i wapnowania na zmiany w składzie jonowym rzepaku jarego. [W:] *Zbilansowane nawożenie rzepaku. Aktualne problemy*, W. Grzebisz (red.), AR w Poznaniu, 211-216.
- [88] Krauze A., Bowszys T., 2000. Wpływ stosowania różnych technologii nawozów siarkowych na plonowanie i jakość rzepaku ozimego i jarego. *Folia Univ. Agric. Stetin., Agricultura* 81, 133-142.
- [89] Krauze A., Bowszys T., 2001. Wpływ terminu nawożenia siarką rzepaku jarego Star na plon nasion oraz zawartość siarki i tłuszczu. *Rośl. Oleiste* XXII, 285-290.
- [90] Król M., 1983. Występowanie w glebach i aktywność drobnoustrojów utleniających siarkę. *Pam. Puł.* 79, 46-58.
- [91] Krzywy J., Baran S., Krzywy E., 2002. Wpływ nawozów jednoskładnikowych i wieloskładnikowych na kształtowanie stosunków jonowych K:Mg, K:(Mg+Ca), Ca:P oraz N:S w roślinach uprawnych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 484, 317-323.



- [92] Kukuła S., Pecio A., Górski T., 1999. Związek pomiędzy wskaźnikiem klimatycznym bilansu wodnego a zawartością białka w ziarnie jęczmienia jarego. *Fragm. Agron.* XVI, 4(64), 81-89.
- [93] Kulczycki G., 2007. Wpływ siarki siarczanowej i elementarnej na plon i skład chemiczny roślin oraz właściwości chemiczne gleby. *Fragm. Agron.* 24, 1(93), 140-148.
- [94] Lefohn A., Husar J., Husar R., 1999. Estimating historical antropogenic global sulphur emission patterns for the period 1850-1990. *Atmosph. Environ.* 33, 3435-3444.
- [95] Lipiński W., Terelak H., Motowicka-Terelak T., 2003. Propozycja liczb granicznych zawartości siarki siarczanowej w glebach mineralnych na potrzeby doradztwa nawozowego. *Rocz. Gleb.* LIV(3), 79-84.
- [96] Lista odmian roślin rolniczych i warzywniczych wpisanych do krajowego rejestru odmian w Polsce, 2001. COBORU Słupia Wielka.
- [97] Lośak T., 2005. Response of onion (*Allium cepa* L.) to nitrogen and sulphur fertilization. *Veg. Crops Res. Bull.* 63, 67-75.
- [98] Lośak T., Hrivna 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.
- [99] Lośak T., Richter R., 2003. The influence of nitrogen and sulphur on the yield and oils content of winter rape. *Fertilizers Fertilization* 4, 160-168.
- [100] Lubowicki R., Kotlarz A., Petkov K., Jaskowska I., 1997. Ocena składu chemicznego i wartości biologicznej białka ziarna pszenżyta, pszenicy i żyta. *Zesz. Nauk. AR w Szczecinie, Rolnictwo* 65, 243-248.
- [101] Lubowicki R., Petkov K., Kotlarz A., Jaskowska I., 2000. Evaluation of protein quality in seeds of some legume varieties. *Rocz. Nauk Zoot.* 27(4), 247-260.
- [102] Łoginow W., Gulewicz K., Klupczyński Z., 1971. Analiza frakcyjna białek i perspektywy jej stosowania w ocenie jakościowej ziarna zbóż. *Pam. Puł.* 50, 117-126.
- [103] 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. (Cambridge)* 12, 653-62.
- [104] McGrath S.P., Zhao F.J., Blake-Kalff M.M., 2003. History and outlook for sulphur fertilizers in Europe. *Fertilizers Fertilization* 2(15), 5-27.
- [105] Majcherczak E., Kozera W., Barczak B., 2005. Wpływ wzrastającego nawożenia azotem na jakość białka ziarna jęczmienia ozimego. *Fragm. Agron.* 1(85), 493-502.
- [106] Marska E., Wróbel J., 2000. Znaczenie siarki dla roślin uprawnych. *Folia Univ. Agric. Stetin., Agricultura* 81, 69-76.
- [107] Michael G., Blume B., 1960. Über den Einfluss der Stickstoffdüngung auf die Eiweisszusammensetzung des Gerstenkornes. *Z. Pflernäh. Düng. Boden.* 88, 237-250.

- [108] Millard P., Sharp G.S., Scott N.M., 1985. The effect of sulphur deficiency on the uptake and incorporation of nitrogen in ryegrass. *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 105, 501-504.
- [109] Mitchell C.C., Mullins G.L., 1990. Sources, rates and time of sulphur application to wheat. *Sulph. Agric.* 14, 20-24.
- [110] Mitchell H.H., Block R.J., 1946. The correlation of the amino acid composition of proteins with their nutritive value. *Nutr. Rev. (F)* 16, 249-259.
- [111] Monaghan J.M., Scrimgeour C.M., Stein W.M., Zhao F.J., Evans E.J. 1999. Sulphur accumulation and re-distribution in wheat (*Triticum aestivum*): a study using stable sulphur isotope ratios as a tracer system. *Plant Cell and Environment* 22, 831-839.
- [112] Morris R.J., 2007. Sulphur in Agriculture. Global overview. *Fertiliz. Focus.* 1/2, 12-16.
- [113] Motowicka-Terelak T., Dudka S., 1991. Degradacja chemiczna gleb zanieczyszczonych siarką i jej wpływ na rośliny uprawne. *IUNG Puławy R(284)*, 1-95.
- [114] Motowicka-Terelak T., Terelak H., 1998. Siarka w glebach Polski – stan i zagrożenie. Biblioteka Monitoringu Środowiska, PIOŚ Warszawa.
- [115] Motowicka-Terelak T., Terelak H., 2000. Siarka w glebach i roślinach Polski. *Folia Univ. Agric. Stetin., Agricultura* 81, 7-16.
- [116] Murawa D., Pykało J., Konopka J., 1999. Zawartość glukozyolanów w nasionach gorczycy białej traktowanych herbicydami. *Rośl. Oleiste XX*, 267-270
- [117] Murphy M.D., 1990. Fifteen years of sulphur research in Ireland. *Sulph. Agric.* 14, 10-13.
- [118] Nowak L., Chylińska E., Kucharzewski A., 2005. Wpływ trzech rodzajów nawozu azotowego na skład chemiczny ziarna jęczmienia uprawianego na glebie lekkiej w warunkach deszczowania. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus* 4(2), 85-91.
- [119] Oleszek W., 1995. Glukozyolany – występowanie i znaczenie ekologiczne. *Wiad. Bot.* 39(1/2), 49-58.
- [120] Oser B.L., 1951. Method for integrating essential amino acid content in the nutritional evaluation of protein. *J. Am. Dietetic Ass.* 27, 396.
- [121] Paszkiewicz-Jasińska A., 2005. Wpływ wybranych czynników agrotechnicznych na rozwój gorczycy białej, plon i jego jakość. II. Wpływ nawożenia azotem i gęstości wysiewu na skład chemiczny nasion gorczycy białej. *Rośl. Oleiste XXVI*, 467-479.
- [122] Person P.J., 1994. Effect of sulphur fertilization on oilseed crops. *Norw. J. Agric. Sci.* 15, 143-147.
- [123] Phillips S.B., Mullins G.L., 2004. Foliar burn and wheat grain yield responses following topdress-applied nitrogen and sulphur fertilizers. *J. Plant Nutr.* 27(5), 921-930.
- [124] PN-EN ISO 5509:2001. Oleje i tłuszcze roślinne oraz zwierzęce. Przygotowanie estrów metylowych kwasów tłuszczowych. Katalog norm.

- [125] Podleśna A., 2004. Wpływ nawożenia siarką na zawartość i pobieranie składników pokarmowych przez rzepak ozimy. *Rośl. Oleiste XXV*, 627-636.
- [126] Podleśna A., 2005. Nawożenie siarką jako czynnik kształtujący metabolizm roślin uprawnych i jakość płodów rolnych. *Pam. Puł.* 139, 161-174.
- [127] Podleśna A., Cacak-Pietrzak G., 2006. Kształtowanie plonu oraz parametrów przemiałowych i wypiekowych pszenicy jarej poprzez nawożenie azotem i siarką. *Pam. Puł.* 142, 381-392.
- [128] Podleśna A., Cacak-Pietrzak G., Sowiński M., 2003. Reakcja pszenicy ozimej na nawożenie siarką w doświadczeniu polowym. *Fertilizers Fertilization* 4(17), 169-179.
- [129] Potarzycki J., 2004a. Rola siarki z superfosfatu prostego w nawożeniu jęczmienia jarego. Cz. I. Plon i jakość ziarna. *Fertilizers Fertilization* 4(17), 180-192.
- [130] Potarzycki J., 2004b. Rola siarki z superfosfatu prostego w nawożeniu jęczmienia jarego. Cz. II. Wykorzystanie azotu i siarki z nawozów. *Fertilizers Fertilization* 4(17), 193-205.
- [131] Potarzycki J., Grzebisz W., 2007. Effect of phosphoric fertilizers as a source of sulphur on malt barley total and technological grain yields. *Plant Soil Environ.* 53, 395-402.
- [132] Prusiński J., Kotecki A., 2006. Współczesne problemy produkcji roślin motylkowatych. *Fragm. Agron.* XXIII, 3(91), 96-126.
- [133] Przybylski Z., 2001. Problemy ochrony roślin występujące w agrocenozach zanieczyszczonych związkami siarki. *Post. Nauk Rol.* 2, 39-47.
- [134] Przygocka-Cyna K., Grzebisz W., 2006. Yield and technological quality of malting barley in response to elemental sulphur application. *Fertilizers Fertilization* 3, 28, 5-17.
- [135] Pyś J., Pucek T., 1993. Wartość pokarmowa roślin pastewnych uprawianych w rejonie składowiska siarki kopalni "Jeziórko". Cz. I. Podstawowy skład chemiczny roślin. *Arch. Ochr. Środ.* 1-2, 153-161.
- [136] Raney J.P., McGregor D.I., 1990. Determination of glucosinolate content by gas liquid chromatography of trimethylsilyl derivatives of desulfated glucosinolates. *Proc. of the Oil Crops Network, Shanghai, China, April* 21-23.
- [137] Raun W.R., Barreto H.J., 1992. Maize grain yield response to sulphur fertilization in central America. *Sulph. Agric.* 16, 26-30.
- [138] Richards I.R., 1990. Sulphur as a crop nutrient in the United Kingdom. *Sulph. Agric.* 14, 8-9.
- [139] Richter R., Hrivna L., 1999. The possibilities of increasing utilization of nitrogen by sulphur in winter rape. *Zesz. Nauk. AR w Krakowie, Sesja Nauk.* 64, 297-302.
- [140] Riley N.G., Zhao F.J., McGrath S.P., 2000. Availability of different forms of sulphur fertilisers to wheat and oilseed rape. *Plant Soil* 222, 139-147.
- [141] *Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polski, 2009. Ochrona środowiska i gospodarka wodna.* GUS Warszawa.

- [142] Rotkiewicz D., Murawa D., Konopka I., Warmiński K., 2000. Glukozy-nolany nasion dwóch odmian rzepaku jarego traktowanego herbicydami. Rośl. Oleiste XXI, 271-278.
- [143] Rotkiewicz D., Ojczyk T., Konopka I., 1996. Nawożenie siarką a wartość użytkowa i technologiczna nasion rzepaku ozimego. Rośl. Oleiste 17(1), 257-265.
- [144] Rutkowska U., 1981. Wybrane metody badania składu i wartości odżywczej żywności. PZWL Warszawa.
- [145] Sadowski Cz., Baturo A., Lenc L., Trzciński 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. Rośl. Oleiste XXIII(2), 391-408.
- [146] Salac I., Bloem E., Haneklaus S., Schnug E., 2003. Sulphur induced resistance (SIR). [W:] Zbilansowane nawożenie rzepaku. Aktualne problemy, W. Grzebisz (red.), AR w Poznaniu, 206-212.
- [147] Sator Ch., Rogasik J., Schnug E., 2002. Influence of sulfur nutrition on yield and dietary quality of lupin seeds. Proc. 10<sup>th</sup> Int. Lupin Conf., Laugarvatn, Iceland, 1-4.
- [148] Sawicka B., Kotiuk E., 2007. Gorczyce jako rośliny wielofunkcyjne. Acta Sci. Pol., Agricultura 6(2), 17-27.
- [149] Scherer H.W., 2001. Sulphur in crop production. Europ. J. Agron. 14, 81-111.
- [150] Schnug E., 1991. Sulphur national status of european crops and consequences for agriculture. Sulph. Agric. 15, 7-12.
- [151] Schnug E., 1997. Significance of sulphur for the quality of domesticated plants. [In:] Sulphur metabolism in higher plants. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, 109-130.
- [152] Schnug E., Haneklaus S., 1994. Ecological aspects of plant sulphur supply. Norw. J. Agric. Sci., Suppl. 15, 149-156.
- [153] Schnug E., Haneklaus S., 2000. Significance of interactions between sulphur nitrogen supply for growth and quality of crop plants. [In:] Sulphur nutrition and sulphur assimilation in higher plants, C. Brunold et al. (eds.), Paul Haupt, Bern, Switzerland, 345-347.
- [154] Schnug E., Haneklaus S., Murphy D., 1993. Impact of sulphur fertilization on fertilizer nitrogen efficiency. Sulph. Agric. 17, 8-12.
- [155] Scott N.M., Dyson P.W., Ross J., Sharp S., 1984. The effect of sulphur on the yield and chemical composition of winter barley. J. Agric. Sci. (Cambridge) 103, 699-702.
- [156] Singh B.R., 1994. Sulphur requirements for crop production in Norway. Norw. J. Agric. Sci. 35, 35-44.
- [157] Skowera B., Puła J., 2004. Skrajne warunki pluwiotermiczne w okresie wiosennym na obszarze Polski w latach 1971-2000. Acta Agrophys. 3(1), 171-177.

- [158] Smatanova M., Richter R., Klusek J., 2004. Spinach and pepper response to nitrogen and sulphur fertilization. *Plant Soil Environ.* 50, 303-308.
- [159] Sołek-Podwika K., Niemyska-Łukaszuk J., Ciarkowska K., 2005. Zasiarczenie gleb pól górniczych byłej kopalni siarki „Grzybów”. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 505, 399-405.
- [160] Spencer K., Freney J.R., 1980. Assessing the sulphur status of field grown wheat by plant analysis. *Agron. J.* 72, 469-472.
- [161] Stan środowiska Bydgoszczy w 2007 roku, 2008. Inspekcja Ochrony Środowiska, WIOŚ Bydgoszcz.
- [162] Stern D., 2005. Global sulphur emissions from 1850 to 2000. *Chemosphere* 58, 163-175.
- [163] Sujak A., Kotlarz A., Strobel W., 2006. Compositional and nutritional evaluation of several lupin seeds. *Food Chem.* 98(4), 711-719.
- [164] Szulc P., Drozdowska L., Kachlicki P., 2003. Effect of sulphur on the yield and content of glucosinolates in spring oilseed rape seeds. *EJPAU* 6(2), #01, <http://www.ejpau.media.pl/series/volume6/issue2/agronomy/art-01.html>
- [165] Szulc P., Wejnerowska G., Drozdowska L., Gaca J., 2001. Wpływ nawożenia siarką na zmianę zawartości wybranych kwasów tłuszczowych w nasionach rzepaku jarego. *Biul. Magn.* 6(1), 72-79.
- [166] Szulc W., 2008. Potrzeby nawożenia roślin siarką oraz metody ich wyznaczania. *Rozpr. Nauk. Monogr.* 332, SGGW w Warszawie.
- [167] Świdorska-Ostapiak M., Stankowski S., 2002. Wpływ nawożenia azotem i siarką na plonowanie i komponenty plonu owsa nieoplewionego i oplewionego. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 484, 711-717.
- [168] Święcicki W., Szukała J., Mikulski W., Jerzak M., 2007. Możliwości zastąpienia białka śrutu sojowej krajowymi surowcami. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 522, 515-521.
- [169] Terelak H., Piotrkowska M., Motowicka-Terelak T., Stuczyński T., Budzyńska K., 1995. Zawartość metali ciężkich i siarki w glebach użytków rolnych Polski oraz ich zanieczyszczenie tymi składnikami. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 418, 46-59.
- [170] Toboła P., Muśnicki Cz., 1999. Zmienność plonowania jarych roślin oleistych z rodziny krzyżowych. *Rośl. Oleiste* XX, 102-110.
- [171] Uziak Z., Szymańska M., 1987. Wpływ siarki na produktywność i wartość biologiczną wybranych roślin pastewnych. *Pam. Puł.* 89, 131-142.
- [172] Walker K., Booth E.J., 1994. Sulphur deficiency in Scotland and the effects of sulphur supplementation on yield and quality of oilseed rape. *Norw. J. Agric. Sci., Suppl.* 15, 97-104.
- [173] Walker K., Dawson C., 2003. Sulphur fertiliser recommendations in Europe. *Fertilizers Fertilization, Biogeochemistry of sulphur in agricultural systems, Part II. reprints from Inter. Fertilis. Soc. Proc.* 3, 71-84.
- [174] Wathelet J.P., 2004. Analysis of glucosinolates and their breakdown compounds. *Rośl. Oleiste* XXV, 41-50.

- [175] Wielebski F., 1997. Wpływ wzrastających dawek siarki na skład glukozyzolanów zawartych w nasionach dwóch odmian rzepaku ozimego. *Rośl. Oleiste* XVIII, 179-186.
- [176] Wielebski F., 2000. Siarka – nasilający się problem nawożeniowy rzepaku w Polsce. [W:] *Zbilansowane nawożenie rzepaku. Aktualne problemy*, W. Grzebisz (red.), AR w Poznaniu, 266-276.
- [177] Wielebski F., Muśnicki C., 1998. Wpływ wzrastających dawek siarki i sposobu jej aplikacji na plon i zawartość glukozyzolanów w nasionach dwóch odmian rzepaku ozimego w warunkach doświadczeń polowych. *Rocz. AR w Poznaniu* 303, 149-166.
- [178] Wielebski F., Wójtowicz M., 2003. Wpływ wiosennego nawożenia siarką na plon i zawartość glukozyzolanów w nasionach odmian mieszańcowych złożonych rzepaku ozimego. *Rośl. Oleiste* XXIV, 109-119.
- [179] Wielebski F., Wójtowicz M., Czernik-Kołodziej K., 2000. Ocena stanu zaopatrzenia w siarkę rzepaku uprawianego na polach doświadczalnych wybranych Zakładów Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin. *Rośl. Oleiste* XXI, 465-475.
- [180] Wieser H., Gutser R., von Tucher S., 2004. Influence of sulphur fertilization on quantities and proportions of gluten protein types in wheat flour. *J. Cereal Sci.* 40, 239-244.
- [181] Withers P.J.A., Tytherleigh A.R.J., O'Donnell F.M., 1995. Effect of sulphur fertilizers on the grain yield and sulphur content of cereals. *J. Agric. Sci.* 125, 317-324.
- [182] Withers P.J.A., Zhao F.J., McGrath S.P., Evans E.J., Sinclair A.H., 1997. Sulphur inputs for optimum yields of cereals. *Asp. Appl. Biol.* 50, 191-198.
- [183] *Zalecenia Ochrony Roślin*, 2004. IOR Poznań.
- [184] Zduńczyk Z., 1995. Glukozyzolanany rzepaku – wpływ na spożycie pasz, zdrowie i produktywność zwierząt oraz jakość produktów zwierzęcych. *Post. Nauk Rol.* 5, 41-52.
- [185] Zhao F.J., Bilsborrow P.E., Evans E.J., McGrath S.P., 1997a. Nitrogen to sulphur ratio in rapeseed and in rapeseed protein and its use in diagnosing sulphur deficiency. *J. Plant Nutr.* 20, 549-558
- [186] Zhao J.J., Evans E.J., Bilsborrow P.E., Syers J.K., 1993. Sulphur uptake and distribution in double and single low varieties of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Plant Soil* 150, 69-76.
- [187] Zhao F.J., Fortune S., Barbosa V.L., McGrath S.P., Stobart R., Bilsborrow P.E., Booth E.J., Brown A., Robson P., 2006. Effects of sulphur on yield and malting quality of barley. *J. Cereal Sci.* 43, 369-377.
- [188] Zhao F.J., Hawekesford M.J., McGrath S.P., 1999a. Sulphur assimilation and effects on yield and quality of wheat. *J. Cereal Sci.* 30, 1-17.
- [189] Zhao F.J., McGrath S.P., Blake-Kalff M.M., Link A., Tucker M., 2003. Crop responses to sulphur fertilization in Europe. *Fertilizers Fertilization* 3(16), 26-47.

- [190] Zhao F.J., McGrath S.P., Salmon S.E., Shewry P.R., Quayle R., Withers P.J., Evans E.J., Monaghan J., 1997b. Optimising sulphur inputs for bread-making quality of wheat. *Asp. App. Biol.* 50, 199-206.
- [191] Zhao F.J., Salmon S.E., Withers P.J., Evans E.J., Monaghan J.M., Shewry P.R., McGrath S.P., 1999b. Responses of breadmaking quality to sulphur in three wheat varieties. *J. Sci. Food Agric.* 79, 1865-1874.
- [192] Zhao F.J., Wood A.P., McGrath S.P., 1999c. Effects of sulphur nutrition on growth and nitrogen fixation of pea (*Pisum sativum* L.). *Plant and Soil* 212, 209-219.
- [193] Zhao F.J., Wood A.P., McGrath S.P., 1999d. Sulphur nutrition of spring peas. *Asp. Appl. Biol.* 56, 189-194.
- [194] Zúkalová H., Matula J., Kuchtová P., Mikšik V., 2001a. Influence of sulphur on the yield and quality of winter oilseed rape. *Rośl. Oleiste XXII*, 587-596.
- [195] Zúkalová H., Matula J., Vasák J., 2001b. Effect of sulphur fertilization upon biomass dry matter production dynamics and glucosinolate biosynthesis in three types of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Rośl. Oleiste XXII*, 273-284.

## SIARKA JAKO SKŁADNIK POKARMOWY KSZTAŁTUJĄCY WIELKOŚĆ I JAKOŚĆ PŁONÓW WYBRANYCH ROŚLIN UPRAWNYCH

### Streszczenie

W latach 2004-2007 przeprowadzono ściśle doświadczenia polowe w plodozmianie z trzema gatunkami roślin o zróżnicowanych wymaganiach pokarmowych w stosunku do siarki: jęczmieniem jarym (*Hordeum vulgare* L.), łubinem wąskolistnym (*Lupinus angustifolius* L.) i gorczycą białą (*Sinapis alba* L.). Doświadczenie założono metodą losowanych podbloków w układzie zależnym (split-plot), na glebie płowej typowej o niskiej zasobności w siarkę siarczany(VI). W doświadczeniu polowym uwzględniono następujące czynniki: sposób aplikacji siarki (czynnik I rzędu: dolistnie i przedsiewnie doglebowo), formę siarki (czynnik II rzędu: siarka elementarna w postaci Siarkolu Extra 80 WP i jonowa w postaci siarczanu(VI) sodu) oraz dawki siarki (czynnik III rzędu, w  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ : 0, 20, 40 (20+20), 60 (20+20+20)).

Przeprowadzone badania dowodzą wyraźnego oddziaływania siarki, niezależnie od badanych czynników, na wielkość i skład chemiczny plonu nie tylko łubinu wąskolistnego i gorzycy białej, gatunków uważanych za siarkolubne, ale i jęczmienia jarego – przedstawiciela grupy roślin o niewielkich wymaganiach w stosunku do tego składnika. Wykazano wyższą efektywność plonotwórczą siarki stosowanej doglebowo przedsiewnie w porównaniu z jej aplikacją dolistną. Wpływ formy siarki na kształtowanie plonu ziarna i nasion był niewielki. Spośród badanych czynników największy wpływ na plon badanych gatunków roślin miała dawka siarki. Zależność między dawkami siarki a wielkością plonu ziarna jęczmienia jarego i nasion łubinu najlepiej opisywały równania regresji drugiego stopnia, a dla nasion gorzycy – równanie pierwszego stopnia. Z ich analizy wynika, że maksymalny plon ziarna jęczmienia jarego odpowiadał dawce  $38,5 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ , nasion łubinu –  $41,7 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ , a nasion gorzycy – około  $60 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Pozytywna reakcja plonu badanych gatunków roślin na nawożenie siarką była wyraźnie silniejsza w latach suchych.

Wykazano na ogół dodatni wpływ nawożenia siarką na zawartość białka w ziarnie jęczmienia jarego oraz nasionach łubinu i gorzycy, a także na wskaźniki jego wartości biologicznej. Po zastosowaniu dawki  $40 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$  stwierdzono istotne w porównaniu z obiektem kontrolnym zwiększenie udziału azotu białkowego w azocie ogólnym w plonie wszystkich badanych gatunków roślin. Wskazuje to na intensyfikację biosyntezy białka wraz ze zwiększaniem zaopatrzenia roślin w siarkę i potwierdza bardzo ważną rolę tego składnika w metabolizmie azotu.

Wykazano ponadto, że zastosowanie siarki korzystnie zmienia w ziarnie i nasionach badanych gatunków roślin ilościową relację pomiędzy białkami konstytucyjnymi a zapasowymi, powodując rozszerzenie proporcji między sumą zawartości albumin i globulin, frakcji stosunkowo bogatych w aminokwasy egzo-



genne, a sumą prolamin i glutelin, frakcji uboższych w te związki. Nawożenie siarką, bez względu na sposób aplikacji i formę, powodowało istotny wzrost zawartości wielu aminokwasów w białku badanych gatunków roślin, a także mierników jego wartości biologicznej: wskaźnika aminokwasu ograniczającego (CS) oraz zintegrowanego wskaźnika aminokwasów egzogennych (EAAI). Wyższej zawartości aminokwasów sprzyjało na ogół dolistne stosowanie siarki, a jej forma nie miała istotnego wpływu na kształtowanie składu aminokwasowego białka ziarna jęczmienia jarego oraz nasion łubinu i gorczycy. Nawożenie siarką w najmniejszym stopniu – w porównaniu z pozostałymi badanymi gatunkami roślin – modyfikowało skład aminokwasowy białka łubinu.

Zastosowanie siarki powodowało na ogół zwiększenie wartości wskaźników odżywienia roślin tym składnikiem: zawartości siarki ogólnej i siarczanej(VI) oraz udziału siarki siarczanej(VI) w siarce ogólnej. Natomiast stosunek N:S pod wpływem wzrastających dawek siarki obniżał się. Ziarno jęczmienia jarego wyróżniało się na tle nasion pozostałych badanych gatunków roślin niskim udziałem siarki siarczanej(VI) w siarce ogólnej oraz wysokim – azotu białkowego w azocie ogólnym. Może to wskazywać na wyjątkowo wysoką efektywność siarki w biosyntezie białka tego gatunku.

Badania ziarna jęczmienia jarego nawożonego siarką wykonane na młodych szczurach laboratoryjnych wykazały na ogół wyższe w porównaniu z obiektem kontrolnym wartości takich wskaźników, jak: TD (strawność rzeczywista), BV (wartość biologiczna) i NPU (wykorzystanie białka netto). Dowodzi to dużej roli tego składnika w utrzymaniu dodatniego bilansu azotowego zwierząt doświadczalnych. Również wskaźnik wydajności wzrostowej (PER), wyrażający przyrost masy zwierząt w stosunku do ilości spożytego białka, był istotnie determinowany przez dawki siarki.

Spośród badanych czynników na ogół tylko dawka siarki istotnie modyfikowała zawartość metabolitów wtórnych (glukozynolanów i kwasów tłuszczowych) w nasionach gorczycy białej. Wykazano, że zastosowanie siarki powodowało większy przyrost zawartości form alkenowych glukozynolanów niż ich całkowitej sumy. Spośród oznaczonych metabolitów wtórnych, aplikacja siarki w największym stopniu zwiększała zawartość sinalbiny oraz kwasu linolowego.

## SULPHUR AS A NUTRIENT DETERMINING THE YIELD SIZE AND QUALITY OF SELECTED CROP SPECIES

### Summary

Over 2004-2007 strict field experiments were made in crop rotation with three crop species of varied nutrition requirements towards sulphur: spring barley (*Hordeum vulgare* L.), narrow-leaf lupin (*Lupinus angustifolius* L.) and white mustard (*Sinapis alba* L.). The experiment was set up with split-plot, on Haplic Luvisol of low richness in sulphate sulphur(VI). The field experiment covered the following factors: sulphur application method (the first order factor: foliar and pre-sowing into soil), form of sulphur (the second order factor: elementary sulphur in a form of Siarkol Extra 80 WP and ionic sulphur in a form of sodium sulphate(VI)), doses of sulphur (the third order factor, in  $\text{kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ : 0, 20, 40 (20+20), 60 (20+20+20)).

The research performed show a clear effect of sulphur, irrespective of the factors researched, on the size and chemical composition of yield of not only narrow-leaf lupin and white mustard, species considered sulphur-loving, but also spring barley, a representative of the group of plants of little requirements towards that nutrient. There was demonstrated a higher yield-forming effectiveness of sulphur introduced into soil pre-sowing, as compared with its foliar application. The effect of the form of sulphur on the grain and seed yield was inconsiderable. Of all the factors, the greatest effect on the yield of the crop species was found for the sulphur dose. The relationship between the sulphur doses and the yield of spring barley grain and lupin seed was best described with the regression equations of the second degree, and as for mustard seed – of the first degree. Their analysis shows that the maximum spring barley grain yield coincided with the dose of  $38.5 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ , lupin seed yield –  $41.8 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ , and mustard seed – about  $60 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ . The positive reaction of the yield of the plant species to sulphur fertilization was clearly stronger in dry years.

In general there was demonstrated a positive effect of sulphur fertilisation on the content of protein in spring barley grain as well as lupin and mustard seed, and on the indices of the biological value of protein. For the dose of  $40 \text{ kg S}\cdot\text{ha}^{-1}$ , as compared with the control, there was found a significant increase in the share of protein nitrogen in total nitrogen in the yield of all the plant species researched, which points to the intensification of the biosynthesis of protein together with an increase in the supply of plants with sulphur, which confirms a very important role of that nutrient in nitrogen metabolism.

It was demonstrated in the grain and seed of the plant species that the application of sulphur enhances the quantitative relationship between constitutional proteins and storage proteins, resulting a widening proportions between the total content of albumins and globulins, the fractions relatively rich in exogenous amino acids and total prolamins and glutelins, fractions poorer in those

compounds. Sulphur fertilisation, irrespective of the application method and the form, in general, resulted in a significant increase in the content of many amino acids in the protein of the plant species as well as the measurements of biological value of protein, such as: limiting amino acid index (LAI) and integrated essential amino acid index (IEAAI). A higher content of amino acids was, in general, enhanced by foliar application of sulphur and the form of sulphur did not have a significant effect on the amino acid composition of grain and seed protein of the plant species. Sulphur fertilization modified the amino acid composition of lupin protein least considerably, as compared with the crop species.

The application of sulphur, in general, increased the values of indices of the supply of plants with that nutrient: the contents of total and sulphate(VI) sulphur and the share of sulphate sulphur(VI) in total sulphur, while the N:S ratio, due to increasing sulphur doses, decreased. Spring barley grain, as compared with the seed of the other plant species, demonstrated a low share of sulphate sulphur(VI) in total sulphur and a high share of protein nitrogen in total nitrogen, which can point to an extremely high effectiveness of sulphur in the biosynthesis of protein of that species.

Research with young laboratory rats for the grain of spring barley fertilized with sulphur showed, in general, higher, as compared with the control, values of such indices as TD (true digestibility), BV (biological value) and NPU (net protein utilisation), which points to a considerable role of that nutrient in maintaining a positive nitrogen balance in experimental rats. Similarly the protein efficiency ratio (PER), expressing the animal body weight gain, as compared with the amount of protein consumed, was significantly determined by sulphur doses.

Of all the factors researched, in general, the sulphur dose was the only one which modified the content of secondary metabolites (glucosinolates and fatty acids) in white mustard seed significantly. It was shown that the application of sulphur resulted in a greater increase in the content of alkene forms of glucosinolates than their total. Of all the secondary metabolites marked, the application of sulphur increased the contents of sinalbin and linoleic acid most considerably.