

Marzena S. BRODOWSKA<sup>1</sup> i Magdalena KURZYNA-SZKLAREK<sup>1</sup>

## OCENA BIOAKUMULACJI WYBRANYCH METALI CIĘŻKICH W PRODUKTACH ROŚLINNYCH W BADANIACH MODELOWYCH

### EVALUATION OF BIOACUMULATION OF SELECTED HEAVY METALS IN PLANT PRODUCTS IN MODEL STUDIES

**Abstrakt:** Zarówno nadmiar, jak i niedobór mikroelementów może mieć niekorzystny wpływ na prawidłowy wzrost i rozwój roślin uprawnych. Do zachwiania odpowiedniej ich ilości przyczynia się między innymi chemizacja rolnictwa, dlatego ważnym zagadnieniem jest określenie wpływu zróżnicowanego nawożenia mineralnego na zawartość mikroelementów w roślinach uprawnych. W badaniach modelowych oceniono wpływ nawożenia siarką i magnezem przy różnych stosunkach N : P : K na zawartość miedzi i cynku w roślinach uprawnych. Zawartość wybranych mikroelementów oznaczono metodą atomowej spektrometrii absorpcyjnej zarówno w plonie głównym, jak i ubocznym w jarych formach rzepaku, pszenicy oraz jęczmienia. Uzyskane wyniki upoważniają do stwierdzenia, że aplikacja siarki i magnezu przy różnych stosunkach N : P : K wpływa na zamiany zawartości miedzi i cynku w roślinach testowych.

**Słowa kluczowe:** miedź, cynk, rzepak jary, pszenica jara, jęczmień jary, nawożenie mineralne

#### Wprowadzenie

Pobieranie metali ciężkich przez rośliny zależy od formy, w jakiej metale te występują w glebie, jak również od właściwości fizykochemicznych gleby [1, 2]. Zarówno nadmierna, jak i deficytowa zawartość metali ciężkich może występować u roślin przy niezbalansowanym nawożeniu mineralnym. Zapewnienie roślinie odpowiedniej ilości składników pokarmowych zarówno makroelementów, jak i mikroelementów jest jednym z głównych czynników determinujących otrzymanie zadowalającego plonu pod kątem ilościowym i jakościowym [3]. Miedź jest niezbędnym pierwiastkiem dla prawidłowego wzrostu i rozwoju roślin, ma wpływ na prawidłowy rozwój i budowę tkanek roślinnych. Ponadto współuczestniczy w przemianach azotowych, jak również bierze udział w procesie syntezy białek oraz witaminy C [4]. Niedobór miedzi w glebie nie tylko wpływa na spadek plonów roślin oraz ich wartość, ale również może być czynnikiem wywołującym poważne schorzenia zwierząt gospodarskich żywionych paszą ubogą w ten mikroelement. W nadmiarze natomiast miedź może mieć toksyczny wpływ na rośliny, wywołując chlorozy, nekrozy oraz zahamowanie wzrostu korzeni i pędów [5].

Cynk pełni bardzo ważną funkcję w metabolizmie roślinnym, wpływając na aktywność hydrogenazy i anhydrazy węglanowej oraz stabilizację frakcji rybosomalnych. Ponadto uczestniczy w metabolizmie węglowodanów, utrzymaniu integralności błon komórkowych oraz syntezie białek i gospodarce azotowej [6]. Cynk w wysokim stężeniu może mieć działanie fitotoksyczne na rośliny, hamować fotosyntezę oraz wpływać ograniczająco na wielkość plonu [6]. Niedobór natomiast nie tylko opóźnia wzrost i plon roślin [7], ale ma

<sup>1</sup> Katedra Chemii Rolnej i Środowiskowej, Wydział Agrobiotechnologii, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, ul. Akademicka 15, 20-950 Lublin, tel. 81 445 60 45, email: marzena.brodowska@up.lublin.pl  
Praca była prezentowana podczas konferencji ECOpole' 17, Polanica Zdrój, 4-7.10.2017

również wpływ na ludzi. Ponad 3 mld osób na całym świecie cierpi z powodu niedoborów Zn, a stan ten jest szczególnie rozpowszechniony na obszarach, na których populacja jest w dużym stopniu zależna od niezbilansowanej diety na bazie produktów zbożowych, w których Zn jest akumulowany prawie wyłącznie w łusce, która w wyniku dalszej obróbki jest odrzucana [8-10]. Niedobór cynku u ludzi może mieć negatywny wpływ na pracę mózgu, system immunologiczny i wzrost [11].

Zarówno nadmiar, jak i niedobór miedzi oraz cynku może mieć toksyczny wpływ na rośliny, a w konsekwencji na ludzi i zwierzęta. Do zachwiania odpowiedniej w roślinach ich ilości przyczynia się między innymi chemizacja rolnictwa, uprzemysłowienie, jak również zagospodarowanie odpadów na cele rolnicze. Stąd też celem przedstawionych badań jest określenie, jak niezbilansowane nawożenie mineralne wpływa na zawartość miedzi i cynku w roślinach uprawnych.

### **Materiały i metody**

Ścisłe trzyletnie doświadczenie wazonowe prowadzono w hali wegetacyjnej Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie. Eksperyment założono na glebie pobranej z warstwy ornej gleby brunatnej o składzie granulometrycznym gliny piaszczystej, należącej do kategorii agronomicznej - gleba lekka, kompleksu żytniego bardzo dobrego i klasy bonitacyjnej IIIb. Gleba przed założeniem doświadczenia charakteryzowała się lekko kwaśnym odczynem ( $\text{pH}_{\text{KCl}} = 5,76$ ), średnią zasobnością w przyswajalne formy fosforu ( $65,0 \text{ mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), potasu ( $100,9 \text{ mg K} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) i magnezu ( $32,0 \text{ mg Mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) oraz niską w siarkę siarczanową ( $6,5 \text{ mg S} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). Rośliną testową w pierwszym roku doświadczenia był rzepak jary (*Brassica napus* L.) odmiany „Mozart”, w drugim pszenica jara (*Triticum aestivum* L.) odmiany „Opatka”, a w ostatnim jęczmień jary (*Hordeum vulgare* L.) odmiany „Justina”. Eksperyment obejmował trzy czynniki doświadczalne zastosowane na trzech poziomach w czterech powtórzeniach. Pierwszym czynnikiem była dawka siarki (A), drugim dawka magnezu (B), a trzecim stosunek N : P : K. Nawożenie siarką stosowano w formie siarki elementarnej w ilościach:  $S_1 - 0,025 \text{ kg S} \cdot \text{kg}^{-1}$  gleby w przypadku rzepaku jarego i  $0,0125 \text{ g S} \cdot \text{kg}^{-1}$  gleby w pszenicy i jęczmieniu jarym,  $S_2 - 0,050 \text{ g S} \cdot \text{kg}^{-1}$  gleby w rzepaku jarym i  $0,025 \text{ g S} \cdot \text{kg}^{-1}$  gleby w jarych formach pszenicy i jęczmienia. Magnez aplikowano w postaci  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  w dawkach  $\text{Mg}_1 - 0,015 \text{ g Mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  gleby (rzepak jary) i  $0,010 \text{ g Mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  gleby (pszenica jara i jęczmień jary) i  $\text{Mg}_2$  odpowiednio  $0,030$  i  $0,020 \text{ g Mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  gleby. W badaniach własnych azot zastosowano w formie  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  dla rzepaku jarego w dawce  $0,280 \text{ g N} \cdot \text{kg}^{-1}$  gleby, a dla jarych form pszenicy i jęczmienia w dawce  $0,140 \text{ g N} \cdot \text{kg}^{-1}$  gleby. W przeprowadzonym eksperymencie analizowano trzy stosunki N : P : K -  $1 : 0,13 : 0,33$  (N : P : K),  $1 : 0,22 : 0,58$  (N :  $P_1$  :  $K_1$ ) i  $1 : 0,31 : 1$  (N :  $P_2$  :  $K_2$ ). Przed rozpoczęciem doświadczenia we wszystkich obiektach zastosowano wapnowanie węglanem wapnia. Nawożenie siarką i magnezem oraz fosforem i potasem stosowano w każdym roku, poprzedzając siew roślin testowych, natomiast azotem nawożono w dwóch dawkach, z których pierwszą wnoszono przed siewem, a drugą po przerwaniu roślin do ich optymalnej ilości w wazonie (5 roślin rzepaku oraz 6 pszenicy i jęczmienia). Pod rośliny testowe przed siewem zastosowano nawożenie mikroelementami w dawce  $2,9 \text{ mg Zn} \cdot \text{kg}^{-1}$  gleby,  $3,4 \text{ mg Cu} \cdot \text{kg}^{-1}$  gleby,  $1,0 \text{ mg B} \cdot \text{kg}^{-1}$  gleby,  $0,02 \text{ mg Mo} \cdot \text{kg}^{-1}$  gleby,  $2,666 \text{ mg Mn} \cdot \text{kg}^{-1}$  gleby. Siew roślin

w ilości 10 nasion rzepaku, 12 ziaren pszenicy i jęczmienia na wazon przeprowadzono każdego roku w III dekadzie kwietnia. Wilgotność roślin w okresie wegetacji utrzymywano na poziomie 60% maksymalnej kapilarnej pojemności wodnej. Rośliny podlewano wodą destylowaną do stałej wagi. Zbiór plonu głównego i ubocznego wykonano w fazie pełnej dojrzałości roślin. Zawartość miedzi oraz cynku oznaczono metodą atomowej spektrometrii absorpcyjnej (ASA) po uprzedniej mineralizacji materiału roślinnego w stężonym kwasie siarkowym(VI) z dodatkiem 30%  $H_2O_2$ .

### Wyniki badań i ich dyskusja

Krytyczna zawartość badanych mikroelementów przyjęta do oceny roślin zbożowych pod kątem przeznaczenia paszowego wynosi odpowiednio dla miedzi  $25-50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  suchej masy (s.m.) i dla cynku -  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  s.m. [12]. Biorąc pod uwagę te wartości, stwierdzić można, że w badaniach własnych zawartość miedzi nie przekraczała dopuszczalnych norm, a w przypadku cynku w kilku obiektach odnotowano przekroczenie dopuszczalnej ilości (tab. 1 i 2). Kabata-Pendias i Pendias [13] podają, że średnia zawartość miedzi w zbożach uprawianych w Polsce mieści się w zakresie  $2,6-6,0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  s.m. Według tych wartości, w przeprowadzonym eksperymencie w jarych formach pszenicy i jęczmienia wystąpiły obiekty z zawartością miedzi zarówno niedoborową, jak i nadmiarową (tab. 2 i 3). Kabata-Pendias i Pendias [13] szacują, że zawartość cynku w polskich zbożach waha się w granicach  $15-60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  s.m. Odnosząc te wartości do badań własnych, można stwierdzić, że zawartość cynku zarówno w plonie głównym, jak i ubocznym badanych zbóż była na bardzo wysokim/szkodliwym poziomie (tab. 2). Zawartość miedzi i cynku w nasionach oraz słomie rzepaku jarego (tab. 1) była na poziomie zbliżonym do wartości odnotowywanych w literaturze [14, 15].

Rzepak należy do roślin o dużych wymaganiach pokarmowych względem siarki. Może to być przyczyną tego, że w wazonach, w których nie stosowano siarki w nawożeniu, oraz w tych, gdzie siarka zastosowana była w niższej dawce, roślina nie wytworzyła nasion. Zawartość miedzi w nasionach rzepaku nawożonego wyższą dawką siarki wahała się od  $2,35$  do  $2,95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  s.m. Przyrost siarki w nawożeniu w słomie rzepaku jarego skutkował istotnym spadkiem zawartości miedzi, natomiast badania Jankowskiego i in. [16] donoszą o braku istotnego wpływu nawożenia siarką na zawartość miedzi w słomie rzepaku jarego i ozimego. Wzrastające dawki magnezu wiązały się ze spadkiem zawartości miedzi w plonie głównym i ubocznym rzepaku jarego. W efekcie zawężenia stosunku N : P : K w nawożeniu odnotowano istotny spadek zawartości miedzi w nasionach rzepaku, natomiast w słomie z obiektów  $S_1$  i  $S_2$  odnotowano odwrotną zależność.

W nasionach rzepaku jarego nawożonego wyższą dawką siarki zawartość cynku zawierała się w przedziale  $51,20-57,15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  s.m. W badaniach własnych zastosowanie siarki w nawożeniu wiązało się z istotnym spadkiem zawartości cynku w plonie ubocznym rzepaku jarego. Badania Kozłowskiej-Strawskiej [17] również dowodzą, że zwiększone nawożenie siarką wpływa na zmniejszenie zawartości cynku w słomie rzepaku jarego, a eksperyment Jankowskiego i in. [16] dowiódł, że doglebowa aplikacja siarki nie wpływa istotnie na zawartość cynku w słomie rzepaku jarego. Aplikacja magnezu wiązała się ze spadkiem zawartości cynku w nasionach rzepaku jarego oraz jego wzrostem w słomie w obiektach z serii  $S_0$  i  $S_1$ . Wzrost udziału fosforu i potasu

w nawożeniu wiązał się ze spadkiem zawartości cynku w nasionach rzepaku jarego, w słomie natomiast nie odnotowano jednoznacznej zależności. Badania Gaj [18] dowodzą, że zróżnicowane nawożenie potasowe wpływa na wzrost zawartości cynku w początkowej fazie wzrostu liści rzepaku jarego.

Tabela 1

Zawartość miedzi i cynku [ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  s.m.] w plonie głównym i ubocznym rzepaku jarego w warunkach zróżnicowanego nawożenia siarką i magnezem przy różnym stosunku N : P : K

Table 1

Content of copper and zinc [ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  d.m.] in the main and secondary crops of spring rape under different conditions of sulfur and magnesium fertilization at different N : P : K ratios

Specyfikacja	Dawka siarki (A)	Dawka magnezu (B)	Miedź [ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.]				Cynk [ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.]			
			Stosunek N : P : K (C)							
			N:P:K	N:P <sub>1</sub> :K <sub>1</sub>	N <sub>1</sub> :P <sub>2</sub> :K <sub>2</sub>	średnia	N:P:K	N:P <sub>1</sub> :K <sub>1</sub>	N:P <sub>2</sub> :K <sub>2</sub>	średnia
Plon główny	S <sub>0</sub>	Mg <sub>0</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-
		Mg <sub>1</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-
		Mg <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-
		średnia	-	-	-	-	-	-	-	-
	S <sub>1</sub>	Mg <sub>0</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-
		Mg <sub>1</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-
		Mg <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-
		średnia	-	-	-	-	-	-	-	-
	S <sub>2</sub>	Mg <sub>0</sub>	2,48	2,40	2,40	2,43	57,15	55,20	51,98	54,78
		Mg <sub>1</sub>	2,95	2,38	2,40	2,50	54,80	52,98	51,20	52,99
		Mg <sub>2</sub>	2,55	2,35	2,35	2,45	53,78	51,43	55,10	53,44
		średnia	2,66	2,38	2,38	2,47	55,24	53,20	52,76	53,74
NIR <sub>0,01</sub>		B - n.i. C - 0,32 B·C - n.i.				B - n.i. C - n.i. B·C - n.i.				
Plon uboczny	S <sub>0</sub>	Mg <sub>0</sub>	6,05	5,30	5,40	5,58	76,40	67,17	57,53	67,03
		Mg <sub>1</sub>	5,18	4,83	5,35	5,12	76,60	75,30	70,65	74,18
		Mg <sub>2</sub>	5,13	4,30	5,23	4,88	64,10	63,25	75,38	67,58
		średnia	5,45	4,81	5,33	5,19	72,37	68,57	67,85	69,60
	S <sub>1</sub>	Mg <sub>0</sub>	2,13	2,20	2,38	2,23	46,43	54,73	56,15	52,44
		Mg <sub>1</sub>	2,13	2,35	2,23	2,23	47,38	61,03	47,55	51,99
		Mg <sub>2</sub>	1,95	2,35	2,53	2,28	53,60	67,50	60,70	60,60
		średnia	2,07	2,30	2,38	2,25	49,14	61,09	54,80	55,01
	S <sub>2</sub>	Mg <sub>0</sub>	1,58	2,03	2,15	1,92	49,50	43,40	45,68	46,19
		Mg <sub>1</sub>	1,45	1,75	2,13	1,78	42,78	43,20	53,60	46,53
		Mg <sub>2</sub>	1,08	1,75	1,85	1,56	45,25	40,90	61,93	49,36
		średnia	1,37	1,84	2,04	1,75	45,84	42,50	53,74	47,36
NIR <sub>0,01</sub>		A - 0,23 B - 0,23 C - 0,23 A·B - n.i. A·C - n.i. B·C - 18,39 A·B·C - 35,78				A - 8,48 B - n.i. C - n.i. A·B - n.i. A·C - 8,39 B·C - n.i. A·B·C - 35,78				

\*n.i. - zmiany nieistotne statystycznie

W ziarnie pszenicy jarej w efekcie aplikacji siarki w większości obiektów odnotowano znaczne zmiany zawartości miedzi. W słomie dodatek siarki w dawce S<sub>1</sub> wiązał się z istotnym spadkiem zawartości miedzi, a w większości obiektów nawożonych dawką S<sub>2</sub> zanotowano istotny wzrost zawartości miedzi zarówno w stosunku do obiektów nawożonych dawką S<sub>0</sub>, jak i S<sub>1</sub>. Badania Kaczora i Brodowskiej [19] donoszą

o pozytywnym wpływie nawożenia siarką na wzrost zawartości miedzi w ziarnie i słomie pszenicy jarej. W badaniach własnych przyrost dawek magnezu w nawożeniu wiązał się z istotnym spadkiem zawartości miedzi w ziarnie pszenicy jarej w obiektach  $S_0$  i  $S_1$ , natomiast przy nawożeniu dawką  $S_2$  zawartość miedzi w efekcie aplikacji wyższych dawek magnezu istotnie wzrosła. W słomie natomiast nie odnotowano jednoznacznego kierunku zmian zawartości miedzi pod wpływem zmieniającej się dawki magnezu. Zwiększenie udziału fosforu i potasu w nawożeniu w większości obiektów skutkowało wzrostem zawartości miedzi w ziarnie pszenicy, a w przypadku słomy z obiektów  $N : P_2 : K_2$  jej spadkiem. Natomiast Gunes i in. [20] donoszą, że zwiększenie nawożenia fosforowego skutkuje spadkiem zawartości miedzi w pszenicy.

Tabela 2

Zawartość miedzi i cynku [ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  s.m.] w plonie głównym i ubocznym pszenicy jarej w warunkach zróżnicowanego nawożenia siarką i magnezem przy różnym stosunku  $N : P : K$

Table 2

Content of copper and zinc [ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  d.m.] in the main and secondary crops of spring wheat under different conditions of sulfur and magnesium fertilization at different  $N : P : K$  ratios

Specyfikacja	Dawka siarki (A)	Dawka magnezu (B)	Miedź [ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.]				Cynk [ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.]			
			Stosunek $N : P : K$ (C)							
			N:P:K	N:P <sub>1</sub> :K <sub>1</sub>	N:P <sub>2</sub> :K <sub>2</sub>	średnia	N:P:K	N:P <sub>1</sub> :K <sub>1</sub>	N:P <sub>2</sub> :K <sub>2</sub>	średnia
Plon główny	$S_0$	$Mg_0$	8,40	13,63	6,78	9,60	84,58	87,90	81,50	84,66
		$Mg_1$	7,15	10,80	6,68	8,24	83,40	95,30	81,50	86,73
		$Mg_2$	15,60	6,70	6,50	9,60	84,88	97,45	87,15	89,83
		średnia	10,38	10,40	6,65	9,15	84,29	93,55	83,38	87,07
	$S_1$	$Mg_0$	4,33	28,25	5,48	12,68	45,35	54,40	43,45	47,73
		$Mg_1$	4,30	20,88	6,10	10,43	46,43	55,55	41,08	47,69
		$Mg_2$	4,20	4,40	6,50	5,03	45,20	43,90	39,08	42,73
		średnia	4,28	17,84	6,03	9,38	45,66	51,28	41,20	46,05
	$S_2$	$Mg_0$	6,50	6,90	14,90	9,43	46,23	45,00	53,65	48,29
		$Mg_1$	5,58	7,05	23,35	11,99	41,15	40,63	53,90	45,23
		$Mg_2$	34,38	7,05	25,35	22,26	59,38	41,93	59,33	53,55
		średnia	15,48	7,00	21,20	14,56	48,92	42,52	55,63	49,02
NIR <sub>0,01</sub>			A - 1,48	B - 1,48	C - 1,48	A - 3,52	B - n.i.	C - 3,52		
			A·B - 3,16	A·C - 3,16	B·C - 3,16	A·B - 7,64	A·C - 7,64	B·C - 7,64		
			A·B·C - 6,15			A·B·C - 14,86				
Plon uboczny	$S_0$	$Mg_0$	2,58	2,63	3,20	2,80	178,93	184,40	151,25	171,53
		$Mg_1$	3,48	1,93	3,43	2,94	185,23	189,53	166,75	180,50
		$Mg_2$	2,48	1,40	4,30	2,73	187,70	194,40	169,38	183,83
		średnia	2,84	1,98	3,64	2,82	183,95	189,44	162,46	178,62
	$S_1$	$Mg_0$	2,15	1,50	2,80	2,15	53,93	59,68	62,50	58,70
		$Mg_1$	1,70	1,90	2,40	2,00	59,30	59,25	64,03	60,86
		$Mg_2$	2,35	1,50	2,40	2,08	60,90	52,80	53,13	55,61
		średnia	2,07	1,63	2,53	2,08	58,04	57,24	59,89	58,39
	$S_2$	$Mg_0$	3,10	2,15	14,40	6,55	61,55	55,73	78,90	65,39
		$Mg_1$	2,40	2,55	25,78	10,24	53,28	54,90	74,78	60,99
		$Mg_2$	2,35	2,40	18,18	7,64	49,45	55,73	70,85	58,68
		średnia	2,62	2,37	19,45	8,14	54,76	55,45	74,84	61,69
NIR <sub>0,01</sub>			A - 0,04	B - 0,04	C - 0,04	A - n.i.	B - 6,26	C - n.i.		
			A·B - n.i.	A·C - 0,08	B·C - n.i.	A·B - 13,59	A·C - 13,59	B·C - n.i.		
			A·B·C - 0,17			A·B·C - n.i.				

\* n.i. - zmiany nieistotne statystycznie

Tabela 3

Zawartość miedzi i cynku [ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  s.m.] w plonie głównym i ubocznym jęczmienia jarego w warunkach zróżnicowanego nawożenia siarką i magnezem przy różnym stosunku N : P : K

Table 3

Content of copper and zinc [ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  d.m.] in the main and secondary crops of spring barley under different conditions of sulfur and magnesium fertilization at different N : P : K ratios

Specyfika- kacja	Dawka siarki (A)	Dawka magnezu (B)	Miedź [ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.]				Cynk [ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.]			
			Stosunek N : P : K (C)							
			N:P:K	N:P <sub>1</sub> :K <sub>1</sub>	N:P <sub>2</sub> :K <sub>2</sub>	średnia	N:P:K	N:P <sub>1</sub> :K <sub>1</sub>	N:P <sub>2</sub> :K <sub>2</sub>	średnia
Plon główny	S <sub>0</sub>	Mg <sub>0</sub>	12,70	8,60	9,30	10,20	93,50	100,80	109,10	101,13
		Mg <sub>1</sub>	11,70	7,60	10,60	9,97	97,60	106,80	96,20	100,20
		Mg <sub>2</sub>	10,30	7,20	10,00	9,17	76,60	113,00	114,20	101,27
		średnia	11,58	7,80	9,97	9,78	89,23	106,87	106,50	100,87
	S <sub>1</sub>	Mg <sub>0</sub>	10,10	6,98	6,88	7,98	64,53	78,05	91,40	77,99
		Mg <sub>1</sub>	9,95	6,95	6,55	7,82	64,98	70,20	73,18	69,45
		Mg <sub>2</sub>	7,78	7,08	6,20	7,02	66,75	65,88	71,23	67,95
		średnia	9,28	7,00	6,54	7,61	65,42	71,38	78,60	71,80
	S <sub>2</sub>	Mg <sub>0</sub>	7,75	7,75	7,60	7,70	78,95	93,75	105,50	92,73
		Mg <sub>1</sub>	7,55	7,48	7,58	7,53	66,93	72,28	80,20	73,14
		Mg <sub>2</sub>	7,45	6,23	7,55	7,08	68,63	65,80	74,15	69,53
		średnia	7,58	7,15	7,58	7,44	71,50	77,28	86,62	78,47
NIR <sub>0,01</sub>			A - 0,43	B - 0,43	C - 0,43	A - 11,91			B - 11,91	C - n.i.
			A·B - n.i.	A·C - 0,93	B·C - 0,93	A·B - 25,84			A·C - n.i.	B·C - 25,84
			A·B·C - 1,81			A·B·C - 50,25				
Plon uboczny	S <sub>0</sub>	Mg <sub>0</sub>	9,10	6,55	6,50	7,38	249,95	221,30	233,85	235,03
		Mg <sub>1</sub>	7,55	6,20	7,40	7,05	250,20	231,55	208,35	230,03
		Mg <sub>2</sub>	5,85	5,40	7,05	6,10	173,85	244,95	235,95	218,25
		średnia	7,50	6,05	6,98	6,84	224,67	232,60	226,05	227,77
	S <sub>1</sub>	Mg <sub>0</sub>	5,18	5,23	6,18	5,53	94,05	119,98	121,75	111,93
		Mg <sub>1</sub>	3,63	4,25	5,90	4,59	97,25	105,70	91,68	98,21
		Mg <sub>2</sub>	3,48	5,50	5,80	4,93	112,83	81,08	82,70	92,20
		średnia	4,09	4,99	5,96	5,01	101,38	102,25	98,71	100,78
	S <sub>2</sub>	Mg <sub>0</sub>	5,35	5,20	7,68	6,08	164,60	148,60	130,75	147,98
		Mg <sub>1</sub>	5,15	4,55	5,58	5,09	98,50	95,58	105,65	99,91
		Mg <sub>2</sub>	4,48	3,70	3,48	3,88	110,55	91,23	94,85	98,88
		średnia	4,99	4,48	5,58	5,02	124,55	111,80	110,42	115,59
NIR <sub>0,01</sub>			A - 0,39	B - 0,39	C - 0,39	A - 3,32			B - 3,32	C - 3,32
			A·B - 0,85	A·C - 0,85	B·C - 0,85	A·B - 7,20			A·C - 7,20	B·C - 7,20
			A·B·C - 1,65			A·B·C - 35,78				

\*n.i. - zmiany nieistotne statystycznie

Zastosowanie siarki w nawożeniu pszenicy jarej wiązało się ze spadkiem zawartości cynku zarówno w ziarnie, jak i słomie. Natomiast w badaniach Kaczora i Brodowskiej [19] wzrastające dawki siarki wpłynęły na zwiększenie koncentracji cynku w pszenicy jarej. W przeprowadzonym eksperymencie dodatek magnezu do nawożenia wiązał się w większości obiektów z istotnym wzrostem zawartości cynku w słomie pszenicy jarej w seriach S<sub>0</sub> i S<sub>1</sub>, natomiast w obiektach nawożonych dawką S<sub>2</sub> odnotowano odwrotną zależność. W badaniach własnych nie zauważono jednoznacznie ukierunkowanego wpływu zmiany stosunku N:P:K na zawartość cynku zarówno w plonie głównym, jak i ubocznym pszenicy jarej. W literaturze można odnaleźć informacje, że zróżnicowane nawożenie mineralne nie indukuje wyraźnych zmian w koncentracji cynku

w pszenicy jarej [3]. Badania Gunes i in. [20] oraz Ryan i in. [21] donoszą natomiast, że nawożenie fosforem wpływa na zmniejszenie zawartości cynku w ziarnie pszenicy. Zhao i in. [22] podają, że nawożenie azotem wpływa na zwiększenie całkowitej zawartości cynku w ziarnie pszenicy ozimej.

Aplikacja siarki wiązała się z istotnym spadkiem zawartości miedzi w plonie głównym i ubocznym jęczmienia jarego. Wzrastające dawki magnezu również skutkowały znacznym zmniejszeniem zawartości miedzi w ziarnie i słomie jęczmienia jarego. Zwiększenie udziału fosforu i potasu w nawożeniu jęczmienia w serii  $S_0$  i  $S_1$  wiązało się z istotnym spadkiem zawartości miedzi w ziarnie, z kolei w przypadku słomy zawężenie stosunku  $N : P : K$  w serii  $S_1$  skutkowało istotnym wzrostem zawartości miedzi. W badaniach Ruszkowskiej i in. [23] zwiększone nawożenie  $N : P : K : Mg$  wpłynęło na wyraźny spadek zawartości miedzi w ziarnie jęczmienia jarego i pszenicy ozimej uprawianych na glebie piaskowej. Z kolei na glebie zasobniejszej w miedź autorzy nie stwierdzili takiego wpływu.

Aplikacja siarki do środowiska wzrostu roślin skutkowała istotnym zmniejszeniem zawartości cynku w ziarnie i słomie jęczmienia jarego. Dodatek magnezu w dawce nawozowej wiązał się ze spadkiem zawartości cynku w seriach  $S_1$  i  $S_2$  w ziarnie i słomie rośliny testowej. W badaniach własnych wzrost zawartości cynku pod wpływem zwiększania dawki fosforu i potasu w nawożeniu odnotowano w ziarnie jęczmienia jarego. Ruszkowska i in. [23] podają, że zwiększone nawożenie  $N : P : K : Mg$  wpływa na wzrost zawartości cynku w ziarnie jęczmienia jarego, co może wynikać z zakwaszającego działania tych nawozów na gleby, przez co zwiększa się przyswajalność tego mikroelementu.

Współdziałanie czynników doświadczalnych w większości obiektów plonu głównego i ubocznego roślin testowych wiązało się z istotnymi zmianami zawartości zarówno miedzi, jak i cynku. Zmiany te nie były jednak jednoznacznie ukierunkowane.

## Wnioski

Przeprowadzone badania upoważniają do postawienia następujących wniosków:

1. Zastosowane czynniki doświadczalne w większości obiektów w istotny sposób różnicują zawartość miedzi i cynku w roślinach testowych.
2. Nawożenie siarką wiąże się w większości obiektów ze zmniejszeniem zawartości miedzi oraz cynku w plonie głównym i ubocznym roślin testowych.
3. Aplikacja magnezu wpływa na zmniejszenie zawartości miedzi w większości obiektów plonu głównego i ubocznego jarych form rzepaku i jęczmienia oraz w ziarnie pszenicy jarej z serii  $S_0$  i  $S_1$ .
4. Zwiększenie udziału fosforu i potasu w nawożeniu roślin skutkuje istotnymi zmianami zawartości badanych mikroelementów w roślinach testowych, jednakże zmiany te nie są jednoznacznie ukierunkowane.
5. Współdziałanie czynników doświadczalnych w istotny sposób, jednak niejednoznacznie ukierunkowany, różnicuje zawartość badanych mikroelementów w roślinach testowych.

## Literatura

- [1] Mantovi P, Bonazzi G, Maestri E, Marmiroli N. Accumulation of copper and zinc from liquid manure in agricultural soils and crop plants. *Plant Soil*. 2003;250(2):249-257. DOI: 10.1023/A:1022848131043.
- [2] Hange K, Awofolu OR. Assessment of anthropogenic influence on the level of selected heavy metals (Cu, Zn, Cd and Pb) in soil. *J Soil Sci Environ Manage*. 2017;8(6):113-121. DOI: 10.5897/JSSEM2017.0630
- [3] Yang Y, Ma T, Ding F, Ma H, Duan X, Gao T, et al. Interactive zinc, iron, and copper-induced phytotoxicity in wheat roots. *Environ Sci Pollut Res*. 2017;24(1):395-404. DOI: 10.1007/s11356-016-7659-0.
- [4] Lange B, van der Ent A, Baker AJM, Echevarria G, Mahy G, Malaisse F, et al. Copper and cobalt accumulation in plants: a critical assessment of the current state of knowledge. *New Phytol*. 2017;213(2):537-551. DOI: 10.1111/nph.14175.
- [5] Yruela I. Copper in plants: acquisition, transport and interactions. *Funct Plant Biol*. 2009;36(5):409-430. DOI: 10.1071/FP08288.
- [6] Hafeez B, Khanif YM, Saleem M. Role of zinc in plant nutrition - A review. *Am J Exp Agric*. 2013;3(2):374-391. <http://www.sciencedomain.org/abstract/1132>.
- [7] Shri PU, Pillay V. Excess of soil zinc interferes with uptake of other micro and macro nutrients in *Sorghum bicolor* (L.) plants. *Ind J Plant Physiol*. 2017;22(3):304-308. DOI: 10.1007/s40502-017-0313-0.
- [8] Graham RD, Welch RM, Bouis HE. Addressing micronutrient malnutrition through enhancing the nutritional quality of staple foods: principles, perspectives and knowledge gaps. *Adv Agron*. 2001;70:77-142. DOI: 10.1016/S0065-2113(01)70004-1.
- [9] Cakmak I, Pfeiffer WH, McClafferty B. Biofortification of durum wheat with zinc and iron. *Cereal Chem*. 2010;87(1):10-20. DOI: 10.1094/CCHEM-87-1-0010.
- [10] Velu G, Ortiz-Monasterio I, Cakmak I, Hao Y, Singh RP. Biofortification strategies to increase grain zinc and iron concentrations in wheat. *J Cereal Sci*. 2014;59(3):365-372. DOI: 10.1016/j.jcs.2013.09.001.
- [11] Wang S, Li M, Liu K, Tian X, Li S, Chen Y, et al. Effects of Zn, macronutrients, and their interactions through foliar applications on winter wheat grain nutritional quality. *PLoS ONE*. 2017;12(7):e0181276. DOI: 10.1371/journal.pone.0181276.
- [12] Gorlach E. Zawartość pierwiastków śladowych w roślinach pastewnych jako miernik ich wartości. *Zesz. Nauk AR w Krakowie*. 1991; 262. *Sesja Nauk. z. 34*:13-22.
- [13] Kabata-Pendias A, Pendias H. *Biogeochemia pierwiastków śladowych*. Warszawa: WN PWN; 1999. ISBN: 8301128232.
- [14] Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, Černý J, Jakl M. The fluctuation of copper content in oilseed rape plants (*Brassica napus* L.) after the application of nitrogen and sulphur fertilizers. *Plant Soil Environ*. 2007;53:143-148. <http://www.agriculturejournals.cz/publicFiles/00150.pdf>.
- [15] Iżewska A. Wpływ obornika, komunalnego osadu ściekowego i kompostu z niego wyprodukowanego na wielkość plonu i zawartość mikrośladników Mn, Zn, Cu, Ni oraz Pb i Cd w rzepaku jarym i pszenzycie jarym. *J Elem*. 2009;14(3):449-456. DOI: 10.5601/jelem.2009.14.3.03.
- [16] Jankowski K, Kijewski Ł, Krzebietke S, Mackiewicz-Walec E, Skwierawska M. Effect of sulfur fertilization on the concentrations of copper, zinc and manganese in the roots, straw and oil cake of rapeseed (*Brassica napus* L. ssp. *oleifera* Metzg). *J Elem*. 2014;20(2):433-446. DOI: 10.5601/jelem.2013.18.4.552.
- [17] Kozłowska-Strawska J. Zmiany zawartości cynku w roślinach nawożonych różnymi formami siarki. *Ochr Środ Zasob Natur*. 2009;40:254-261. [http://www.ios.edu.pl/pol/pliki/nr40/nr40\\_29.pdf](http://www.ios.edu.pl/pol/pliki/nr40/nr40_29.pdf).
- [18] Gaj R. Wpływ zróżnicowanego poziomu nawożenia rzepaku ozimego potasem na stan odżywienia roślin w początku wzrostu pędu głównego i na plon nasion. *Rośliny Oleiste*. 2010;31:115-124. <http://agro.icm.edu.pl/agro/element/bwłmeta1.element.agro-8bf6e05e-d2a5-476c-9542-c84ed73fe188?q=bwmeta1.element.agro-d469015f-69ed-451e-b489-1d6ffc281427;6&qt=CHILDREN-STATELESS>.
- [19] Kaczor A, Brodowska MS. Zawartość i pobranie miedzi i cynku przez rośliny w zależności od formy siarki oraz od sposobu nawożenia azotem. *Zesz Probl Post Nauk Roln*. 2009;541(1):165-170. <http://www.zppnr.sggw.pl/541.pdf>.
- [20] Gunes A, Inal A, Kadioglu Y. Determination of mineral element in wheat, sunflower, chickpea and lentil cultivars in response to P fertilization by polarized energy dispersive X-ray fluorescence. *X-Ray Spektrom*. 2009;38(5):451-462. DOI: 10.1002/xrs.1186.
- [21] Ryan MH, McInerney JK, Record IR, Angus JF. Zinc bioavailability in wheat grain in relation to phosphorus fertiliser, crop sequence and mycorrhizal fungi. *J Sci Food Agric*. 2008;88:1208-1216. DOI: 10.1002/jsfa.3200.



- [22] Zhao P, Yang F, Sui F, Wang Q, Liu H. Effect of nitrogen fertilizers on zinc absorption and translocation in winter wheat. *J Plant Nutr.* 2016;39:1311-1318. DOI: 10.1080/01904167.2015.1106560.
- [23] Ruskowska M, Sykut S, Kusio M. Stan zaopatrzenia roślin w mikroelementy w warunkach zróżnicowanego nawożenia w wieloletnim doświadczeniu lizymetrycznym. *Zesz Probl Post Nauk Roln.* 1996;434(1):43-47.

## EVALUATION OF BIOACUMULATION OF SELECTED HEAVY METALS IN PLANT PRODUCTS IN MODEL STUDIES

Department of Agricultural and Environmental Chemistry, University of Life Sciences in Lublin, Lublin

**Abstract:** Both excess and deficiency of micronutrients can adversely affect the normal growth and development of crop plants. To spoil the appropriate amount of micronutrients contributes among others the chemistry of agriculture. It is therefore important to determine the effect of differentiated mineral fertilization on the content of micronutrients in crop plants. In model studies, the effects of sulfur and magnesium fertilization with different ratios of N : P : K on copper and zinc content in crop plants were evaluated. The content of selected micronutrients was determined by atomic absorption spectrometry in both main and secondary crops in spring forms of rape, wheat and barley. The results obtained allow to conclude, that application of sulfur, magnesium with different ratios of N : P : K affects the content of copper and zinc in test plants.

**Keywords:** copper, zinc, spring rape, spring wheat, spring barley, mineral fertilization