

Wpływ nawożenia selenem na jego zawartość w nadziemnych częściach kukurydzy

Effect of selenium fertilization on Se content in the aboveground parts of maize
(*Zea mays* L.)

Aldona Płaczek

[2012]

*Promotorowi
Pani dr hab. inż. Barbarze Patorczyk-Pytlik, prof. nadzw.
składam serdeczne podziękowania
za życzliwość, wsparcie oraz pomoc
w tworzeniu niniejszej rozprawy doktorskiej*

Spis treści

I.	WPROWADZENIE	4
II.	PRZEGLĄD LITERATURY	6
2.1.	HISTORIA SELENU	6
2.2.	SELEN W ŚRODOWISKU	7
2.2.1.	Właściwości chemiczne selenu	7
2.2.2.	Źródła selenu w środowisku	7
2.3.	SELEN W GLEBACH	9
2.3.1.	Zawartość selenu w glebach	9
2.3.2.	Czynniki wpływające na zawartość oraz formy występowania selenu w glebach	12
2.4.	SELEN W ROŚLINACH	16
2.4.1.	Zawartość selenu w roślinach	18
2.4.2.	Pobieranie selenu przez rośliny	22
2.4.3.	Wpływ selenu na pobieranie makro- i mikroelementów przez rośliny	25
2.4.4.	Toksyczność selenu dla roślin	29
2.5.	ROLA SELENU W ORGANIZMIE ZWIERZĄT	29
2.6.	NAWOŻENIE SELENEM	33
III.	BADANIA WŁASNE	37
3.1.	CEL PRACY	37
3.2.	MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ	38
3.2.1.	Badania polowe	38
3.2.2.	Wazonowe doświadczenia vegetacyjne	41
3.2.3.	Metodyka analiz chemicznych	48
3.3.	WYNIKI BADAŃ - BADANIA POLOWE	52
3.3.1.	Doświadczenie I. Dynamika pobierania selenu przez nadziemne części 32 odmian kukurydzy	52
3.3.2.	Doświadczenie II. Odmianowe zróżnicowanie zawartości selenu w ziarnie kukurydzy	60
3.4.	WYNIKI BADAŃ – WEGETACYJNE DOŚWIADCZENIA WAZONOWE	63
3.4.1.	Doświadczenie I. Odmianowe zróżnicowanie zawartości selenu w częściach nadziemnych kukurydzy	63
3.4.2.	Doświadczenie II. Dynamika pobierania selenu przez dwie odmiany kukurydzy	67
3.4.3.	Doświadczenie III. Wpływ formy chemicznej wprowadzonego do gleby selenu na plonowanie i skład chemiczny kukurydzy	82
3.4.4.	Doświadczenie IV. Wpływ nawożenia siarką na pobieranie selenu przez rośliny	97
3.4.5.	Doświadczenie V. Wpływ dolistnego nawożenia selenem na zawartość tego pierwiastka w częściach nadziemnych kukurydzy	105
IV.	DYSKUSJA	116
V.	WNIOSKI	129
VI.	WYKAZ LITERATURY	131
VII.	MATERIAŁY ŹRÓDŁOWE	142

I. Wprowadzenie

Kukurydza zaliczana jest do podstawowych roślin pastewnych w żywieniu bydła opasowego i mlecznego, trzody chlewnej, drobiu. Może być wykorzystywana jako zielonka, kiszonka z całych roślin, CCM, jako susz z całych roślin, a także w postaci ziarna. Możliwość uzyskania wysokich plonów masy i energii oraz szerokie zastosowanie powodują, iż ta roślina zajmuje wysokie miejsce w strukturze zasiewów w Polsce, a także w krajach europejskich. Według danych GUS łączna powierzchnia uprawy kukurydzy w 2011 roku zajmowała 749 tys. ha, z czego 420 tys. stanowiły zasiewy tej rośliny z przeznaczeniem na zielonkę, a 322 tys. ha na ziarno. Przewidywany jest dalszy wzrost powierzchni uprawy kukurydzy, do nawet 1 miliona hektarów.

W chwili obecnej selen nie jest zaliczany do grupy pierwiastków niezbędnych dla większości gatunków roślin, natomiast jest niezbędny do prawidłowego funkcjonowania organizmów zwierzęcych oraz ludzi. Do najważniejszej biologicznej funkcji tego składnika zalicza się jego obecność w białkach enzymatycznych. Niedobór selenu w paszy może wywołać obniżenie produktywności zwierząt oraz doprowadzić do wystąpienia wielu schorzeń, a między innymi pokarmowej dystrofii mięśni, zwyrodnienia wątroby i serca [Sembratowicz i Grela 1997, Gupta i Gupta, 2002; McDowell i in., 2002; Chałabis-Mazurek i in. 2008].

Przyczyny niedoboru selenu w roślinach należy wiązać z niską zasobnością gleb w ten pierwiastek. Średnia zawartość Se w wierzchniej warstwie gleb uprawnych Polski wynosi $0,27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [Piotrowska, 1984], dla regionu Kujaw i Pomorza $0,138 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [Borowska i in. 2007], a dla okolic Wrocławia Patorczyk-Pytlik i Kulczycki [2009] podają średnią na poziomie $0,202 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Znaczny udział na terenie naszego kraju gleb lekkich, zakwaszonych, wykazujących niską zawartość materii organicznej może być dodatkową przyczyną słabego pobierania tego mikroelementu przez rośliny [Butterman i Brown 2004, Gupta i Gupta 2002, Dhillon i in. 2005, Skoczyliński i Patorczyk-Pytlik 2006]. Na podstawie analizy mleka od krów Dębski [1992] podaje, że 77% powierzchni Polski dotknięta jest hiposelenozą, a jako najuboższy obszar traktuje się region kujawsko-pomorski.

Utrzymanie odpowiedniego stanu zdrowia zwierząt jest uwarunkowana wartością biologiczną oraz zawartością makro- i mikroskładników w roślinach przeznaczonych do produkcji pasz. Pasza o zawartości około $0,1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ pokrywa dzienne zapotrzebowanie większości gatunków zwierząt na selen [Chałabis-Mazurek i in. 2008]. Niewiele badań

podjęto na temat zdolności kukurydzy do nagromadzania selenu, chociaż kwalifikuje się ją, jako gatunek, który w warunkach uprawy na glebach zasobnych w Se może nagromadzać znaczne jego ilości.

Niska zawartość selenu w glebach powoduje konieczność szukania sposobów zwiększania poziomu zawartości tego pierwiastka w kolejnych ogniwach łańcucha pokarmowego. Jedną z pośrednich metod wzbogacania roślin w selen jest nawożenie tym składnikiem.

Celem pracy była ocena wpływu dawki Se, formy chemicznej tego pierwiastka oraz sposobu nawożenia selenem na zwiększenie zawartości oraz dynamikę pobierania tego pierwiastka przez różne odmiany kukurydzy przeznaczonej na cele paszowe.

II. Przegląd literatury

2.1. Historia selenu

Pierwsze notatki dotyczące selenu pochodzą już z XIII wieku. Wówczas Marco Polo w trakcie podróży po Chinach odnalazł rośliny bogate w selen w regionie zachodnich Chin (Kubla Khan), które zjadane przez zwierzęta powodowały odpadanie u nich kopyt [Oldfield, 2002, Reid i in., 2004; Ulewicz-Magulska, 2008]. Selen został jednak odkryty i zidentyfikowany przez szwedzkiego chemika Jana J. Berzeliusa dopiero w 1817 roku w szlamie z uzyskiwanym przy produkcji kwasu siarkowego z pirytów. Po raz pierwszy wykorzystanie przemysłowe selenu zarejestrowano w 1910 roku. Został on użyty, jako pigment w czerwonym szkle oraz ceramicznym szkliwie. W 1915 w Stanach Zjednoczonych pierwiastek ten wykorzystano, jako dekoloryzator szkła, a w latach 40-tych XX wieku odkryto, iż amorficzny selen jest fotoprzewodnikiem. Odkrycie to zapoczątkowało wykorzystanie tego pierwiastka w fotokopiarkach [Butterman i Brown, 2004].

Selen przez wiele lat był uważany za pierwiastek silnie toksyczny. Podstawą takiej opinii były zatrucia bydła występujące w wyniku skarmiania pasz o wysokiej jego zawartości w Dakocie (USA) [Hartikainen i in., 2000; Gupta i Gupta, 2002; Puzanowska-Tarasiewicz i in., 2009]. Nadmierna podaż Se powodowała występowanie schorzenia zwanego „chorobą alkaliczną” lub ślepą kołowacizną” (*selenosis endemica*). U ludzi zamieszkających na terenach o zwiększonej zawartości Se w glebie zauważono wypadanie włosów, pękanie paznokci, zmiany skórne oraz zapalenia wielonerwowe [Rogała i in., 1999].

Przełomowym odkryciem w badaniach nad tym pierwiastkiem były prace Schwartz'a i Foltza w 1957 roku, którzy wykazali, iż selen zapobiega martwicy wątroby u szczurów [Schwarz, Foltz, 1957]. Badania te zaowocowały podjęciem kolejnych nad chorobami i schorzeniami wywołanymi niedoborem selenu w organizmie. Jednym z największych było odkrycie w 1973 roku obecności tego pierwiastka w peroksydazie glutationowej biorącej udział w redukcji cytotoksycznych nadtlenków w wielu szlakach metabolicznych [Rotruck i in., 1973; Zagrodzki, 2000; Góral, 2005]. Fakt ten pozwolił również na dostrzeżenie relacji pomiędzy selenem, a witaminą E oraz aminokwasami siarkowymi. [Rotruck i in., 1973]. Dziś jest on zaliczany do grupy pierwiastków niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania organizmów, określane nawet jako „eliksir życia”.

2.2. Selen w środowisku

2.2.1. Właściwości chemiczne selenu

Selen jest mikroelementem należącym do grupy 6 układu okresowego i wykazuje podobieństwo chemiczne do siarki (S) oraz telluru (Te). Jego zawartość w środowisku waha się od 0,01 do 2 mg·kg⁻¹ [Zhu i in., 2009]. Masa atomowa Se wynosi 78,96. Jest on kompleksem 6 naturalnych izotopów: ⁷⁴Se (0,89 %), ⁷⁶Se (9,36 %), ⁷⁷Se (7,63 %), ⁷⁸Se (23,78 %), ⁸⁰Se (49,61 %) oraz ⁸²Se (8,73 %). Ostatni z nich jest izotopem radioaktywnym [Butterman i Brown, 2004].

Pierwiastek ten występuje na czterech głównych stopniach utlenienia: -2 (selenek), 0 (elementarny Se), +4 (selenin), +6 (selenian) [Broadley i in., 2006]. W temperaturze pokojowej selen nie jest aktywny chemicznie, natomiast w wyższych temperaturach wchodzi w reakcję z wieloma zarówno metalami, jak i niemetalami. Stopień jego utlenienia zależy między innymi od potencjału oksydo-redukcyjnego, pH i aktywności mikrobiologicznej [Niedzielski i in., 2000].

Podstawową część naturalnego cyklu przemian selenu stanowią związki organiczne tego pierwiastka [Pyrzyńska 2000, Ulewicz-Magulska, 2008] tj. selenocysteina, metyloselenocysteina, selenometionina, selenocystyna, selenomocznik, dimetyloselenek, dimetylodiselenek.

Właściwości oraz specyfika selenu pozwoliła na wykorzystanie tego pierwiastka na szeroką skalę w różnych dziedzinach, m. in., jako koloryzator szkła i komponent pigmentów, katalizator oraz utleniacz w procesach chemicznych, w przemyśle elektronicznym, metalurgicznym, medycynie, a także w fotokopiarkach i fotokomórkach [Butterman i Brown, 2004].

2.2.2. Źródła selenu w środowisku

Selen występuje zarówno w atmosferze, jak i hydrosferze i litosferze [White i in. 2004].

Litosfera

W skorupie ziemskiej selen jest silnie rozproszony, a jego zawartość waha się od 0,05 do 0,09 µg·g⁻¹ [Lakin, 1972]. Pierwotne źródło selenu w środowisku naturalnym związane jest z działalnością wulkaniczną i powstającymi na tej drodze materiałami, takimi jak rudy siarczkowe, czarne łupki, piaskowce węglanowe. Wietrzenie tych skał zapoczątkowuje obieg

tego pierwiastka w przyrodzie. Intensywność zachodzenia tych procesów oraz jego wymywanie różnicowało zawartość selenu w glebach [Neal, 1995]. W przyrodzie nie występują złoża tego pierwiastka, a naturalnym jego źródłem są skały i rudy, w których pierwiastek ten związany jest najczęściej z pirytem i minerałami siarczkowymi. Rzadziej występują rudy selenowe miedzi, żelaza i ołowiu. Występuje on także w niektórych złożach srebra, złota i uranu [Butterman i Brown, 2004; White i in. 2004]. Pierwiastek ten nie występuje samodzielnie, natomiast znanych jest 36 minerałów, w których Se stanowi główny komponent. W złożach węgla ilość nagromadzonego selenu jest 80-90 razy większa, niż w złożach miedzi [Butterman i Brown, 2004].

Atmosfera

Zawartość selenu w powietrzu waha się w granicach od $0,004 \text{ ng} \cdot \text{m}^3$ nad biegunem południowym do kilkudziesięciu $\text{ng} \cdot \text{m}^3$ nad terenami miejskimi i przemysłowymi [Niedzielski i in., 2000]. Do atmosfery dostaje się w wyniku zarówno naturalnych procesów zachodzących w przyrodzie, takich jak: wybuchy wulkanów, utlenianie się z powierzchni gleb, mórz i oceanów, w wyniku działalności mikroorganizmów oraz rozwoju roślin [Čuvardić, 2003], a także poprzez działalność człowieka. Na drodze antropogenicznej selen uwalniany jest podczas spalania kopalin, np. węgla kamiennego ($0,5\text{-}12 \text{ mgSe} \cdot \text{kg}^{-1}$) i ropy naftowej ($0,2\text{-}1,0 \text{ mgSe} \cdot \text{kg}^{-1}$), wydobywaniu rud siarczkowych, a także za pośrednictwem dymu papierosowego ($0,001\text{-}0,063 \text{ } \mu\text{g/papieros}$) [Oldfield, 2002, Butterman i Brown, 2004; Puzanowska-Tarasiewicz i in., 2009]. Według Niedzielskiego i in. [2000] globalna naturalna emisja selenu do atmosfery w postaci cząstek pyłowych i związków lotnych szacowana jest powyżej 6 tys. ton rocznie. Wyższe stężenie tego pierwiastka jest odnotowywane w powietrzu nad wysypiskami śmieci i bagnami. Čuvardić [2003] podaje, iż zawartość selenu w deszczu i śniegu waha się w różnych częściach świata od $0,03$ do $0,3 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$. Wpływ emisji przemysłowych na zawartość selenu w glebach potwierdzają wyniki uzyskane przez Hartfielda i Bahnersa [1988]. Określona przez tych autorów średnia zawartość Se w glebach południowej- rolniczej- części Niemiec wynosiła $0,158 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, a dla północnych – przemysłowych rejonów tego kraju $0,652 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Hydrosfera

Zawartość selenu w wodzie wynosi od setnych części do tysięcy nanogramów w mililitrze, a wartość ta zależy od otoczenia geochemicznego, wymywania ze skał i zanieczyszczenia. Najwięcej tego pierwiastka mogą doprowadzać wody gruntowe i podziemne przepływające przez utwory bogate w Se [Niedzielski i in., 2000]. W wodzie morskiej zawartość ta kształtuje się na poziomie około $0,09 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$. Zgodnie z normą WHO

zawartość selenu w wodzie pitnej powinna kształtować się na poziomie od 0,2 do 10 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ [WHO/HSE/WSH/10.01/14].

2.3. Selen w glebach

2.3.1. Zawartość selenu w glebach

Świat

Zawartość selenu w glebach zależy od rodzaju skały macierzystej, intensywności zachodzenia procesów wietrzenia i wymywania, a także zachodzącej metylacji tego pierwiastka. Do najczęściej wymienianych w literaturze czynników warunkujących całkowitą zawartość tego pierwiastka w glebach należą: zawartość części splawialnych, a zwłaszcza frakcji koloidalnej, ilość materii organicznej, a także obecność innych pierwiastków [Ylärinta 1983, Johnsson 1991, White i in. 2004, Hartikainen 2005, Skoczyliński i Patorczyk-Pytlik 2006, Borowska i in. 2007, Eich-Greatorex i in. 2007, Patorczyk-Pytlik i Kulczycki 2009, Borowska i Koper 2011].

Zarówno zasobność gleb w ten pierwiastek, jak również jego biodostępność determinuje ilość nagromadzanego Se przez rośliny uprawiane na danym podłożu, a co za tym idzie pokrycie zapotrzebowania zwierząt i ludzi na selen. W latach 60-tych w Nowej Zelandii Watkinson [1962] jako jeden z pierwszych prowadził analizy gleby i opracował pierwsze technologie nawożenia ich selenem. Według jego badań regiony, w których gleba zawiera mniej Se niż $0,5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, są narażone na wystąpienie groźnych schorzeń u owiec. Gupta i Gupta [2002] z kolei podają, iż rośliny uprawiane na glebie o zawartości Se niższej, niż $0,600 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Se mogą zawierać niedoborowe, z punktu żywienia zwierząt, ilości tego mikroelementu. Zabłocki [1991] za Wellesem podaje, że zawartość selenu poniżej $0,3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ gleby powinna być traktowana jako niska. Hawkesford i Zhao [2007] cytują liczby graniczne podawane przez Tana. Według tego autora jako deficytową należy uznać zawartość w glebie $< 0,125 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, niską (marginalną) $0,125\text{-}0,175 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, średnią do wysokiej to zawartość $0,175\text{-}3,0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, a powyżej $3,0$ za nadmierną.

Zawartość selenu w glebach najczęściej mieści się w przedziale od $0,1$ do $2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, a średnia jego zawartość w glebach świata wynosi około $0,33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [Butterman i Brown, 2004, White i in. 2004, Laser 2004, Ylärinta 1983]. Jak podaje Oldfield [2002] zawartość selenu w glebach świata mieści się w granicach od ilości śladowych do nawet $1250 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (gleby selenowe w Irlandii). Na podstawie literatury i badań własnych Washington [1983]

podaje, że niska zawartość selenu w glebach była powodem wystąpienia niedoborów tego pierwiastka u zwierząt w niektórych regionach Australii, Nowej Zelandii, Szkocji, Finlandii, Austrii, Niemiec, Francji, zachodniej Rosji, Turcji, Grecji, Kanady i USA. Niska zawartość selenu w glebach występuje również w niektórych rejonach Chin, Japonii, Anglii, Szkocji, Węgier [Broadley i in. 2006, Čuvardić 2003]. Większość gleb Stanów Zjednoczonych z obszaru o niskiej zawartości selenu zawierają mniej, niż $0,5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Se, w wschodniej części Kanady mniej niż $0,2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, a w Nowej Zelandii od $0,1$ do $2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [Washington 1983]. Hartfield i Bahners [1988] podają, iż średnia zawartość selenu w glebach użytkowanych rolniczo Niemiec waha się od $0,020$ do $0,420 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (średnia to $0,123 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), a dla gleb użytków zielonych autorzy ci stwierdzili $0,158 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($0,030$ - $0,650 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Natomiast Laser [2004] w glebach użytków zielonych tego kraju stwierdził zawartość Se od $0,01$ do $0,121 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Dla gleb Wielkiej Brytanii Broadley i in. [2006] podają zawartość $0,1$ - $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, z czego aż w 95% badanych prób była ona niższe niż $1,0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Ducsay i in. [2007] wskazują na średnią zawartość selenu w glebach Słowacji, autorzy ci stwierdzili bowiem od $0,2$ do $0,33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Po raz pierwszy wystąpienie choroby wywołanej przez niedobór selenu u ludzi odnotowano w Chinach. W północnej części kraju (Keshan County) w 1935 roku wykryto kardiomiopatię o charakterze endemicznym (ang. *an endemic, cardiomyopathy*), czyli chorobę mięśnia sercowego prowadzącą do jego dysfunkcji [Yang i in. 1984]. Co ciekawsze, badania Johnsson'a i in. [2000] wskazały, iż całkowita zawartość selenu w glebie z rejonu wystąpienia choroby Keshan była wyższa, niż w glebach pochodzących z innych części tego regionu. Autorzy stwierdzili, iż to nie zawartość selenu w podłożu, lecz czynniki wpływające na biodostępność tego pierwiastka dla roślin wpłynęły na wystąpienie niedoboru Se u ludzi.

Podobną zależność zaobserwowano w glebach Finlandii, które jak podaje Hartikainen [2005], nie charakteryzują się wyjątkowo niską zasobnością w selen, natomiast są młodsze pochodzenia, lekko zwietrzałe, kwaśne i o wysokiej zdolności do absorpcji jonów selenu. Ta bardzo niska dostępność tego pierwiastka spowodowała, iż spożycie tego mikroelementu przez Finów było niższe, niż w innych krajach Europy, Północnej Ameryki i Australii. Dlatego Finlandia była pierwszym krajem, który wprowadził selen do podstawowego systemu nawożenia gleb [Hartikainen 2005].

Hartfield i Bahners [1988] w badaniach nad zawartością Se w roślinach na terenie Niemiec również stwierdzili, iż trawy mogą wykazywać niedoborowe zaopatrzenie w ten pierwiastek nawet w warunkach uprawy na glebie bogatej w ten mikroelement. Głównym

czynnikiem, jaki wpłynął na niską biodostępność tego mikroelementu dla roślin, był kwaśny odczyn podłoża.

Istnieją również gleby o tak wysokiej zasobności w selen, iż rośliny rozwijające się na takim podłożu mogą stanowić poważne zagrożenie dla zdrowia zwierząt. Takie rejony nazwano „selenową prowincją biogeochemiczną”, a ilość tego mikroskładnika w glebach może przekraczać nawet $350 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [Jurkowska, 1996, Odfield, 2002].

Toksyczną zawartość tego składnika zaobserwowano w suchych częściach Chin, na Hawajach, w Meksyku, Kolumbii, a także w niektórych regionach USA i Kanady [Čuvarđić, 2003, Oldfield, 2002]. Zazwyczaj większe jego ilości występują w glebach zasolonych, o wysokiej zawartości żelaza oraz substancji organicznej [Dhillon i in., 2005].

W Chinach toksyczność selenu była odkryta wcześniej, niż niedobór, a jej symptomy u ludzi zaobserwowano w południowej części kraju w prowincji Enshi (odchodzenie paznokci, utrata włosów) [Odfield, 2002]. Również w Indiach występują „prowincje selenowe”. Badania przeprowadzone przez Dhillona i Dhillon [1991] wykazały zawartość selenu w powierzchniowej warstwie gleby na poziomie $2,12 \pm 1,13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, a w warstwie głębszej wynosiła ona $1,16 \pm 0,51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, i była 4-5 razy większa niż na pozostałych terenach tego kraju.

Polska

Badania Piotrowskiej [1984] wskazały, iż średnia zawartość selenu w glebach Polski jest niższa, od średniej światowej i wynosi $0,27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Autorka wskazuje, iż również w naszym kraju występuje znaczne rozproszenie selenu w glebach, co związane jest z ich wykształceniem przeważnie z materiałów zwałowych różnych złodowaceń, w tym wielu silnie posortowanych i wylugowanych z tego pierwiastka. Trafikowska [1992] podaje zawartość średnią na poziomie $0,024 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, a Biernacka i Małuszyński [2006] wskazują na zawartość od 0,108 do $1,570 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Zawartość selenu ogółem w glebach regionu Kujaw i Pomorza, badanych przez Borowską i in. [2007] wahała się od 0,035 do $0,332 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (średnio $0,138 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), co wskazuje na niższą, niż zawartość średnia określona dla Polski. Natomiast Patorczyk-Pytlik i Kulczycki [2009] stwierdzili, iż ilość selenu w glebach gruntów ornych okolic Wrocławia wahała się od 0,081 do $0,494 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (średnio $0,202 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), a w glebach łkowych z tego samego terenu Skoczyliński i Patorczyk-Pytlik [2006] stwierdzili średnią zawartość na poziomie $0,300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ w warstwie 0-5cm i $0,267 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ w 5-20cm. Trafikowska i Kuczyńska [2000] dla gleb gruntów ornych położonych w okolicach Bydgoszczy podają zawartość Se $0,056 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, a dla glebach łkowych $0,610 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Według Zabłockiego

[1991] niska zawartość tego pierwiastka w glebach dawnego województwa szczecińskiego ($0,123 \text{ mgSe} \cdot \text{kg}^{-1}$) była powodem wystąpienia pokarmowej dystrofii u owiec z 21 owczarni położonych na badanym terenie.

Dane przedstawione przez Bożek [1997] wskazują, że najwyższą zawartością selenu charakteryzują się gleby występujące na terenach województw: świętokrzyskiego ($0,62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), śląskiego ($0,50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) oraz zachodnio-pomorskiego ($0,48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Najuboższe gleby w ten pierwiastek to występujące w województwach: lubelskim ($0,20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), warmińsko-mazurskim ($0,21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), opolskim ($0,23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) oraz dolnośląskim ($0,24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

2.3.2. Czynniki wpływające na zawartość oraz formy występowania selenu w glebach

Skala macierzysta

Całkowita zawartość selenu w glebach zależy nie tylko od rodzaju skały macierzystej, ale także od intensywności zachodzenia procesów przemiywania i przemieszczania selenu w profilu glebowym. [Piotrowska, 1985]. Mayland i in. [1989] stwierdzają, iż o zawartości selenu w glebie decyduje nie tylko rodzime podłoże, ale również rzeźba terenu, warunki klimatyczne w trakcie tworzenia się gleby oraz jej wiek. Według tych autorów gleby utworzone ze skał osadowych, zawierające duże ilości materii organicznej, zazwyczaj charakteryzują się wysoką zasobnością w Se. Natomiast uboższe w ten pierwiastek są te utworzone ze skał magmowych, ponieważ podczas aktywności wulkanicznej pod wpływem wysokiej temperatury dochodziło do strat selenu na drodze ulatniania się gazów.

Części koloidalne, materia organiczna

W wielu badaniach autorzy wykazali dodatnią zależność pomiędzy zawartością selenu oraz części koloidalnych w glebie [Ylärinta, 1983, 1984a; Piotrowska, 1984; Zabłocki, 1991; Patorczyk-Pytlik i Kulczycki, 2009, Borowska i Koper, 2011]. Niską zasobnością w ten pierwiastek charakteryzują się przede wszystkim gleby wytworzone z piasków. Piotrowska [1984] dla takich gleb podaje wartości od $0,040$ do $0,100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, a Patorczyk-Pytlik i Kulczycki [2009] od $0,085$ do $0,336 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Bogatsze w selen są gleby gliniaste, co potwierdzają badania Patorczyk-Pytlik i Kulczyckiego [2009], którzy określili średnią dla tych gleb na poziomie $0,228 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Natomiast Piotrowska [1984] dla glin lekkich podaje wartość $0,280 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, a dla glin średnich $0,360 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Borowska [1994] w swych badania stwierdziła, iż średnia zawartość selenu ogółem w glebach czarnoziemnych wynosiła $0,144$

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, a w brunatno ziemnych $0,075 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Autorka wykazała, iż w poziomach orno-próchnicznych wartości te były skorelowane z zawartością próchnicy i frakcji koloidalnej. Chałabis-Mazurek i in. [2008] badali ilość Se ogólnego w glebach łąk położonych na terenach okresowo zalewanych wodami rzeki Bug i stwierdzili prawie dziesięciokrotnie wyższą koncentrację tego pierwiastka w glebie organicznej, niż mineralnej.

Istotną zależność pomiędzy zawartością selenu i węgla organicznego w glebach wykazali w swoich badaniach Borowska [1994], Dhillon i Dhillon [1999], Borowska i Koper [2000], Skoczyliński i Patorczyk-Pytlik [2006], Borowska i in. [2007], Eich-Greatorex i in. [2007], Patorczyk-Pytlik i Kulczycki [2009], Borowska i Koper [2011].

Wyższa zawartość selenu w glebie gliniastej, niż piaskach, jest związana z powinowactwem tego mikroskładnika do minerałów ilastych. Podobnie jak materia organiczna oraz tlenki żelaza, minerały ilaste powodują zatrzymanie selenu w glebach poprzez tworzenie połączeń, co ogranicza straty tego pierwiastka na drodze wymywania, a w konsekwencji przyczynia się do wyższej naturalnej ich zasobności w Se [Giessel-Nielsen i in., 1984, Johnsson, 1991, Masset i in. 2000, Čuvardić, 2003].

Obecność materii organicznej w glebie również może wpłynąć na różnicowanie formy występowania selenu w glebie. Laser [2004] oraz Ylärinta [1983] wykazali, iż w glebach o wysokiej zawartości selenianu (VI) dodatek materii organicznej zmniejszał jego rozpuszczalność.

Obecność, a także przemiany selenu w glebie są uwarunkowane wieloma czynnikami fizykochemicznymi, takimi jak: odczyn, potencjał oksydoredukcyjny, zawartość innych pierwiastków, aktywność mikrobiologiczna, a także charakter powierzchni sorbującej [Johnsson, 1991, Mikkelsen i in., 1989a, Eich-Greatorex i in. 2007]. Może on występować zarówno w połączeniach mineralnych, jak i organicznych, może być sorbowany przez minerały ilaste, tlenki żelaza oraz materię organiczną [Giessel-Nielsen i in., 1984; Buttermann i Brown, 2004; White i in., 2004].

Odczyn i potencjał oksydoredukcyjny

W zależności od wartości pH i potencjału redox pierwiastek ten może występować w glebie na różnych stopniach utlenienia: II, III, IV i VI. W warunkach redukcyjnych (beztlenowych) w glebie obecny jest selen elementarny (0) i selenki (II), w lekko utleniającym środowisku pojawia się selenian (IV), który może występować w dwóch formach: SeO_3^{2-} lub HSeO_3^- . Natomiast selenian (VI) jest dominującą formą w warunkach utleniających [Johnsson, 1991, Čuvardić, 2003].

W glebach alkalicznych, odpowiednio nawodnionych oraz przewiewnych występują głównie seleniany (VI), a więc forma rozpuszczalna i przyswajalna dla roślin, niepodlegająca sorpcji na tlenkach żelaza. W glebach obojętnych dominuje selen w postaci pierwiastkowej, anionu (HSeO_3^-) oraz seleninów ($\text{Me}_2\text{SeO}_3^-$), a więc forma trudno dostępna dla roślin. W glebach kwaśnych, oglejonych i z dużą zawartością materii organicznej występują selenki i siarczki selenu. W takich warunkach selen tworzy trudno rozpuszczalne połączenia z minerałami ilastymi, bądź tlenkami żelaza. Są one słabo mobilne w glebie i niedostępne dla roślin [Johnsson, 1991, Niedzielski i in., 2000, Čuvarđić, 2003].

Formy selenu mogą ulegać transformacji pod wpływem zmian właściwości gleb. Rozpuszczalne seleniany (VI) po wprowadzeniu do gleby o odczynie kwaśnym przechodzą w trudno dostępne dla roślin seleniany (IV). Zwapnowanie gleb może sprzyjać w przechodzeniu Se w formy dostępne dla roślin [Ylärinta, 1983, 1984a, Johnsson, 1991]. Natomiast w glebach, w których panują warunki redukcyjne obecne będą seleniany (IV), a także niedostępne kompleksowe połączenia organiczne oraz selen elementarny [Laser, 2004]. Hawkesford i Zhao [2007] podają, iż seleniany (VI) charakteryzują się większą rozpuszczalnością i mobilnością w glebie, niż seleniany (IV), są bardziej dostępne dla roślin, ale jednocześnie są bardziej podatne na wymywanie w głąb profilu glebowego.

Minerały ilaste i związki żelaza

Jak wspomniano wcześniej, selen może ulegać sorpcji w glebie przez materię organiczną, minerały ilaste oraz tlenki żelaza. Jak podają Barrow i Whelan [1989] selenian (IV) może ulegać w większym stopniu adsorpcji przez takie związki (tlenki/wodorotlenki żelaza, glinu), niż seleniany (VI), a intensywność tego procesu zmniejsza się wraz ze wzrostem wartości pH. Oksy-wodorotlenki żelaza, takie jak hematyt, czy getyt charakteryzują się wysoką zdolnością do sorpcji wielu pierwiastków, w tym także selenu, co powoduje zahamowanie transportu oraz zatrzymanie w glebie [Rovira i in. 2008]. Autorzy ci również potwierdzają wpływ niskiego pH na zwiększenie sorpcji selenu przez badane związki żelaza.

Mechanizm adsorpcji obu form selenu (IV) i (VI) znacznie się różni. Według Neal'a [1995] przyłączanie się Se (IV) do cząstek stałych gleby zachodzi na drodze znanej jako wymiana ligandu, a więc wykorzystujące grupy hydroksylowe obecne na powierzchni cząstek koloidalnych oraz uwodnionych tlenków metali. Mechanizm ten przebiega podobnie jak u takich jonów, jak fosforany, czy arseniany, a więc silnie zależny od wartości pH. Natomiast Se (VI) zachowuje się podobnie jak niespecyficzenie adsorbowane jony takie jak: siarczany, czy azotany. Mechanizm ten dotyczy różnych komponentów części stałej gleby, które

wykorzystują molekuły wodne pomiędzy zewnętrzną warstwą, a adsorbowanym jonem [Neal, 1995].

Martínez i in. [2006] badali sorpcję selenianu (IV) oraz (VI) przez magnetyt. Stwierdzili, iż Se (IV) był lepiej związany z dwoma wewnętrznymi warstwami magnetytu, jako $>\text{FeOHSe}_3^{2-}$ i $>\text{FeHSeO}_3$, natomiast Se (VI) związany był tylko z zewnętrzną warstwą jako $>\text{FeOH}_2^+ - \text{SeO}_4^{2-}$. Podobne zależności stwierdzili Balistrieri i Chao [1990] badając adsorpcję selenu przez amorficzne oksy-wodorotlenki żelaza i dwutlenek manganu. Sorpcja selenianu (SeO_3^{2-}) przez getyt (FeOOH) może być zaburzona w obecności kwasów humusowych w wyniku współzawodnictwa z jonami huminowymi na powierzchni obecnego związku żelaza [Masset i in., 2000].

W praktyce różnicowany mechanizm sorpcji obu form oznacza, iż selenian (IV) może być zatrzymywany w glebie na rzecz selenianu (VI) oraz innych jonów, jak siarczany, ale może być zastąpiony przez fosforany [Eich-Greatorex i in. 2010]. Dlatego też przy nawożeniu fosforem gleb o wysokiej zasobności w selen może wzrosnąć przyswajalność tego mikroskładnika dla roślin [Neal, 1995]. Pezzarosa i in. [1999], Eich-Greatorex i in. [2010] wskazują, iż selen może być tak silnie zabsorbowany przez stałą część gleby, że tylko zmiany fizyko-chemiczne, jak na przykład wymiana z jonami fosforanowymi, mogą spowodować jego przejście do roztworu.

Formy organiczne selenu, a działalność mikroorganizmów

Washington [1983] podaje, iż materia organiczna zawiera rozpuszczalne w wodzie oraz łatwo ulegające rozkładowi związki organiczne selenu. Zwykle stanowią one produkt lub półprodukt aktywności mikrobiologicznej lub powstają poprzez bezpośrednią reakcję ze związkami organicznymi, takimi, jak kwasy humusowe lub fulwowe [Neal, 1995]. Zidentyfikowano takie formy występujące w glebie, jak: nielotne organiczne selenki, seleno-aminokwasy, dimetyloselen w postaci jonu i lotnej metylowej formy (DMSe) oraz dimetylodiselenki (DMDSe) [Cooke i Bruland, 1987]. To oznacza, że w wyniku działalności mikroorganizmów z nieorganicznych związków Se na drodze metylacji powstają lotne związki, dzięki którym selen może ulec stratom do atmosfery z powierzchni gleby oraz z powierzchni wody [Azaizeh i in. 2003, Zayed i in. 1998, de Souza i in. 1998]. W warunkach beztlenowych z selenu elementarnego, selenianu (IV), selenianu (VI) i selenocysteiny produkują one selenowodór [Barrow i Whelan, 1989]. Proces metylacji zależy od takich czynników, jak zawartość i źródło węgla, temperatura gleby, warunków redoks, a także rodzaju gleby. Szczególnie intensywnie zachodzi na glebach piaszczystych, świeżo

zwapnowanych. Selen może być również uwalniany do atmosfery poprzez działalność roślin wyższych [Laser, 2004, Zayed i in. 1998, De Souza i in. 1998].

Warunki klimatyczne

Wysoki poziom opadów może doprowadzić do obniżenia zawartości selenu w glebie. W regionach, gdzie roczny opad deszczu jest mniejszy niż 500 mm, gleby wytworzone ze skał o wysokiej koncentracji Se mogą zawierać toksyczne dla roślin i ich konsumentów ilości tego pierwiastka. Natomiast na terenach wilgotnych nawet przy wysokiej zawartości selenu będzie on znacznie słabiej pobierany, co wynika z tworzenia się w tych warunkach słabo rozpuszczalnych połączeń z żelazem. [Johnsson, 1991, Čuvardić, 2003]. Dębski [1992] podaje, iż w okresie intensywnych opadów może dojść do wymywania łatwo rozpuszczalnych związków Se z gleby, a niskie temperatury dodatkowo mogą utrudniać jego pobieranie przez rośliny.

2.4. Selen w roślinach

Do chwili obecnej nie wykazano niezbędności selenu dla większości gatunków roślin [Terry i in. 2000, Hartikainen 2005, Cartes i in. 2005]. W wielu badaniach wykazano jednak, że mikroelement ten wprowadzony do gleby w niskich dawkach korzystnie wpływa na wzrost i rozwój roślin

Selen stosowny w dawkach 0,1 do 1 mg·kg⁻¹ wykazuje działanie antyoksydacyjne, ograniczając peroksydację lipidów w rajgrasie [Hartikainen i in. 2000]. Podobne zależności dla sałaty podają Ramos i in. [2010]. W badaniach tych dodatek selenu zwiększał wzrost sałaty, natomiast po zastosowaniu wyższych dawek powodował on redukcję plonu roślin. Turakainen i in. [2008] wykazali korzystny wpływ Se na ilość i wzrost kielków ziemniaka, natomiast autorzy ci nie stwierdzili oddziaływania tego pierwiastka na ilość wytworzonych sadzeniaków. Po zastosowaniu nawożenia selenem Lyons i in. [2009] uzyskali 43% wzrost ilości wytworzonych nasion u kapusty polnej, w porównaniu do roślin uprawianych bez dodatku tego mikroelementu. Autorzy ci podkreślają, iż wzrost produkcji nasion mógł być spowodowany zwiększeniem się całkowitej aktywności oddechowej w liściach i kwiatach pod wpływem Se.

Zwiększenie plonu lucerny, w porównaniu do obiektu kontrolnego, stwierdziły Patorczyk-Pytlik i Zimoch [2011]. W warunkach uprawy na glebie lekkiej istotny wzrost ilości wytworzonej masy nastąpił pod wpływem selenu zastosowanego w dawce 20 µg·kg⁻¹, a

na glebie średniej po zastosowaniu $60 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. Azza i in. [2010] wskazują, iż nawożenie selenem może wpłynąć na wzrost plonu, zwiększać ilość niezbędnych olejków oraz zmieniać skład chemiczny rumianku (*Matricaria chamomilla* L.).

Broyer i in. [1966] nie wykazali pozytywnego oddziaływania tego pierwiastka na plonowanie lucerny (*Medicago sativa* L.) i koniczyny (*Trifolium subterraneum* L.). Brak wpływu nawożenia selenem na plonowanie pszenicy stwierdzili Ducsay i in. [2007], Broadley i in. [2010] oraz Grant i in. [2012], a na ilość suchej masy kukurydzy Shanker i Srivastava [2001].

Ochronna rola selenu

Badania przeprowadzone w ostatnich latach wykazały, że selen zwiększa odporność roślin na stres wywołany promieniowaniem UV [Hartikainen i in. 2000, Xue i in. 2001], a także opóźnia proces starzenia się roślin [Xue i in. 2001]. Również Germ i in. [2005] wskazują na pozytywne działanie selenu, gdyż jego obecność w warunkach podwyższonego promieniowania UVB spowodowała wzrost plonowania dyni. Qiang-yun i in. [2008] stwierdzili, iż w obecności selenu w podłożu zwiększyła się odporność kukurydzy na stres wywołany suszą, a Hawrylak [2007] na zasolenie. Selen może być antyoksydantem, bądź aktywatorem ochronnych mechanizmów u ziemniaka, które łagodzą stres oksydacyjny w chloroplastach [Seppänen i in., 2006]. Hartikainen i in. [2000] podają, iż selen przy niskiej zawartości zachował się, jak antyoksydant w żyvcy trwałej, hamując proces peroksydacji lipidów, natomiast w większych ilościach był pro-utleniaczem i zwiększał akumulację produktów powstałych na drodze peroksydacji lipidów. Jego antyoksydacyjną rolę u soi wykazali Djanaguiraman i in. [2005]. Podobne zależności dla kukurydzy stwierdziły Hawrylak i Szymańska [2007]. Autorki dodatkowo zaobserwowały elongację systemu korzeniowego u roślin tego gatunku pod wpływem Se.

Hawrylak-Nowak [2008c] wykazała korzystny wpływ nawożenia selenem na syntezę antocyjanów i związków fenolowych w bazylii, co wskazuje na możliwość wzbogacania biomasy tego gatunku w te związki poprzez nawożenie dolistne tym pierwiastkiem.

Rios i in. [2008] stwierdzili, że wraz ze wzrostem stężenia selenu w pożywce (0 do $120 \mu\text{M}$) w liściach sałaty zwiększała się zawartość aminokwasów i białek. Wielkość tego wzrostu uwarunkowana była formą, w jakiej ten pierwiastek wprowadzono. Po wzbogaceniu pożywki w selenian (IV) w stężeniu $120 \mu\text{M}$ Se sałata zawierała około dwukrotnie więcej aminokwasów i białek niż rośliny kontrolne. Po wprowadzeniu selenianu (VI) wzrost ten był już mniejszy. Zawartość aminokwasów zwiększyła się o 1,75, a białek o 1,42.

Uprawa roślin na glebach wykazujących wysoką zawartość selenu lub też stosowanie wysokich dawek tego mikroelementu może prowadzić do jego znacznego nagromadzenia w tkankach. Powoduje to zahamowanie ich wzrostu i rozwoju [Dhillon i Dhillon 2009, Germ i in. 2007, Cartes i in. 2005, Hartikainen i in. 2000], zmniejszenie zawartości skrobi [Dharma i in. 2009], ograniczenie syntezy białek [Terry i in. 2000], a także zaburzać równowagę jonową w roślinach [Filek i in. 2010, Hawrylak-Nowak 2008b, Mikkelsen i in. 1989a]. Józł i in. [2007] w badaniach nad wpływem tego pierwiastka na strukturę plonu ziemniaka zastosowali dawki 4, 8, 16 i 24 mgSe·kg⁻¹ gleby w postaci selenianu (IV). Autorzy ci stwierdzili, że plon, liczba bulw z 1 rośliny, plon bulw o wymiarach konsumpcyjnych zmniejszały się w miarę zwiększania dawek Se.

Pierwiastek ten może również ochraniać rośliny przed stresem biotycznym. Mechanizm polega na bezpośrednim i pośrednim działaniu, bowiem selen wydzielany przez rośliny w postaci dimetyloselenku odstrasza szkodniki [Quinn i in., 2007].

Selen może również wykazywać funkcje ochronne dla roślin blokując pobieranie takich pierwiastków, jak kadm, czy ołów. Badora [2007] stwierdziła, iż jony Cd²⁺ uległy immobilizacji pod wpływem obecności jonów selenu w środowisku, co ograniczyło pobieranie tego pierwiastka przez rośliny grochu siewnego, a w konsekwencji spowodowało wzrost plonów biomasy i poprawę jego jakości. Natomiast Grant i in. [2012] w uprawie pszenicy nie stwierdzili wpływu dodatku selenu stosowanego w dawce 10-40 g·ha⁻¹ w formie moczenia nasion, nawożenia doglebowego oraz dokarmiania dolistnego na zawartość kadmu w ziarnie.

2.4.1. Zawartość selenu w roślinach

Zawartość selenu w roślinach zależy nie tylko od takich czynników glebowych, jak ilość i forma występowania tego pierwiastka w podłożu, ale także od ich właściwości gatunkowych, a nawet odmianowych. Ze względu na zdolność roślin do akumulowania selenu w tkankach zostały one podzielone na 3 grupy:

1. Rośliny selenolubne, tzw. podstawowe (pierwszorzędowe) identyfikatory-wskaźniki (hiperakumulatory), które zawierają od 1000 do nawet 20000 mg·kg⁻¹. Występują one jedynie na glebach zasobnych w selen i należą tutaj gatunki roślin z rodzaju *Astragalus*, *Conopsis*, *Stanleya*, *Neptunia*, *Xylorhiza*;
2. Drugorzędowe wskaźniki, które mogą nagromadzać do 1000 mg·kg⁻¹. Występują zarówno na glebach „selenowych”, jak i na glebach zawierających niewiele tego

pierwiastka. Mogą bez szkody dla siebie pobierać nawet znaczne jego ilości. Są to gatunki z rodzaju *Aster*, *Astragalus*, *Atriplex*, *Costelleya*, *Grindelia* i *Melililotus*, a także rośliny zbożowe, takie jak pszenica, jęczmień, żyto i kukurydza;

3. Rośliny pobierające niewielkie ilości selenu, wykazujące się niską tolerancją w stosunku do tego pierwiastka. Są to również zboża, trawy, rośliny uprawne, które zawierają mniej niż 50 mg·kg⁻¹ selenu, a najczęściej mniej niż 1 mg·kg⁻¹ [Lauchli, 1993; Jurkowska, 1997; Terry i in., 2000; Oldfield, 2002; Wierzbicka i in., 2007].

Se-hiperakumulatory

Hiperakumulatory różnią się od pozostałych roślin pod wieloma względami. Przede wszystkim przeprowadzają odmienny metabolizm siarki i selenu. Oba pierwiastki „współzawodniczą” między sobą podczas pobierania ich przez rośliny z podłoża oraz wbudowania w związki organiczne. Selenocysteina oraz selenometionina, a więc aminokwasy siarkowe, mogą być włączane do białek, co osłabia ich stabilność i funkcjonowanie w roślinach. Według White i in. [2004] zjawisko to jest przyczyną występowania toksyczności u nie-akumulatorów Se. U roślin tolerujących wysokie stężenia tego mikroskładnika tworzenie się selenometioniny jest ograniczone, natomiast selenocysteina przekształcona jest w niebiałkowe aminokwasy, takie jak metyloselenocysteina, czy selenocystationina. Jak podają Valdez-Barillas i in. [2011] tylko hiperakumulatory mają zdolność do rozróżnienia selenianów od siarczanów oraz być może od organicznych związków selenu w podłożu za pomocą analogów siarkowych.

Hiperakumulatory charakteryzują się wyższą wartością stosunku Se/S w tkankach, jak również więcej gromadzą selenu w częściach nadziemnych, niż korzeniach. Dodatkowo mają wyższą zdolność do gromadzenia selenu w młodych liściach oraz częściach generatywnych (kwiaty, nasiona), niż pozostałe rośliny [Galeas i in., 2007].

Poza tym przeprowadzają odmienną komórkową przemianę materii oraz sekwestrację tkanek. Hiperakumulatory gromadzą selen głównie w postaci metyloselenocysteiny w nerwach liści, wakuolach lub komórkach naskórka. Natomiast pozostałe rośliny akumulują go głównie jako selenian z niewielką ilością selenu organicznego (ok. 5%) w tkankach naczyniowych [Valdez-Barillas i in., 2011].

Se nie-akumulatory

W zależności od zawartości i dostępności selenu obecnego w glebie, a także w zależności od gatunku, a nawet odmiany zawartość tego mikroelementu w roślinach może wahać się od ilości śladowych do nawet 1000 mg·kg⁻¹ [Hartikainen 2005, Terry i in. 2000]. W

roślinach uprawnych mieści się ona najczęściej w granicach od 0,006 do 0,3 mg·kg⁻¹ i zazwyczaj nie przekracza 1 mg·kg⁻¹ [Jurkowska, 1993; Terry i in., 2000]. Mikkelsen i in., [1989b] oraz Szymańska i Hawrylak [2007] podają, że rośliny należące do *Cruciferae* i *Liliaceae*, a więc rośliny wykazujące duże zapotrzebowanie na siarkę, zawierają nawet 2 – 5 razy więcej selenu, niż zboża.

Przy niskiej zawartości selenu w glebie różnice międzygatunkowe w zdolności nagromadzania tego pierwiastka są niewielkie. Dla roślin łąkowych zależność taką wykazali Laser [2004] oraz Patorczyk-Pytlik [2009], a dla warzyw Dhillon i Dhillon [2009]. Przy wysokiej zawartości Se w glebie (0,6-3,1 mg·kg⁻¹) Dhillon i in. [2005] stwierdzili, że najwięcej tego pierwiastka pobrała kapusta (1,5-86,6 µg·kg⁻¹), w dalszej kolejności koniczyna (0,7-58,3 µg·kg⁻¹). Znacznie mniejszą zawartość Se autorzy ci stwierdzili w kukurydzy (1,7-8,6 µg·kg⁻¹), a najmniej w ryżu (1,5-4,6 µg·kg⁻¹).

Zboża oraz produkty zbożowe stanowią ważne źródło selenu w diecie człowieka. Pokrywają one około 70% w Chinach, 40-50% w Indiach, a w Wielkiej Brytanii 18-24%, dziennego zapotrzebowania na ten pierwiastek. W zależności od miejsca pochodzenia danej uprawy zawartość selenu w ziarnie zbóż jest w bardzo dużym stopniu zróżnicowana, wahać się bowiem może od 10 do nawet 3000 µg·kg⁻¹ świeżej masy [Hawkesford, Zhao, 2007]. Zhu i in. [2009] podają, że Kanada i USA produkują pszenicę o najwyższej zawartości Se w ziarnie, natomiast USA i Indie w ryżu. Zawartość Se w ziarnie pszenic uprawianych w Kalifornii (USA), badanych przez Hahna i in [1981], wahała się od 0,02 mg·kg⁻¹ do 3,12 mg·kg⁻¹ (średnio 0,457 mg·kg⁻¹), a w ziarnie kukurydzy od 0,075 mg·kg⁻¹ do 0,208 mg·kg⁻¹ (średnio 0,136 mg·kg⁻¹). Niską zawartość selenu dla ziarna pszenicy stwierdzono dla Wielkiej Brytanii (0,030 mg·kg⁻¹) [Lyons, 2010] oraz Rosji (Zabajkale) - od 0,010 mg·kg⁻¹ do 0,028 mg·kg⁻¹ [Aro i in., 1994]. Kirchman i in. [2005] podają iż w Szwecji średnia zawartość selenu w pszenicy wynosi 0,024 mg·kg⁻¹s.m., a w Islandii 0,058-0,067 mg·kg⁻¹s.m. Dla Finlandii Eurola i in. [2005a] podają, iż zawartość Se w pszenicy jarej w 2004 roku wyniosła 0,14 mg·kg⁻¹s.m. (±0,070), w ozimej 0,058 mg·kg⁻¹s.m. (±0,032), a w życie 0,079 mg·kg⁻¹s.m. (±0,042). W Słowacji średnia zawartość Se dla pszenicy wynosi 0,029 mg·kg⁻¹s.m., dla jęczmienia 0,023 mg·kg⁻¹s.m., a dla żyta 0,015 mg·kg⁻¹s.m. [Ducsay i in., 2007].

Badania Korola i in. [1992] wykazały, iż średnia zawartość selenu w ziarnie polskich zbóż kształtowała się poniżej 0,1 mg·kg⁻¹. Dla badanych prób ziarna pszenżyta średnia zawartość wynosiła 0,077 mg·kg⁻¹, dla pszenicy ozimej 0,074 mg·kg⁻¹, pszenicy jarej 0,066 mg·kg⁻¹, żyta 0,064 mg·kg⁻¹, jęczmienia ozimego 0,062 mg·kg⁻¹, jęczmienia jarego i owsa 0,056 mg·kg⁻¹. Sembratowicz i Grela [1997] podają zawartości Se w ziarnie pszenicy 0,05-

0,200 mg·kg⁻¹, pszenżyta 0,10-0,15 mg·kg⁻¹, żyta 0,15-0,40 mg·kg⁻¹, jęczmienia 0,03-0,35 mg·kg⁻¹, a kukurydzy 0,03-0,30 mg·kg⁻¹. Wesołowski [2006] stwierdził, iż w ziarnie kukurydzy wartość ta może dochodzić do 1 mg·kg⁻¹.

Źródłem selenu dla zwierząt może być również zielonka, bądź siano. Jednak wielu autorów wskazuje na niską zawartość tego pierwiastka w runi. Badania Lasera [2007] przeprowadzone w Niemczech wskazały, iż w warunkach uprawy na glebie o naturalnej zawartości selenu trawy i zioła zawierały mniej Se, niż wartość uważana za optymalną w skarmianiu bydła (poniżej 0,1 mg·kg⁻¹). Podobne wyniki badań prezentują Govasmark i in. [2005]. Ilość selenu dla ziół zebranych z użytków zielonych Norwegii nie przekraczała bowiem 0,06 mg·kg⁻¹.

Jak wskazują badania Skoczylińskiego i Patorczyk-Pytlik [2006] zawartość selenu w runi użytków zielonych okolic Wrocławia kształtowała się na niskim poziomie, wahała się bowiem od 0,015 mg·kg⁻¹ do 0,130 mg·kg⁻¹ (średnio 0,047 mg·kg⁻¹), przy czym określone wartości dla pastwisk były wyraźnie niższe, niż stwierdzone dla łąk. Spośród badanych 42 użytków zielonych jedynie run zebrana z 7 łąk zawierała optymalną ilość Se z punktu widzenia żywienia zwierząt.

O ilości nagromadzonego selenu przez rośliny z użytków zielonych w znacznym stopniu decyduje skład botaniczny. Badania Huang i Wu [1991] wskazują, iż rośliny o głębokim systemie korzeniowym są zdolne do nagromadzania większej ilości tego mikroskładnika. Wielu autorów potwierdza, iż większy udział roślin krótkokorzeniowych się w runi, jak np. koniczyny białej, różnych gatunków traw, może zmniejszyć zawartość selenu w uzyskanej paszy [Laser, 2004; White i in., 2004]. Z drugiej strony, Wu i in. [1997] badając akumulację aminokwasów selenowych w roślinach z rodziny bobowatych, rdestowatych i w trawach stwierdzili, iż więcej tego pierwiastka w tkankach zawierał nostrzyk indica (*Melilotus India*) L., niż pozostałe gatunki, czyli lucerna (*Medicago sativa* L.), kostrzewa (*Festuca arundinacea* Schreb.) i rdest (*Polypogon monspeliensis* L.). Patorczyk-Pytlik [2009] stwierdziła, że zawartość selenu w pięciu analizowanych gatunkach traw wyizolowanych z runi zebranej z użytków zielonych okolic Wrocławia, wahała się od 0,007 do 0,199 mg·kg⁻¹ s.m., (średnio 0,033 mg·kg⁻¹). Zebrane z tych samych gleb zioła i chwasty zawierały znacznie więcej selenu- od 0,015 mg·kg⁻¹ do 0,756 mg·kg⁻¹ (średnio 0,072 mg·kg⁻¹).

Rozmieszczenie selenu w roślinach

Selen jest pierwiastkiem bardzo nierównomiernie rozmieszczonym w roślinach. Liście i owoce zawierają zwykle więcej selenu, niż korzenie i łodygi [Wesołowski, 2006]. Natomiast w badaniach Pazurkiewicz-Kocot i in. [1999] stwierdzono, iż siewki kukurydzy hodowanej na

pożywcze zawierającej selen akumulowały więcej tego pierwiastka w korzeniach, niż liściach. Badania Ulewicz-Magulskiej [2008] nad zawartością selenu w roślinnych surowcach leczniczych dowiodły, iż najwięcej zawierały go nasiona i owoce, potem zioła, liście, kwiaty i korzenie. Badania Sun i in. [2010] nad zawartością selenu w ryżu siewnym (*Oryza sativa* L.) dowiodły, iż koncentracja tego pierwiastka w różnych częściach tej rośliny układała się w kolejności: słoma > otręby > całe ziarno > czysty ryż > plewa. Dla pszenicy Ducsay i in. [2009] podają kolejność: ziarno > słoma > korzenie. Zawartość selenu u pszenicy badanego przez Rutkowską i in. [2004] również była wyższa w ziarnie, niż w słomie.

2.4.2. Pobieranie selenu przez rośliny

Pobieranie selenu przez rośliny jest uzależnione od formy w jakiej ten pierwiastek występuje w glebie. Łatwo pobierne są rozpuszczalne jego formy, jednak proces ten jest selektywny ze względu na różnice gatunkowe oraz odmianowe [Niedzielski i in., 2000, Pezzarossa i in. 1999, Li i in. 2008]. Duże zdolności do pobierania Se z form trudno przyswajalnych wykazują rośliny zaliczane do akumulatorów tego pierwiastka. Broyer i in. [1972] stwierdzili, że *Astrogalus crotolariae* nagromadzał znacznie więcej selenu z selenianu (IV), niż z selenianu (VI).

Na intensywność pobierania selenu wpływ ma wiele czynników, takich jak: skład mineralogiczny gleb, całkowita jego zawartość w podłożu, forma występowania, reakcje synergizmu/antagonizmu jonowego z innymi pierwiastkami, zwłaszcza z siarką i fosforem warunki klimatyczne, właściwości gatunkowe oraz odmianowe [Mikkelsen i in. 1987; Kopsell i Randle, 1997; Hopper i Parker, 1999, Mackowiak i Amacher 2008]. Nagromadzanie tego pierwiastka przez rośliny jest dodatnio skorelowane z pH i temperaturą, natomiast ujemnie z ilością opadów. Jest on słabo pobierany z gleb kwaśnych, przy temperaturze <15°C i przy częstszych deszczach, a znacznie lepiej z gleb alkalicznych, zasolonych, a także zanieczyszczonych [Niedzielski i in., 2000]. Johnsson [1991] stwierdził, iż intensywność pobierania selenu maleje wraz ze zwiększaniem się zawartości materii organicznej oraz części spławialnych w glebie. Większą zawartość form selenu dostępnych dla roślin autor ten stwierdził na glebach piaszczystych, niż ilastych.

Rośliny mogą pobierać selen przez system korzeniowy w postaci mineralnej (selenian IV, selenian VI), a także organicznej jako selenocysteina i selenometionina. Se-elementarny oraz selenki metali praktycznie nie są pobierane [Ylärinta, 1984a; de Souza i in. 1998, White i in., 2004; Hartikainen 2005, Hawrylak i Szymańska 2007, Kápola, 2009]. Formą najlepiej

przyswajalną są organiczne połączenia selenu [Zayed i in. 1998, de Souza i in. 2000]. Rośliny mogą również pobierać ten pierwiastek z opadów atmosferycznych, co w warunkach podwyższonej jego zawartości w powietrzu może dostarczać nawet do 80% ogólnej puli tego pierwiastka [Butterman i Brown, 2004; White i in., 2004].

Z wyjątkiem roślin będących akumulatorami selenu, znacznie łatwiej pobierana jest forma SeO_4^{2-} , niż SeO_3^{2-} . Słabsze pobieranie selenianu (IV) niż selenianu (VI) wielu autorów wiąże z jednej strony ze znaczą absorpcją tej formy w glebie [Eich-Greatorex i in. 2010, Martinez i in. 2006, Masset i in. 2000, Dhillon i Dhillon 1999], a drugiej z mechanizmem ich pobierania. Eich-Greatorex i in. [2010] wykazali, że absorpcji w glebie ulegało 3-6% Se wprowadzonego w postaci selenianu (VI) i 85-95% ilości dodanego do gleby selenianu (IV). Selenian (VI) (SeO_4^{2-}) oraz jego organiczne połączenia są absorbowane z roztworu glebowego na drodze aktywnego procesu za pomocą siarkowych transporterów przez membranę plazmową komórek korzeni, natomiast pobieranie SeO_3^{2-} zachodzi na zasadzie biernej dyfuzji [Terry i in., 2000, Sors i in., 2005, Hawkesford i Zhao, 2007]. Badania Li i in. [2008] dowiodły, iż pomimo tego, że pobieranie selenianu (IV) przez rośliny nie jest metabolicznie zależne, to proces ten może być hamowany przez metaboliczny inhibitor CCCP (*carbonyl cyanide m-chlorophenyl hydrazowe*), jak również przez fosforany obecne w roztworze glebowym. Rosen i Liu [2009] oraz Li i in. [2008] podają, że pobieranie selenianów (IV) przebiega podobnie jak fosforanów, natomiast selenianów (VI) jak siarczanów.

Badania polowe przeprowadzone przez Bisbjerga i Gissel-Nielsena [1969] nad intensywnością pobierania selenu przez gorczycę w zależności od formy, w jakiej ten pierwiastek został wprowadzony do gleby wykazały, że nagromadzenie tego pierwiastka z selenianu (IV) było wprost proporcjonalne do jego stężenia w roztworze glebowym, a z gleb nawiezionych selenianem (VI) było 20-50 razy większe. Ylärinta [1984b] stwierdził, że zawartość selenu w ziarnie pszenicy jarej i jęczmienia uprawianych na glebie z dodatkiem selenianu (IV) była o 75% niższa, niż po wprowadzeniu do gleby analogicznej dawki selenianu (VI).

Zayed i in. [1998] w badaniach nad oceną wpływu formy chemicznej selenu na zawartość tego składnika w 4 gatunkach roślin (brokuł, gorczyca, burak cukrowy, ryż) stwierdzili, że po wprowadzeniu do pożywki $20\mu\text{M}$ Se w postaci selenometioniny zawartość tego pierwiastka w częściach nadziemnych roślin testowych wahała się od $655\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ do $2197\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, dla pożywki wzbogaconej w SeO_4 zawartość ta wynosiła $230\text{--}690\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, a po dodaniu SeO_3 $78\text{--}169\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Sharma i in. [2010] w uprawie rzepaku stwierdzili, że w fazie

formowania rozety rośliny uprawiane na glebie z dodatkiem selenianu (VI) w częściach nadziemnych nagromadziły 75-160 razy, a w korzeniach 2-18 razy więcej Se niż w warunkach uprawy na glebie z dodatkiem selenianu (IV).

Selen u roślin uprawianych na podłożu wzbogaconym w selenian (VI) jest szybko translokowany do części nadziemnych i wówczas jest on dominujący w ksylemie. Po nawożeniu selenianem (IV) pierwiastek ten gromadzi się głównie w korzeniach i jest łatwo przekształcany w inne formy, takie jak selenometionina i szereg innych niezidentyfikowanych i nierozpuszczalnych form Se [Li i in., 2008, Zayed i in. 1998]. De Souza i in. [1998] stwierdzili, iż podczas pobierania selenu przez gorczycę sarepską (*Brassica juncea*) selenian (VI) był dwa razy szybciej nagromadzany, niż selenian (IV). Poza tym SeO_4^{2-} był całkowicie przetransportowany do części nadziemnych roślin, natomiast 90% pobranego SeO_3^{2-} pozostało w korzeniach. Autorzy ci również udowodnili, iż rośliny nawiezione selenianem (VI) kumulowały go w takiej postaci w częściach nadziemnych, natomiast selenian (IV) ulegał przemianom do organicznych jego form, głównie selenometioniny. Zayed i in. [1998] na podstawie badań przeprowadzonych w kulturach wodnych stwierdzili, że stosunek Se zawartego w częściach nadziemnych do ilości w korzeniach wahał się od 0,24 (burak cukrowy) do 0,47 (brokuły) po wprowadzeniu do pożywki selenianu (IV), natomiast z dodatkiem selenianu (VI) wartość tego stosunku wynosiła 1,44 dla ryżu, 9,55 dla brukselki i 17,2 dla gorczycy. Badania Hawrylak i Szymańskiej [2005] potwierdziły, iż selen pobrany w formie selenianu (IV) zatrzymywany był głównie w korzeniach warzyw liściowych, natomiast selenian (VI) był transportowany do części nadziemnych roślin. Autorki wskazują, iż ze względu na wysoką efektywność translokacji do organów nadziemnych selenian (VI) może mieć potencjalnie największe zastosowanie we wzbogacaniu biomasy roślinnej w ten pierwiastek. Arvy [1993] stwierdził, iż około 50% selenianu (VI) pobranego przez korzenie fasoli w ciągu 3 godzin zostało przetransportowane do nadziemnych części, natomiast selenian (IV) zatrzymany był w korzeniach. Autor ten w innych badaniach [Arvy, 1989] wykazał, iż część selenianu (IV) pobierana przez fasolę wnika do korzeni na drodze dyfuzji, a pozostała część jest pobierana metabolicznie.

Badania Pickeringa i in. [2000] wykazały, iż zawartość różnych form selenu w tkankach roślin zależy od ich fazy rozwojowej rośliny - seleniany (VI) gromadzą się w starszych liściach, a jego organiczne formy w młodszych. Pierwiastek ten może występować w tkankach roślin zarówno w formie mineralnej, jak i organicznej, jako selenometionina, selenocysteina oraz selenocystyna. W aminokwasach tych Se zajmuje miejsce siarki. Mogą to być zarówno aminokwasy niebiałkowe lub włączone do białek.

Forma chemiczna wprowadzonego selenu będzie różnicować również straty tego pierwiastka zachodzące na drodze metylacji. Zayed i in. [1998] wykazali, że ulatnianie się zachodziło zarówno z części nadziemnych, jak i korzeni badanych przez tych autorów roślin. W warunkach kultur wodnych określili oni, że wielkość strat Se na tej drodze z części nadziemnych brokułów, gorczycy, buraków cukrowych i ryżu po wprowadzeniu do pożywki selenometioniny była wyższa odpowiednio dla badanych gatunków, o 39, 98, 48 i 15 razy niż po dodaniu selenianu (VI) oraz o 25, 188, 63 i 16 razy wyższa niż określone dla roślin uprawianych na pożywce z dodatkiem SeO_3 . Znacznie szybciej i w większym stopniu niż z części nadziemnych następowało ulatnianie się selenu z korzeni badanych roślin. Zayed i in. [1998] ocenili, że z korzeni roślin uprawianych na pożywce z dodatkiem selenometioniny ulatnianie się Se zachodziło 20-73 razy szybciej niż z SeO_3 , a z formy SeO_4 około 2 krotnie wolniej niż z SeO_3 . Podobne zależności podają de Souza i in. [2000]. Według tych autorów stratom na drodze metylacji może ulagać ponad 20% selenu pobranego przez gorczycę w formie selenometioniny, około 6% z selenianu (IV) i jedynie 2%, jeśli źródłem selenu dla roślin był selenian (VI). Ilość ulatniającego się selenu zależała od zawartości tego pierwiastka w korzeniach oraz od szybkości transformacji mineralnej formy tego pierwiastka w łatwo ulegającą metylacji selenometioninę.

2.4.3. Wpływ selenu na pobieranie makro- i mikroelementów przez rośliny

Większość badań nad wpływem selenu na zmiany składu chemicznego roślin prowadzone jest metodą upraw hydroponicznych [Hawrylak-Nowak 2008b, Filek i in. 2010, Feng i in. 2009, Kopsell i Randle 1997, Kopsell i in. 2000]. W doświadczeniach tych selen wprowadzany jest zarówno w różnych dawkach, jak i formach. Odmienne mechanizmy pobierania selenianu (IV) i selenianu (VI) powoduje, że ocenę wpływu Se na zmiany składu chemicznego roślin powinno rozpatrywać się oddzielnie dla każdej formy.

O wystąpieniu reakcji synergizmu i/lub antagonizmu jonowego w pobieraniu selenu fosforu i siarki przez rośliny decyduje stosunek zarówno ich całkowitej zawartości, jak i form rozpuszczalnych w podłożu.

Selen i siarka

Pomiędzy selenem i siarką może wystąpić reakcja zarówno antagonizmu, jak i synergizmu jonowego. Powodem tego są zbliżona właściwość geochemiczna tych pierwiastków [Terry i in. 2000, Hopper i Parker, 1999, Kopsell i Randle, 1997]. Wzrost zawartości siarki w glebie będzie znacznie silniej ograniczać pobieranie selenu w formie

selenianu (VI), niż wprowadzonego w postaci selenianu (IV), czy też selenometioniny [Zayed i in. 1998, Mikkelsen i Wan, 1990]. Na podstawie literatury Zayed i in. [1998] podają, że znaczne zwiększenie zawartości siarki w podłożu może spowodować spadek ilości nagromadzonego selenu z SeO_4 nawet o 80-100%. Podobne zależności podają Hopper i Parker [1999] oraz Li i in. [2008]. Autorzy ci stwierdzili również, że nawożenie siarką ma bardzo niewielki wpływ na pobieranie przez rośliny selenu wprowadzonego w postaci selenianu (IV).

Wpływ nawożenia siarką na ograniczenie pobierania selenu przez jęczmień i koniczynę łąkową stwierdził Gissel-Nielsen [1973], dla roślin łąkowych zależność taką wykazał Murphy i Quirke [1997], dla pszenicy Cruz-Jimenez i in. [2005], dla żyty Cartes i in. [2006], a dla lucerny Hajiboland i Amjad [2008]. White i in. [2004] stwierdzili, iż SO_4 i SeO_4 są pobierane przez roślinę z wykorzystaniem tych samych mechanizmów, w trakcie których seleniany konkurują bezpośrednio z siarczanami. Seleniany są pobierane przez rośliny z gleby za pomocą siarczanowych transporterów przez błonę komórkową korzeni [Lauchli 1993, Terry i in., 2000].

O tym, który z jonów SeO_4^{2-} czy SO_4^{2-} zostanie pobrany, decyduje stosunek obu pierwiastków w glebie/pożywce wodnej. Przy stosunku Se : S w pożywce wodnej równym 1:1 Kopsell i Randle [1997] wykazali, iż pobieranie i transport SO_4^{2-} i SeO_4^{2-} w cebuli miało charakter antagonizmu jonowego. Jeśli natomiast stosunek ten wynosił 250-500:1, dodatek selenu powodował zwiększenie intensywności pobierania SO_4^{2-} . Ferrari i Renosto [1972] stwierdzili, że u jęczmienia uprawianego w kulturach wodnych, transport obu anionów z podłoża przez korzenie roślin przebiega na stałym poziomie, gdy stosunek S:Se wynosi 1,4:1. W warunkach doświadczeń wazonowych Patorczyk-Pytlik i in. [2009a] stwierdzili, iż zastosowanie niższych dawek siarki (0,03 i 0,06 g·kg⁻¹) spowodowało wzrost zawartości selenu w nadziemnych częściach lucerny. Natomiast zwiększenie ilości wprowadzonej do gleby S do 0,09 g·kg⁻¹ wywołało spadek zawartości tego mikroelementu w roślinach. Nieco odmienna była reakcja uprawianej w tych warunkach gorczycy białej. Synergizm jonowy między Se i S u tej rośliny wystąpił po wprowadzeniu do gleby siarki w dawce 0,03g·kg⁻¹. Zwiększenie ilości S w podłożu spowodowało wystąpienie reakcji antagonizmu jonowego [Zimoch i Patorczyk-Pytlik 2010]. Reakcje antagonistyczne pomiędzy Se i S wykazali również Singh i in. [1980] dla kapuśty sitowatej, White i in. [2004] u roślin z rodzaju *Arabidopsis*, Hawrylak-Nowak [2008a] w korzeniach i pędach pomidora, White i in. [2007] w roślinach okrytonasiennych.

Również obecność selenu w glebie może różnicować zawartość i pobieranie siarki przez rośliny. Hawrylak-Nowak [2008a] stwierdziła obniżenie zawartości S w korzeniach i pędach pomidora w wyniku dodatku do pożywki selenu. Natomiast wzrost zawartości siarki w nadziemnych częściach kukurydzy pod wpływem zwiększania się dawki selenu w pożywce stwierdzili Huang i in. [2008]. Pod wpływem SeO_4^{2-} wzrosła zawartość S w bulwach cebuli („Granex 33”), natomiast zmalała w korzeniach roślin [Kopsell i Randle, 1997]. Wpływ selenu na wzrost zawartości siarki stwierdzili również Ríos i in. [2008] w sałacie, Kopsell i in. [2000] w kapuście warzywnej.

Selen i fosfor

W wielu badaniach wykazano również zależności w pobieraniu przez rośliny selenu i fosforu [Carter i in., 1972; Singh i Singh, 1978; Bañuelos i in., 1990; Liu i in. 2004; Patorczyk-Pytlik i in. 2009b]. Eich-Greatorex i in. [2010] oraz Carter i in. [1972] podają, iż selen i fosfor rywalizują ze sobą w niektórych reakcjach zachodzących w glebie. Wprowadzenie fosforu do podłoża może spowodować wyłączenie Se z łańcucha procesów, co prowadzi do przejścia w formę dostępną dla roślin i jego większe pobranie. Efekt większego pobrania Se przez rośliny pod wpływem P może być związany z bardziej rozwiniętym systemem korzeniowym roślin nawożonych tym pierwiastkiem. W warunkach takich rośliny znacznie lepiej wykorzystują wodę i składniki, w tym również selen [Carter i in. 1972]. Wzrost zawartości selenu w kapuście sitowatej pod wpływem nawożenia fosforem stwierdził Singh [1979], w gorzycy sarepskiej Bañuelos i in. [1990], a w koniczynie (*Trifolium alexandrinum*) Singh i Malhotra [1976]. Broyer i in. [1972] podają, że w roślinach z rodzaju *Astragalus* (Traganek), zarówno w Se-akumulatorach, jak i nie-akumulatorach zawartość selenu malała pod wpływem nawożenia fosforem. Badania Liu i in. [2004] wykazały, iż koncentracja selenu w nadziemnych częściach oraz korzeniach ryżu siewnego była niższa po wprowadzeniu do podłoża fosforu w dawce $0,08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, niż u roślin nie nawożonych tym składnikiem. Dalsze zwiększenie dawek tego makroelementu spowodowało wzrost zawartości Se u roślin. W badaniach przeprowadzonych przez Patorczyk-Pytlik i in. [2009b] wpływ zastosowanego nawożenia fosforem na zawartość Se zależał od wielkości zastosowanej dawki oraz od właściwości gatunkowych roślin testowych. W uprawie kukurydzy przy niskim poziomie nawożenia ($0,08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) wystąpił synergizm, a przy wyższych dawkach P-antagonizmu jonowy między tymi pierwiastkami. W przypadku lucerny autorzy ci stwierdzili zwiększenie się zawartości Se w roślinach wraz ze wzrostem poziomu nawożenia fosforem.

Nawożenie selenem również może różnicować zawartość fosforu w roślinach. Spadek ilości nagromadzonego P pod wpływem wprowadzenia do podłoża selenu stwierdzili Feng i in. [2009] u paproci (*Pteris vittata* L.) oraz Kopsell i in. [2000] w kapuście warzywnej. Odwrotną zależność zaobserwowała Hawrylak-Nowak [2008b] w kukurydzy.

Pozostałe pierwiastki

Wzbogacenie gleby/pożywki w selen może prowadzić do zmian w składzie chemicznym roślin. Kita i Pazurkiewicz-Kocot [2006] wykazali, iż selen może różnicować pobieranie cynku przez siewki kukurydzy, natomiast Hawrylak-Nowak [2008b] stwierdziła wpływ selenu wprowadzonego dożywką wodną w postaci selenianu (IV) na zwiększanie się zawartości P i Ca, a zmniejszenie ilości K w częściach nadziemnych tego gatunku. Badania Filek i in. [2010] wykazały, iż dodatek selenianu (VI) może powodować zmiany w pobieraniu przez rośliny takich pierwiastków, jak K, Ca, Mg, B, Mn, Fe oraz Zn przez siewki rzepaku. Wraz ze wzrostem stężenia Se w pożywce zarówno w korzeniach, jak i częściach nadziemnych tej rośliny zmniejszała się zawartość fosforu i potasu. Ograniczający wpływ selenu na zawartość wapnia i magnezu autorzy ci stwierdzili jedynie dla części nadziemnych rzepaku, brak było natomiast takiej zależności dla pszenicy. Spadek zawartości potasu w kapuście warzywnej pod wpływem zwiększania stężenia Se w pożywce stwierdzili również Kopsell i in. [2000]. Natomiast w badaniach Fenga i in. [2009] u paproci-orliczki (*Pteris vittata* L.) wraz ze wzrostem stężenia Se zarówno w korzeniach, jak i częściach nadziemnych zwiększała się zawartość Ca, Mg i K, malała natomiast zawartość fosforu. Autorzy ci sugerują, że większe nagromadzenie wapnia, magnezu i potasu może być związane z uczestnictwem tych pierwiastków w mechanizmie tolerancji roślin na większe stężenia selenu. Pod wpływem nawożenia selenem zwiększyła się zawartość Ca i Fe u koniczyny białej oraz kostrzewy trzcinowej [Wu i Huang, 1991]. Xu i in. [2010] wykazali, iż nawożenie azotem może powodować zaburzenia w pobieraniu selenu przez ryż.

Selen może również ograniczać pobieranie przez rośliny takich szkodliwych pierwiastków, jak rtęć [Shanker i in., 1996], czy ołów [Pazurkiewicz-Kocot i in., 2009].

Przedstawione zależności wskazują, iż dodatek selenu do gleby/pożywki może zaburzyć pobieranie przez rośliny innych składników. Jednak wpływ ten uwarunkowany jest dawką i formą wprowadzonego do podłoża selenu, a także właściwościami gatunkowymi użytych w badaniach roślin.

2.4.4. Toksyczność selenu dla roślin

Pomimo, że selen nie należy do pierwiastków niezbędnych dla większości gatunków roślin w warunkach ich uprawy na glebach (pożywkach) wykazujących wysoką jego zawartość będzie on nagromadzany w znacznych ilościach [Cartes i in. 2005, Hartikainen i in. 2000, Terry i in., 2000, Mikkelsen i in. 1989, Zayed i in. 1998]. Cartes i in. [2005] w uprawie rajgrasu stwierdzili znaczne zróżnicowanie w zdolności roślin do pobierania selenu w zależności od formy, w jakiej ten pierwiastek został zastosowany. W wyniku zastosowania $0,100 \text{ mgSe} \cdot \text{kg}^{-1}$ w postaci Na_2SeO_4 zawartość tego mikroelementu wzrosła z $0,07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ do $5,72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m., a po wprowadzeniu $10,0 \text{ mgSe} \cdot \text{kg}^{-1}$ uzyskano zawartość równą $247 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. Autorzy ci stwierdzili również, że selenian (IV) zastosowany w dawkach od 0 do $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ nie miał wpływu na plonowanie życicy. Natomiast po zastosowaniu selenianu (VI) już od dawki $2 \text{ mgSe} \cdot \text{kg}^{-1}$ następowało zahamowanie wzrostu roślin. W badaniach przeprowadzonych przez Mikkelsena i in. [1989b] zawartość krytyczna, powodująca 10% spadek plonu grochu, ryżu, gorczycy i pszenicy kształtowała się na poziomie $2\text{-}3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Hartikainen i in. [2000] spadek plonu rajgrasu stwierdzili przy zawartości w tkankach tej trawy $0,851 \text{ mgSe} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Efekt toksyczności może się pojawić w wyniku dodatku selenu w uprawie roślin wrażliwych na ten pierwiastek [Ulewicz-Magulska, 2008]. Próg toksyczności zależy zarówno od gatunku i wieku rośliny, a tolerancja może zwiększać się wraz ze wzrostem stężenia jonów siarczanowych i fosforanowych w roztworze glebowym [Hopper i Parker, 1999; Terry i in., 2000]. Nadmiar Se powoduje zahamowanie wzrostu, więdnienie i usychanie liści, zmniejszoną syntezę białek oraz śmierć niedojrzałych roślin [Wierzbicka i in., 2007].

Wbudowanie selenoaminokwasów do białek może doprowadzić do dysfunkcji enzymów i zmienić ich katalityczną dysfunkcję. Dwa mechanizmy są odpowiedzialne za tolerowanie wysokich stężeń u akumulatorów tego pierwiastka. W pierwszym selen jest wyłączony z białek i włączony do niebiałkowych aminokwasów, takich jak selenometylo-selenocysteina, czy selenocystationina. Drugi mechanizm polega na tym, iż u niektórych selenoakumulatorów selenometionina nie jest syntetyzowana i przez to pierwiastek ten nie jest włączany w struktury białkowe [Lauchli, 1993].

2.5. Rola selenu w organizmie zwierząt

Selen należy do grupy pierwiastków śladowych niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania organizmów zwierzęcych, a także u ludzi. Pierwiastek ten obecny jest w

centrum katalitycznym wielu enzymów zwanych selenoproteinami i włączony jest do łańcucha aminokwasowego w postaci selenocysteiny. Dotychczas zidentyfikowano ich 20, w tym peroksydazę glutationową [Góral, 2005; Włodarczyk i Birkle, 2010]. Stanowi ona ważny element antyoksydacyjnego układu enzymatycznego, uczestniczy w pierwszej oraz drugiej linii obrony przed wolnymi rodnikami. Białka te konstrytuują rodzinę enzymów, które redukują nadtlenki nieorganiczne (H_2O_2) i nadtlenki organiczne (ROOH) z wytworzeniem kwasu selenowego jako produktu pośredniego. Peroksydazy glutationowe (selenoperoksydazy) zawierają selen w postaci selenocysteiny występującej w miejscu aktywnym [Włodarczyk i Birkle, 2010]. Wraz z witaminą E współdziała w hamowaniu peroksydacji wielonasyconych kwasów tłuszczowych [Sembratowicz i Grela, 1997; Dietrych-Szóstak i Burda 1999; Wesołowski, 2006].

Spośród pozostałych selenoprotein można wyróżnić także reduktazę tioredoksynową (biorącą udział w transkrypcji DNA, aktywuje czynniki wzrostu, inhibitory apoptozy i reduktory hydroperoksydazy), selenoproteinę P (wykazującą funkcję ochronną w stosunku do komórek śródbłónka, chroniąc je przed utleniaczami), selenoproteina W (przypuszczalnie pełniącą rolę transportową dla selenu) oraz dejodynazy jodotyroninowe (wpływające na podwyższenia tempa przemiany materii oraz termogenezę) [Burk i in., 2003; Włodarczyk i Birkle, 2010].

Selen jest również odpowiedzialny za stymulowanie układu immunologicznego oraz za działanie przeciwnowotworowe [Pyrzyńska, 2000; Badora, 2000]. Poza tym selen jest niezbędny do syntezy wielu białek złożonych. Dzięki tworzeniu prostych oraz kompleksowych związków z metalami ciężkimi takimi, jak kadm, arsen, rtęć, tal, selen wykazuje właściwości odtruwające i tworzy z nimi słabo rozpuszczalne w wodzie selenki [Strączyk i Drobnica, 2001]. Ponadto mikroelement ten warunkuje prawidłową regulację hormonów tarczycy, zmniejsza ryzyko uszkodzeń wątroby, trzustki, mięśni szkieletowych, wykazuje działanie insulino-podobne [Góral, 2005]. Jego rola w organizmie związana jest z kontrolą procesów peroksydacji lipidów, DNA i RNA. Przenikając przez błony komórkowe reaguje z białkami pobudzając syntezę przeciwciał. Chroni również błony organelli komórkowych przed utleniającym działaniem lipidów [Niedzielski i in., 2000].

Wszystkie związki selenu dobrze się wchłaniają się z przewodu pokarmowego (50-90%) i układu oddechowego. Wchłanianie przez skórę zachodzi w niewielkim stopniu u ludzi [Puzanowska-Tarasiewicz i in., 2009]. Łatwiej jednak wchłaniany jest z połączeń aminokwasów, niż z formy nieorganicznej [Wesołowski, 2006]. Selenometionina wchłania się w ponad 90%, a selenin w 45-70%. Absorbowanie selenu może zmniejszyć się w

obecności metioniny, dużej zawartości błonnika, związku arsenu, kadmu, rtęci, a zwiększa się w obecności witamin A, C, E [Strączyk i Drobnica, 2001]. Na podstawie danych raportu Stanów Zjednoczonych [2000] dotyczących żywności i żywienia, z selenometioniny ponad 90% selenu jest wchłaniane przez organizm, z selenocysteiny prawie 100% (choć duża część jest wydalana z moczem), ponad 50% z selenianu (IV) i jest efektywniejszy, niż selenian (VI). Pierwiastek ten do tkanek doprowadzany jest poprzez erytrocyty krwi, a jego największe stężenie występuje w tarczycy [Wawer, 2007], a z największą wydajnością odkłada się w wątrobie, nerkach, włosach i paznokciach [Wesołowski, 2006].

Selen jest niezwykle ważnym pierwiastkiem w żywieniu zwierząt. Nie tylko jest im niezbędny do prawidłowego rozwoju, ale także pewna ilość tego pierwiastka w tkankach zwierząt może stanowić jego źródło dla ludzi. Według Dębskiego [1992] poziom tego pierwiastka w organizmach zwierząt wolnożyjących oraz w mleku krowim zależne jest od ilości tego pierwiastka występującego w ekosystemie. Niestety aż na 77% obszaru Polski występuje hiposelenoza (niedobór Se) o zróżnicowanym natężeniu [Dębski, 1992]. Markiewicz i in. [2006] stwierdzają niski poziom selenu w tkankach zwierząt na terenie Podlasia, co wskazuje na konieczność nawożenia gleb selenem w tym regionie.

Głównym źródłem selenu dla zwierząt są pasze pochodzenia roślinnego, rzadziej zwierzęcego. Te drugie zawierają go więcej, ale jest on słabiej przyswajalny przez organizm, ponieważ jego bioaktywność wynosi ok. 20%, a z roślinnych nawet 70% [Witkiewicz, 2008]. Głównym problemem w żywieniu zwierząt selenem jest niewielka różnica pomiędzy ilością niedoborową, optymalną, a toksyczną [Gupta i Gupta 2002, McDowell i in. 2002, Govarsmark i in. 2005].

Pierwiastek ten pełni rolę w neutralizowaniu i usuwaniu z organizmów zwierząt metali ciężkich oraz związków organicznych uwalnianych w trakcie zakażeń, czy urazów [Strączyk i Drobnica, 2001; Laser, 2004]. Niedobór selenu w racji żywieniowej zwierząt może doprowadzić do wystąpienia takich schorzeń, jak: pokarmowa dystrofia mięśni, czyli choroba białych mięśni (owce, bydło, konie, trzoda) [Gupta i Gupta, 2002; McDowell i in., 2002; Nielsen, 2004], zwyrodnienie wątroby, degeneracja mięśnia sercowego u świń, skaza wysiękowa u kurcząt [Gissel-Nielsen i in., 1984; Dębski, 1992; Wierzbička i in., 2007], wystąpienie komplikacji okołoporodowych, takich jak zatrzymanie łożyska, poronienia, martwe urodzenia, spadek produkcji mleka [Sembratowicz i Grela, 1997; McDowell i in., 2002]. Może dojść do obniżenia odporności immunologicznej, zespołu biegunkowego, zmniejszenia wydajności wełny u owiec oraz wystąpienia zapaleń gruczołu mlekowego

[Badora, 2000; Pyrżyńska, 2000]. Wszystkie schorzenia mogą doprowadzić do znacznych strat ekonomicznych w hodowli zwierząt.

Zapotrzebowanie na Se

Zapotrzebowanie zwierząt na selen zależy od gatunku i wieku, a jego wykorzystanie z paszy od stopnia przyswajalności i jej składu chemicznego [Jurkowska, 1996]. Preś i Kinal [1996] podają, iż dziennie zapotrzebowanie na selen u krów wysokowydajnych, zasuszonych i jałówek są identyczne i wynoszą $0,3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s.m.}$ paszy, a dla świni $0,1-0,3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s.m.}$ Laser [2004] oraz McDowell i in. [2002] podają, że dzienne zapotrzebowanie dorosłej krowy wynosi 5-7 mg Se. Sembratowicz i Grela [1997] jako optymalną zawartość selenu paszy dla koni i owiec uznali $0,1-0,2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s.m.}$ Według Chałabis-Mazurek i in. [2008] dzienne zapotrzebowanie zwierząt na selen pokrywa pasza o zawartości ok. $0,1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s.m.}$. Gdy jego poziom spada poniżej tej wartości mogą wystąpić objawy niedoboru, natomiast stężenie powyżej $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s.m.}$ może być dawką toksyczną dla zwierząt. Różna jest maksymalna tolerowana dawka selenu wśród poszczególnych gatunków zwierząt (tab.1). Bydło i owce wykazują znacznie wyższą wrażliwość na ten pierwiastek, niż trzoda chlewna, czy drób.

Tab.1. Dzielne zapotrzebowanie na selen u niektórych gatunków zwierząt
[$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s.m.}$ paszy]

Gatunek	Zapotrzebowanie na Se	Górna tolerowana zawartość ⁶
Krowy (ogólnie)	$0,300^1$	2,0
Bydło mięsne	$0,100^2$	
Bydło mleczne	$0,300^2$	
Jałówki	$0,300^3$	
Trzoda chlewna	$0,15-0,300^2$	2,5
Ciężarne i karmiące maciory	$0,150^{1,2}$	
Prosięta i tuczniki	$0,100-0,200^4$	
Prosięta	$0,300^1$	
Warchlaki	$0,350^1$	
Tuczniki młodsze	$0,150^1$	
Tuczniki starsze	$0,100^1$	
Lochy	$0,300^4$	
Owce	$0,100-0,200^{1,2}$	2,0
Kurczęta	$0,100-0,150^2$	5,0
Kury niołki	$0,05-0,08^2$	
Drób	$0,100-0,200^5$	
Konie	$0,100-0,200^1$	

1. Sembratowicz, Grela, 1997; 2. Nielsen, 2004; 3. Preś, Kinal, 1996; 4. Kwiatkowska-Stenzel, 2010; 5. Witkiewicz, 2008; 6. Haremza i in. 1988.

Dębski [1992] proponuje zapobieganie hiposelenozie na terenach ubogich w ten pierwiastek za pomocą metod:

1) Pośrednio- poprzez:

- a) Wzbogacenie gleby poprzez nawożenie z dodatkiem Se

- b) Zraszanie roślin roztworami związków Se w okresie wegetacji
- c) Wzbogacanie wody i pasz

2) Bezpośrednio- podając związki Se zwierzętom iniekcyjnie, doustnie i dożwaczowo.

Nadmiar selenu może doprowadzić do poważnych zatruc zwierząt, co wywołane jest głównie błędami żywieniowymi oraz podawaniem pasz, w skład których wchodzi rośliny selenolubne lub uprawiane na glebach o wysokiej zawartości tego pierwiastka. Do głównych objawów toksyczności Se u zwierząt należą: utrata łaknienia, deformacje kopyt i racic, kulawizna, zaburzenia w rozwoju płodu, niedokrwistość, ślepotą, ślinotok, wychudzenie, dystrofia mięśnia sercowego i narządów mięsnych, wypadanie owłosienia, wydzielanie charakterystycznego zapachu czosnku, spowodowany obecnością w pocie lotnego selenku dwumetylowego [Dębski, 1992; Niedzielski i in., 2000].

2.6. Nawożenie selenem

W krajach europejskich problem nawożenia gleb selenem i na tej drodze wzbogacanie roślin w ten pierwiastek nie był wcześniej znany. Pierwszym europejskim krajem, w którym stosuje się nawożenie tym mikroelementem jest Finlandia. Do 1984 roku spożycie tego pierwiastka przez Finów kształtowało się na bardzo niskim poziomie. Skutkowało to znacznym nasileniem występowania u ludzi, między innymi chorób serca [Hartikainen 2005, Euroła i in. 2005a, Hartikainen i Xue 1999, Euroła i in. 1991]. Podjęto więc próby dodawania selenianu sodu do gnojowicy stosowanej na użytkach zielonych, a także do nawozów mineralnych przeznaczonych pod zboża. Następnie rozpoczęto wzbogacanie nawozów wieloskładnikowych w selenian (VI) sodu i od 1998 dodatek ten wynosi $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. W wyniku tych działań zawartość selenu zarówno w produktach pochodzenia roślinnego, jak i zwierzęcego znacznie się zwiększyła. Hartikainen [2005] podaje, że zawartość tego mikroelementu w ziarnie pszenicy jarej wzrosła z $< 0,01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ do $0,25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. W konsekwencji spożycie przez Finów tego mikroelementu wzrosło z 20-30 mg dziennie do blisko 100 mg/dzień. Ten blisko 3-krotny wzrost spożycia przyczynił się do zmniejszenia o połowę częstotliwości występowania zawałów serca [Euroła i in. 2005b, Johnsson 2005].

W Polsce, tak jak w pozostałych krajach europejskich, selen nie jest wprowadzany do podstawowego nawożenia roślin. Jak podają White i in. [2004] źródłem selenu mogą być niektóre nawozy mineralne, a mianowicie siarczan amonu, który może zawierać do $36 \text{ mgSe} \cdot \text{kg}^{-1}$ nawozu, superfosfat pojedynczy do $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, a potrójny do $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Niewielki asortyment nawozów mineralnych zawierających w swoim składzie selen wynika z małego zainteresowania rolników takim produktem. Wiele firm nawozowych deklaruje możliwość wzbogacania swoich produktów w ten mikroskładnik, wiąże się to jednak ze znacznym wzrostem ceny takiego nawozu. W chwili obecnej skandynawska firma Kemira Browthton oferuje nawóz przeznaczony do nawożenia użytków zielonych – selen AN 27. Selen występuje w mączce bazaltowej – materiale dopuszczonym do stosowania w rolnictwie ekologicznym. Obecność tego mikroelementu deklaruje także producent biostymulatora Bio-Algeen S-90 – preparatu wytwarzanego na bazie wyciągów z morskich glonów i wodorostów. Do nawozów wzbogaconych w ten mikroelement należą między innymi Alkalin Pk, Alkalin NK z krzemem, Suplo-mikro.

Najtańszym źródłem selenu może być popiół lotny z węgla brunatnego, który zawiera 18-30% wapnia, 2-7% magnezu i wszystkie mikroelementy, w tym co najmniej 1mg Se w 1kg. Badane przez Zabłockiego [1991] popioły lotne z Elektrowni Dolna Odra, bazującej na węglu kamiennym, zawierały 15 mgSe·kg⁻¹.

Również nawozy naturalne zawierają pewne jego ilości, jak np. obornik (około 2,4 mg·kg⁻¹), czy gnojowica (0,25 mg·kg⁻¹) [Maćkowiak, 1994]. Wraz ze wzrostem dawki obornika wzrastała zawartość selenu w bulwach ziemniaka [Borowska i Koper, 2006]. Natomiast u koniczyny czerwonej najwyższą zawartość selenu zanotowano po nawożeniu gleb obornikiem na poziomie 40 i 60 t·ha⁻¹, a zastosowanie 80 t·ha⁻¹ obornika spowodowało obniżenie się ilości Se w roślinach [Borowska i Koper, 2008].

Nawozem organicznym zawierającym selen w ilości ponad 10 mg w kg jest mączka rogowa lub rogowo-skórzana.

Istnieje kilka metod wprowadzania selenu do łańcucha roślina – zwierzę - człowiek. Może on być stosowny:

- 1) doglebowo, łącznie z nawozami mineralnymi wzbogaconymi w ten pierwiastek
- 2) dolistne dokarmianie roślin
- 3) w formie zaprawianie nasion.

Zwiększanie zawartości selenu u roślin zależne jest nie tylko od sposobu wprowadzania nawozu (doglebowo, dolistnie, zaprawianie nasion), od zastosowanej dawki Se, jak również użytej formy chemicznej tego pierwiastka.

Jak podają Rutkowska i in. [2004] najefektywniejszym sposobem zwiększania zawartości selenu w roślinach zbożowych może być dolistne stosowanie tego pierwiastka, jednakże sposób ten może stworzyć zagrożenie przekroczenia dopuszczalnych, z punktu widzenia paszowego, ilości Se w roślinach.

Curtin i in. [2006] porównywali wpływ dawki (10 i $20\text{g}\cdot\text{ha}^{-1}$), metody aplikacji selenianu (VI) (doglebowo, zaprawienie nasion oraz dolistne dokarmianie w fazie kwitnienia), terminu wykonania zabiegu (wiosna, jesień) na zmiany zawartości tego mikroelementu w ziarnie pszenicy. Na podstawie uzyskanych wyników autorzy ci stwierdzili, że zabieg doglebowego nawożenia tym pierwiastkiem powinien być wykonywany wiosną. Również Broadley i in. [2010] wykazali większą skuteczność zwiększania zawartości Se w ziarnie pszenicy pod wpływem wiosennego terminu stosowania Na_2SeO_4 , niż jesiennego. Znacznie mniejszą skuteczność działania selenu wprowadzonego do gleby jesienią Curtin i in. [2006] wiążą z możliwością wymycia tego składnika w okresie nasilonych opadów zimowych, a także z możliwością przechodzenia w warunkach znacznego uwilgotnienia gleb łatwo dostępnego selenianu (VI) w formę słabiej dostępną selenianu (IV). Po zastosowaniu dokarmiania dolistnego selenem w dawkach 10 i $20\text{g}\cdot\text{ha}^{-1}$ autorzy ci stwierdzili znaczny wzrost zawartości tego pierwiastka w ziarnie. Przy niższym poziomie nawożenia ($10\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) wynosiła ona $0,24\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, a przy wyższym $0,477\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Znaczny wzrost zawartości selenu w wyniku dolistnego zastosowania $10\text{ gSe}\cdot\text{ha}^{-1}$ w częściach nadziemnych tymotki stwierdził Ylärinta [1984a], a w ziarnie pszenicy ozimej Ducsay i in. [2007]. Dolistne dokarmianie selenem okazało się również bardziej efektywne w zwiększaniu poziomu Se, niż doglebowe wprowadzanie tego pierwiastka u soi [Yang i in., 2003], pszenżyty [Rutkowska i in. 2004], a także u marchwi [Wang i in., 2006].

Wyniki badań uzyskane przez Curtina i in. [2006], Ylärintę [1984a], Yanga i in. [2003], Rutkowską i in. [2004], Wanga i in. [2006] wskazują, że najefektywniejszą metodą zwiększania zawartości selenu w roślinach jest ich dokarmianie dolistne tym pierwiastkiem. Jednak taka aplikacja może prowadzić do zbyt wysokiego, z punktu widzenia żywienia zwierząt, nagromadzenia tego mikroskładnika.

Odmienne rezultaty uzyskali Lyons i in. [2004]. Badania przeprowadzone przez tych autorów wykazały znacznie lepsze działanie selenu zastosowanego doglebowo, niż w formie dokarmiania dolistnego. Stwierdzili oni bowiem, że zawartość selenu w ziarnie pszenicy uprawianej na glebie nawiezionej tym mikroelementem zwiększyła się w zależności od wielkości zastosowanej dawki od 20 do 133 razy, natomiast przy tym samym poziomie nawożenia stosowanym dolistnie zawartość zwiększyła się o 6 do 20 razy.

Badania nad wpływem doglebowego wprowadzenia selenianu (IV) w dawkach $0,05$, $0,10$ i $0,20\text{ mgSe}\cdot\text{kg}^{-1}$ na plonowanie oraz zawartość tego mikroelementu w ziarnie, słomie i korzeniach pszenicy jarej przeprowadzone przez Ducsay'a i in. [2009] wykazały, że nie miały one wpływu na uzyskaną masę, przyczyniły się natomiast do wzrostu zawartości tego

pierwiastka we wszystkich częściach roślin. Po wprowadzeniu $0,2 \text{ mgSe} \cdot \text{kg}^{-1}$ zawartość w ziarnie zwiększyła się z $0,045 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (obiekt kontrolny) do $0,732 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, w słomie z $0,028 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ do $0,277 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, a w korzeniach z $0,22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ do $1,375 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Określona przez tych autorów zawartość selenu w ziarnie i słomie znacznie przekraczała wartość optymalną w żywieniu zwierząt.

Na podstawie przeprowadzonych badań Curtin i in. [2006] stwierdzili, że dawka selenu, zapewniająca otrzymanie plonów o optymalnej zawartości tego składnika w ziarnie pszenicy, powinna wynosić $4 - 5 \text{ gSe} \cdot \text{ha}^{-1}$, stosowanego dogłębowo pogłównie – w fazie pierwszego kolanka, natomiast przy dokarmianiu dolistnym tym pierwiastkiem dawka nie powinna być wyższa niż $5 \text{ gSe} \cdot \text{ha}^{-1}$.

W badaniach Curtina i in. [2006], Rutkowskiej i in. [2004], najmniej skuteczną metodą zwiększania zawartości selenu w ziarnie pszenicy było zaprawianie nasion.

Niezwykle ważny jest również okres stosowania nawozów selenowych. Nawożenie selenianem (VI) jest bardziej efektywne wiosną, ponieważ w okresie wilgotnych zim może dojść do wymywania tej formy Se, gdyż jest ona łatwo rozpuszczalna. Poza tym dostępność tego pierwiastka w glebie spada w miarę upływu czasu. Gupta i Gupta [2002] stwierdzili, że w wyniku zastosowania nawożenia selenem w dawce $10 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1}$ w postaci selenianu (VI) nastąpił wzrost zawartości tego pierwiastka w roślinach jedynie w roku zastosowania, nie zabezpiecza to jednak przed wystąpieniem deficytu w roku następnym. Podobne zależności w nawożeniu selenem użytków zielonych wykazali Loganathan i Hedley [2006].

Zawartość selenu w roślinach zależy nie tylko od wielkości zastosowanej dawki, ale również od czasu jaki upłynął od wykonania tego zabiegu. McDowell i in. [2002] stwierdzili, że po 14 dniach od zastosowania $10 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1}$ selenu w postaci selenianu (VI) zawartość tego pierwiastka w kostrzewie wynosiła $2,42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, po 4 tygodniach $1,23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, po 16 tygodniach $0,28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, a dopiero po 22 tygodniach osiągnęła wartość optymalną w żywieniu zwierząt $0,17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Problem niedoboru selenu zarówno w paszach, jak i w diecie człowieka w najbliższych latach będzie się pogłębiać. Wynika to z faktu znacznego wynoszenia selenu z gleb wraz z plonem roślin, braku nawozów zawierających ten pierwiastek, ograniczania ilości stosowanych nawozów naturalnych, a także zmniejszenia emisji zanieczyszczeń z przemysłu, zwłaszcza z energetyki.

III. Badania własne

3.1. Cel pracy

Niska zawartość selenu w większości polskich gleb powoduje, iż ilość tego pierwiastka w uprawianych na nich roślinach paszowych jest niedoborowa z punktu widzenia żywienia zwierząt. Stąd istnieje konieczność określenia bezpiecznej metody zwiększania ilości tego mikroelementu w roślinach.

W planowaniu zakresu badań postawiono dwa cele: określenie zmian zawartości selenu w okresie rozwoju wegetatywnego 32 odmian kukurydzy, a także ocena wartości paszowej ziarna tych odmian. Na podstawie wyników uzyskanych z badań polowych określono następujące cele szczegółowe wegetacyjnych doświadczeń wazonowych:

- Ocena wpływu nawożenia doglebowego selenem zastosowanego w różnych dawkach na:
 - ✓ odmianowe zróżnicowanie zawartości tego pierwiastka w częściach nadziemnych kukurydzy
 - ✓ dynamikę pobierania selenu przez dwie odmiany kukurydzy
- Ocena wpływu dawki oraz formy chemicznej selenu zastosowanego doglebowo na plonowanie i skład chemiczny roślin
- Określenie wpływu nawożenia doglebowego siarką na pobieranie selenu przez nadziemne części kukurydzy
- Ocena wpływu dawki, formy chemicznej selenu zastosowanego dolistnie oraz dodatku (N, Mg, N + Mg) na zawartość tego pierwiastka w kukurydzy

3.2. Materiał i metodyka badań

3.2.1. Badania polowe

Celem badań była ocena zmian zawartości selenu w częściach nadziemnych 32 odmian kukurydzy w zależności od fazy rozwojowej [faza 3-go liści (BBCH 13); faza 7-9 liścia (BBCH 17-19); pełnia kwitnienia (BBCH 67); dojrzałość pełna – ziarno (BBCH 89)] oraz kategorii agronomicznej gleb, na której były uprawiane. Próby materiału roślinnego i glebowego pobrane zostały w roku 2009 z poletek demonstracyjnych Instytutu Hodowli Roślin Smolice Sp. z o.o. Grupa IHAR.

Charakterystyka gleb

Uwzględnione w badaniach odmiany kukurydzy uprawiane były na dwóch kategoriach agronomicznych – na glebie średniej zaliczonej do kompleksu pszennego bardzo dobrego (II) oraz na glebie lekkiej zaliczonej do kompleksu żytniego dobrego (IVa).

Niektóre właściwości tych gleb pobranych przed wysiewem roślin zamieszczono w tabelach 2, 3 i 4.

Tab.2 Charakterystyka gleb

Kompleks	Kategoria agronomiczna	Grupa granulometryczna
Pszenny bardzo dobry (II)	średnia	Glina lekka
Żytni dobry (IVa)	lekka	Piasek gliniasty mocny

Przeprowadzone badania wykazały, że zarówno gleba kompleksu pszennego bardzo dobrego, jak i żytniego dobrego wykazywały odczyn lekko kwaśny (tab. 3). Oznaczona zawartość węgla organicznego pozwala na zaliczenie ich do gleb próchnicznych. W odniesieniu do wartości podawanych przez Motowicką-Terelak i Terelak [2000] oraz Jakubus [2002] gleby te charakteryzowały się średnią zawartością siarki ogólnej (tab. 3). Według wymienionych autorów średnie zawartości S-og. w glinach lekkich kształtuje się na poziomie $159 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (wahania $100\text{-}180 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), a dla piasków wartość ta wynosi $176 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($100\text{-}270 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Znacznie wyższą zasobnością w selen całkowity charakteryzowała się glina lekka, niż piasek gliniasty mocny (tab. 3). Podobne zależności wykazali Skoczyliński i Patorczyk-Pytlik [2006] oraz Patorczyk-Pytlik i Kulczycki [2009]. Są to jednak wartości porównywalne do

danych przedstawionych przez Piotrowską [1984], która podaje średnią zawartość Se całkowitego dla gliny lekkiej na poziomie $0,280 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, a dla piasków gliniastych $0,200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Udział formy rozpuszczalnej w DTPA w ogólnej zawartości selenu wynosił 5,9% dla gliny lekkiej i 4,7% dla piasku gliniastego mocnego (tab.4), co nie odbiegało od wartości podawanych przez Borowską i Kopera [2006].

Tab. 3 Niektóre właściwości gleb

klasa	pH_{KCl}	Zawartość całkowita		
		Se [$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$]	C-org. [$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$]	S [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]
II	6,0	239	10,2	147
IV	6,0	132	10,8	108

Oceniając zasobność badanych gleb w rozpuszczalne w $\text{molHCl}\cdot\text{dm}^{-3}$ formy mikroelementów (tab. 4) można stwierdzić, że charakteryzowały się one wysoką zasobnością w miedź, średnią w mangan i żelazo. Oznaczona zawartość cynku w glebie średniej pozwala na zakwalifikowanie jej do klasy zasobności średniej, a gleby lekkiej do wysokiej [Anonim 1985].

Tab.4. Zawartość rozpuszczalnych w $\text{mol HCl}\cdot\text{dm}^{-3}$ form wybranych mikroelementów w glebach.

klasa	Se	Cu	Zn	Mn	Fe	Ni
	$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$				
II	14,3	7,5	9,0	144	150	0,84
IV	6,3	8,6	9,5	114	162	1,05

Według informacji uzyskanej w Instytucie Hodowli Roślin w Smolicach na obu kompleksach zastosowano jednakowe nawożenie mineralne. Wynosiło ono:

Azot $120 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$

Fosfor $80 \text{ kgP}_2\text{O}_5\cdot\text{ha}^{-1}$

Potas $150 \text{ kgK}_2\text{O}\cdot\text{ha}^{-1}$

Na obu glebach badane odmiany kukurydzy zostały wysiane w tym samym terminie – siew miał miejsce 24.04. 2009. Osada roślin wynosiła 70 tyś na ha .

Rośliny testowe

W badaniach uwzględniono 32 odmiany kukurydzy różniące się pod względem ich przeznaczenia oraz liczby FAO.

FAO <230

Wilga, Cedro, Wiarus, Jawor, Smolitop

FAO 230-240

Opoka, Reduta, Glejt, Piorun, Smok, Smh220, Dumka, Tur, Bielik, Bejm, Smolik, Rataj, Malibu, Maksym

FAO > 240

Lober, Narew, Kresowiak, Fmb10, Juhas, San, Vitras, Popis, Smh27008, Blask, Bosman, Wigo, Kozak

Rośliny pobierano w 4 fazach fazach rozwojowych. W zależności od celu badań były to części nadziemne lub ziarno. Na jedną próbę składały się 4 rośliny losowo pobierane z czterech rzędów.

Opis doświadczeń

I. Dynamika pobierania selenu przez nadziemne części kukurydzy;

Czynniki:

- ✓ odmiana kukurydzy: 32 odmiany;
- ✓ gleba: klasa II i IV;
- ✓ termin zbioru: faza 3-go liści (BBCH 13); faza 7-9 liścia (BBCH 17-19); pełnia kwitnienia (BBCH 67);

II. Odmianowe zróżnicowanie zawartości selenu w ziarnie kukurydzy;

Czynniki:

- ✓ odmiana kukurydzy: 32 odmiany zebrane w fazie dojrzałości pełnej BBCH 89;
- ✓ gleba: klasa II i IV;

Termin wysiewu oraz zbioru roślin w obrębie poszczególnych doświadczeń przedstawiono w tab. 5.

Tab. 5. Długość wegetacji badanych odmian kukurydzy

	Data wysiewu	Data zbioru	Ilość dni wegetacji	Faza zbioru	
Doświadczenie I	24.04.2009	22.05.2009	28	BBCH 13	3-go liścia
		22.06.2009	59	BBCH 17-19	7-9go liścia
		04.08.2009	102	BBCH 67	Pełnia kwitnienia
Doświadczenie II	24.04.2009	24.09.2009	154	BBCH 89	Dojrzałość pełna

3.2.2. Wazonowe doświadczenia wegetacyjne

Badania te zostały przeprowadzone w warunkach kontrolowanych w Hali wegetacyjnej Katedry Żywnienia Roślin Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, zlokalizowanej w Pawłowicach.

Charakterystyka gleby użytej do przeprowadzenia wegetacyjnych doświadczeń wazonowych

Wszystkie prezentowne w pracy doświadczenia zostały założone w wazonach typu Wagnera o pojemności 5kg gleby, w trzech powtórzeniach, w układzie całkowicie losowym. Podłożem była glina lekka o średniej zasobności w przyswajalne formy fosforu i potasu oraz bardzo niskiej zawartości magnezu przyswajalnego (tab.6). Ze względu na kwaśny odczyn (pH 4,5) gleba ta została zwapnowana w dawce odpowiadającej 1Hh. Po wymieszaniu CaCO_3 z całą masą gleby i wyrównaniu wilgotności do poziomu 60% maksymalnej pojemności polowej, poddano ją 14 dniowej inkubacji. Po tym czasie gleba wykazywała odczyn lekko kwaśny (tab. 6).

Tab. 6. Właściwości gleby użytej do przeprowadzenia doświadczeń

Kategoria gleby	Zawartość frakcji <0,02mm	Grupa granulometryczna	pH _{KCl}	C-org. [g·kg ⁻¹]	Formy przyswajalne [mg·kg ⁻¹]		
					P	K	Mg
średnia	21	Gлина lekka	6,1	7,6	57	118	22

W porównaniu do wartości podawanych w literaturze gleba użyta do przeprowadzenia doświadczeń charakteryzowała się średnią zawartością zarówno siarki ogólnej [Jakubus 2002, Motowicka-Terelak i Terelak [2000], jak i rozpuszczalnej formy tego składnika [Lipiński i in. 2003] (tab.7).

Całkowita zawartość selenu kształtowała się poniżej średniej wartości określonej dla gliny lekkiej przez Piotrowską [1984] (280 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) oraz Patorczyk-Pytlik i Kulczyckiego [2009] (206 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$). Natomiast udział formy Se rozpuszczalnej w DTPA był wyższy o około 3% od wartości podanej przez Borowską i Kopera [2006] dla gleb okolic Bydgoszczy i wynosił 9,65% (tab.6).

Tab. 7 Zawartość selenu i siarki w glebie

S-og.	S-SO ₄	Se-całkowita	Se rozp. w DTPA
mg·kg ⁻¹		μg·kg ⁻¹	
310	11,4	143	13,8

Nawożenie roślin

We wszystkich doświadczeniach zastosowano jednakowe dogłębne nawożenie przedsiewne (tab.8), natomiast ilość składników wprowadzanych pogłównie była uwarunkowana celem prowadzonych badań. Rodzaj stosowanego nawożenia, wielkość dawek i terminy zostaną przedstawione przy omawianiu metodyki prowadzenia poszczególnych doświadczeń.

Tab.8 Nawożenie przedsiewne roślin zastosowane w doświadczeniach wazonowych (I-V)

Pierwiastek	Dawka /wazon	Forma
N	0,5g	NH ₄ NO ₃
K	0,5g	KH ₂ PO ₄
P	0,4g	KH ₂ PO ₄
Mg	0,3g	MgSO ₄ ·7H ₂ O
Na	75mg	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O
Cu	3mg	CuSO ₄ ·5H ₂ O
Fe	30mg	FeCl ₃ ·4H ₂ O
B	3mg	Na ₂ B ₄ O ₂₄ ·10H ₂ O
Mn	20mg	MnSO ₄ ·5H ₂ O
Mo	1mg	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O
Zn	5mg	ZnSO ₄ ·7H ₂ O

W nawożeniu przedsiwnym zastosowane zarówno makroskładniki, jak i mikroelementy, w tym selen, wprowadzane były w postaci roztworów wodnych. Były one mieszane z całą masą gleby w wazonie.

We wszystkich doświadczeniach rośliną testową była kukurydza. Rośliny wysiewano w ilości 12 ziaren na wazon, po 10 dniach wegetacji liczbę tą zredukowano pozostawiając do dalszej wegetacji 6 roślin w wazonie.

W trakcie całego okresu wegetacji roślin wilgotność gleby utrzymywano na poziomie 60% maksymalnej pojemności wodnej, a straty wody na drodze parowania i transpiracji uzupełniano wodą remineralizowaną.

W ramach badań własnych przeprowadzono 5 doświadczeń wegetacyjnych, których celem była ocena:

- Doświadczenie I. Odmianowe zróżnicowanie zawartości selenu w częściach nadziemnych kukurydzy

Czynniki:

- ✓ odmiana kukurydzy: w badaniach tych uwzględniono 5 odmian kukurydzy. Były to odmiany: Bejm, Bielik, Lober, Tur i Wilga
- ✓ dawka selenu : 0- kontrola; 0,1; 0,2 mgSe·kg⁻¹gleby wprowadzonego w postaci wodnego roztworu Na₂SeO₄;

Sprzętu roślin dokonano w fazie BBCH 70 (rozwój ziarniaków), po 85 dniach wegetacji. W trakcie wegetacji zastosowano nawożenie pogłówne:

- 1,5gN/wazon w postaci NH₄NO₃
- 0,5gK/wazon w postaci KCl

- Doświadczenie II. Dynamika pobierania selenu przez dwie odmiany kukurydzy;

Czynniki:

- ✓ odmiana kukurydzy: Bielik i Lober;
- ✓ dawka selenu: 0-kontrola; 0,1; 0,2 mgSe·kg⁻¹gleby wprowadzonego w postaci wodnego roztworu Na₂SeO₄;
- ✓ faza rozwojowa kukurydzy: w badaniach uwzględniono cztery terminy sprzętu roślin testowych - BBCH 16; BBCH 19; BBCH 51; BBCH 70.

Doświadczenie to zostało założone w 12 powtórzeniach. W każdym terminie sprzątano rośliny z trzech wazonów. Przebieg wegetacji roślin przedstawiono w tabeli 9.

Tab. 9. Przebieg wegetacji roślin

Termin	Data wysiewu	Data zbioru	Ilość dni wegetacji	Faza zbioru	
I	01.06.2010	24.06.2010	23	BBCH 16	6-liścia
II		09.07.2010	38	BBCH 19	9-liścia
III		04.08.2010	64	BBCH 51	początek ukazania się wiechy
IV		25.08.2010	85	BBCH 70	rozwój ziarniaków

W trakcie wegetacji roślin zastosowano nawożenie pogłówne:

- I. Termin: 0,5g N/wazon w postaci NH_4NO_3 oraz 0,5g K/wazon w postaci KCl
- II. Termin: 1,0g N/wazon w postaci NH_4NO_3 oraz 0,5g K/wazon w postaci KCl
- III. Termin: 1,5g N/wazon w postaci NH_4NO_3 oraz 1,0g K/wazon w postaci KCl
- IV. Termin: 2,0g N/wazon w postaci NH_4NO_3 oraz 1,0g K/wazon w postaci KCl

- Doświadczenie III. Wpływu formy chemicznej wprowadzonego do gleby selenu na plonowanie i skład chemiczny kukurydzy;

Czynniki:

- ✓ forma chemiczna selenu: Na_2SeO_3 i Na_2SeO_4 ;
- ✓ dawka Se: 0- kontrola; 0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 $\text{mgSe}\cdot\text{kg}^{-1}$ gleby;

Rośliną testową była kukurydza odmiany Lober, sprzątana w fazie BBCH 73 (początek dojrzałości młeczej ziarniaków). Wegetacja trwała 90 dni. W trakcie wegetacji roślin zastosowano nawożenie pogłówne:

- 1,5g N/wazon w postaci NH_4NO_3
- 0,5g K/wazon w postaci KCl
- 0,3g Mg/wazon w postaci $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$

Wraz z nawożeniem selenem stosowanym zarówno w postaci Na_2SeO_3 , jak i Na_2SeO_4 wprowadzono odpowiednie ilości sodu. Wartości te przedstawiono w tab. 10.

Tab.10. Ilość sodu wprowadzona do gleb wraz ze związkami selenu

Dawka Se [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	Ilość wprowadzonego Na [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]
0	0
0,1	0,06
0,25	0,14
0,5	0,29
0,75	0,43
1,0	0,58
2,0	1,16
3,0	1,74
4,0	2,32

- Doświadczenie IV. Wpływ nawożenia siarką na pobieranie selenu przez rośliny;

Czynniki:

- ✓ odmiana kukurydzy: Bielik i Lober;
- ✓ dawki siarki: 0-kontrola; 0,03; 0,06; 0,09; 0,12 $\text{gS}\cdot\text{kg}^{-1}$ gleby wprowadzonej w postaci wodnego roztworu Na_2SO_4 ;

Ocenę wpływu dodatku siarki na plonowanie oraz zawartość selenu w roślinach przeprowadzono na glebie wzbogaconej w ten pierwiastek. Do gleb tych wprowadzono 0,1 mgSe·kg⁻¹ gleby, w postaci wodnego roztworu Na₂SeO₄.

Sprzętu roślin dokonano po 78 dniach wegetacji, w fazie BBCH 70 (rozwój ziarniaków).

W trakcie wegetacji zastosowano nawożenie pogłównne:

- 1,5g N/wazon w postaci NH₄NO₃
- 0,5g K/wazon w postaci KCl

- Doświadczenie V. Wpływ dolistnego nawożenia selenem na zawartość tego pierwiastka w kukurydzy;

Czynniki:

- ✓ dawka selenu: 0-kontrola; 5; 10 µg Se na wazon;
- ✓ forma chemiczna Se: Na₂SeO₃ i Na₂SeO₄;
- ✓ dodatek:
 - 0, 5, 10 µg Se na wazon + 0,5g N/wazon w postaci CO(NH₂)₂;
 - 0, 5, 10 µg Se na wazon + 0,24g Mg/wazon w postaci MgSO₄·7H₂O;
 - 0, 5, 10 µg Se na wazon 0,5 N (CO(NH₂)₂)+ 0,24g Mg/wazon (MgSO₄·7H₂O);

Rośliną testową w tym doświadczeniu była odmiana Lober. Sprzętu roślin dokonano w fazie BBCH 70 (rozwój ziarniaków) po 78 dniach wegetacji. Schemat doświadczenia wraz z terminem wykonania zabiegu nawożenia dolistnego przedstawiono tab.11. Na każdy wazon zastosowano 20 cm³ cieczy roboczej.

Tab. 11. Schemat nawożenia dolistnego roślin-doświadczenie V

Schemat doświadczenia		Zabieg w fazie BBCH 13-15		Zabieg w fazie BBCH 17-19	
Dawka Se [µg/wazon]	Dodatek [g/wazon]	Dawka Se [µg/wazon]	Dawka dodatku [g/wazon]	Dawka Se [µg/wazon]	Dawka dodatku [g/wazon]
0	0,5 N	0	0,25 N	0	0,25 N
	0,24 Mg		0,12 Mg		0,12 Mg
	0,5 N + 0,24 Mg		0,25 N + 0,12 Mg		0,25 N + 0,12 Mg
5	0,5 N	0	0,25 N	5	0,25 N
	0,24 Mg		0,12 Mg		0,12 Mg
	0,5 N + 0,24 Mg		0,25 N + 0,12 Mg		0,25 N + 0,12 Mg
10	0,5 N	5	0,25 N	5	0,25 N
	0,24 Mg		0,12 Mg		0,12 Mg
	0,5 N + 0,24 Mg		0,25 N + 0,12 Mg		0,25 N + 0,12 Mg

Charakterystyka roślin testowych

W poszczególnych doświadczeniach wykorzystano 5 odmian kukurydzy o odmiennych właściwościach (www.hrsmolice.pl):

Lober (FAO 240)

rok rejestracji 2003 – SMOLICE

- Średniowczesny mieszaniec trójliniowy (TC)
- Przeznaczony do uprawy na kiszonkę z całych roślin w I i II rejonie oraz w południowej części III rejonu uprawy
- W doświadczeniach rejestrowych COBORU w latach 2000 – 2003 uzyskał średnio 101,1 % plonu wzorca w suchej masie ogółem oraz 101,3 % w plonie suchej masy kolb (udział kolb w plonie ogólnym suchej masy wynosił 52,9%)
- Wyniki doświadczeń wstępnych wskazują na przydatność także do uprawy na ziarno, szczególnie w II rejonie
- Bardzo dobry wczesny wigor, dobra odporność na wyleganie, długo utrzymująca się zieloność liści i łodyg („typ stay-green”)
- Wysokość roślin: 260 cm
- Zalecana obsada: na ziarno 8 roślin/m², na kiszonkę 10 roślin/m²

Bielik (FAO 230 - 240)

rok rejestracji 2007 – SMOLICE

- Średniowczesny mieszaniec trójliniowy (TC),
- Przeznaczony do uprawy na ziarno i CCM w I i II rejonie uprawy,
- Polecany również na wysokoenergetyczną kiszonkę z całych roślin, szczególnie w północnej części II rejonu i w III rejonie uprawy kukurydzy,
- Nr 1 w badaniach rejestrowych na ziarno (odmiany wczesne): - w latach 2005-2006 - 107,5 % plonu wzorca - w roku 2006 -, 113,5 % plonu wzorca,
- Rośliny średniej wysokości (215-220 cm), długo utrzymujące zieloność ("stay-green"), ziarno "semident",
- Niższe od wzorca porażenie głownią guzowatą i omacnicą prosowianką,
- Zalecana obsada: na ziarno i CCM 8 roślin/m², na kiszonkę 10-10,5 roślin/m².

Tur (FAO 230 - 240)

rok rejestracji 2007 – SMOLICE

- Średniowczesny mieszaniec trójliniowy (TC),

- Przeznaczony do uprawy na ziarno, szczególnie w II rejonie, a na kiszonkę z całych roślin także w III rejonie uprawy,
- W 2-letnich badaniach rejestrowych na ziarno (grupa odmian wczesnych) uzyskał 102 % plonu wzorca,
- Rośliny średniej wysokości (ok. 230 cm), długo utrzymujące zieloność ("stay-green"), ziarno "semident",
- Niższe od przeciętnego (w 2006 r. aż o 50%) porażenie kolb i roślin głowią guzowatą,
- Zalecana obsada: na ziarno 8 roślin/m², na kiszonkę 10-10,5 roślin/m².

Bejm (FAO 230 - 240)

rok rejestracji 2008 – SMOLICE

- Średniowczesny mieszaniec pojedynczy (SC),
- Odmiana o charakterze uniwersalnym, do uprawy na ziarno i CCM w I i II rejonie uprawy kukurydzy oraz na wysokoenergetyczną kiszonkę praktycznie na terenie całego kraju,
- Nr 1 w badaniach rejestrowych na ziarno w grupie odmian wczesnych: - w latach 2006 - 2007 - 108,4 % wzorca - w roku 2006 - 115,6 % wzorca
- Bardzo dobry wynik uzyskany w 2006r. wskazuje na dobrą tolerancję odmiany na niekorzystne warunki klimatyczne i głównie guzowatą, która wystąpiła w tym roku ze szczególnym natężeniem,
- Dobry wczesny wigor siewek,
- Niższe od wzorca (w 2007r. aż o 5 %) porażenie fuzariozą łodygową,
- Rośliny dość wysokie (ok. 240 cm), długo utrzymujące zieloność ("stay-green"), ziarno "semident",
- Zalecana obsada: na ziarno i CCM - 8 roślin /m², na kiszonkę 10 roślin /m² do zbioru.
- Zalecana obsada: na ziarno 8 roślin/m², na kiszonkę 11 roślin/m²

Wilga (FAO 180)

rok rejestracji 1998 – SMOLICE

- Mieszaniec trójliniowy (TC), wyhodowany w Smolicach
- Najwcześniejszy ze wszystkich mieszańców zarejestrowanych w Polsce
- Łączy wczesność z wysokim potencjałem plonowania

- Przeznaczony do uprawy na ziarno I CCM w całej Polsce, szczególnie w rejonach mniej korzystnych klimatycznie, także do uprawy na kiszonkę w strefie podgórskiej oraz na północy i północnym wschodzie Polski
- Zalecany w sytuacjach gdy zachodzi potrzeba opóźnionego siewu, przesiewów lub po poplonach ozimych,
- Bardzo dobra struktura kolby przy uprawie na CCM
- Zalecana obsada: ziarno, CCM 8 - 8,5 roślin/m², na kiszonkę 11 - 12 roślin/m²
- Wysokość roślin: 220 cm

3.2.3. Metodyka analiz chemicznych

Wszystkie analizy chemiczne zarówno materiału roślinnego, jak i glebowego wykonane zostały w laboratorium Katedry Żywienia Roślin Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu.

Zakres przeprowadzonych analiz chemicznych był uwarunkowany celem prowadzonych badań. Wszystkie oznaczenia, zarówno w materiale roślinnym, jaki i glebowym, zostały wykonane dla każdego wazonu oddzielnie, w dwóch powtórzeniach.

1. Materiał roślinny

W celu uniknięcia strat selenu w wyniku metylacji tego składnika w temperaturze wyższej niż 30° C, zebrany materiał roślinny został wysuszony w temperaturze pokojowej. Po zmieleniu określona została zawartość:

- Azotu ogólnego - metodą destylacyjną Kiejdahla, po mineralizacji próbek kwasem salicylo-siarkowym;
- Siarki ogólnej - metodą Buttersa-Chenry`ego [Nowosielski 1974];
- Siarczanów - po ekstrakcji 2% kwasem octowym metodą nefelometryczną [Grzesiuk 1968];

Selen oznaczono zgodnie z metodą podaną w Załączniku do Rozporządzenia Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 23 stycznia 2003 roku „W sprawie metodyki postępowania analitycznego w zakresie określania zawartości składników pokarmowych i dodatków paszowych w materiałach paszowych, prefiksach i mieszankach paszowych”. [Dz.U. 66, poz. 614].

Przebieg analizy oznaczenia selenu w materiale roślinnym

Do parownicy kwarcowej naważono 1g powietrznie suchej masy materiału roślinnego. Następnie dodano kolejno: 3 cm³ metanolu, 5 kropli roztworu wodnego Trytonu X-100 (roztwór 1:10), 10cm³ 40% roztworu azotanu magnezu (MgNO₃·6H₂O) i 10 cm³ stężonego kwasu azotowego (d= 1,4 g·cm³). Po lekkim wymieszaniu zawartości parownicy umieszczono na elektrycznej płycie grzejnej. Próbkę były utrzymywane przez 16h w temperaturze 75°C, następnie temperaturę podnoszono stopniowo do 200°C (1h – 120°C, 1h – 160°C, 2h – 200°C). Po tym czasie parownicy wraz z zawartością wkładano do zimnego pieca, podnosząc stopniowo temperaturę przez 3h do 500°C. W tej temperaturze pozostawiono próbki przez następne 4h. Po ostudzeniu do parownic dodawano 20 cm³ roztworu kwasu chlorowodorowego i wody destylowanej (roztwór 1:1) i ogrzano przez 1h w temperaturze 95°C na płycie grzejnej. Zawartość parownic następnie przenoszono ilościowo do kolby miarowej na 50cm³. Pomiaru dokonano metodą AAS w połączeniu z generacją wodorków na aparacie Spectra 220 FS Varian z przystawką VGA-76.

Optymalizacji warunków mineralizacji i pomiarów dokonywano określając powtarzalność i odzysk z certyfikowanego materiału roślinnego INCTTL-1 o zawartości 0,076 mgSe·kg⁻¹. Określenia zawartości selenu w materiale referencyjnym wykonano zgodnie z przedstawioną metodyką, uzyskując średni odzysk 97% oraz względny błąd metody 4%. Do każdej serii dołączana była również własna próba kontrolna.

W celu oznaczenia makroskładników i pozostałych mikroelementów (Zn, Cu, Mn, Fe, Ni) materiał roślinny mineralizowano na sucho w piecu muflowym w temperaturze 450°C przez 10 godzin. Uzyskany popiół zadano stężonym HNO₃. Po odparowaniu kwasu na łaźni, pozostałość rozpuszczono w molHNO₃·dm⁻³. W uzyskanym przesączu określono zawartość:

- Fosforu- metodą kolorymetryczną wanado-molibdenową;
- Potasu, wapnia, sodu - metodą metodą emisyjnej spektrofotometrii, na aparacie AAS 3.
- magnezu oraz miedzi, cynku, manganu, żelaza, niklu - metodą spektrofotometrii atomowo-absorpcyjnej na aparacie Spectra 220 FS Varian, zachowując właściwe dla tych pierwiastków parametry długości fali, wysokości palnika i szerokości szczeliny.

2. Materiał glebowy

Po wysuszeniu i roztarciu materiał glebowy został przesiany przez sito o średnicy oczek 2 mm. Próbkę przeznaczoną do oznaczeń zawartości selenu dodatkowo roztarto w móżdżerze agatowym. W materiale glebowym oznaczono:

Odczyn (pH) w mol $\text{KCl} \cdot \text{dm}^{-3}$ metodą potencjometryczną, przy stosunku gleby do roztworu 1:2,5

zawartość:

- Fosforu i potasu- metodą Egnera-Riehma; Fosfor oznaczono metodą kolorymetryczną, a potas metodą fotometrii płomieniowej;
- Magnezu rozpuszczalnego- metodą Schachtschabela. Pomiaru dokonano metodą spektrofotometrii atomowo-absorpcyjnej na aparacie Spectra 220 FS Varian
- Siarki ogólnej- metodą nefelometryczną Buttersa-Chedery`ego [Nowosielski 1974];
- Siarki siarczanowej- metodą nefelometryczną Bradsley`a i Lancastera;
- Rozpuszczalnej formy Cu, Zn, Mn, Fe, Ni po ekstrakcji mol $\text{HCl} \cdot \text{dm}^{-3}$ metodą metodą spektrofotometrii atomowo-absorpcyjnej na aparacie Spectra 220 FS Varian
- Selenu- metodą spektrofotometrii atomowo-absorpcyjnej w połączeniu z generacją wodorków na aparacie Spectr AAFS Varian z przystawką VGA-76 po wcześniejszym przygotowaniu próbek według metody podanej przez Beach (1992);

Przebieg analizy oznaczenia selenu w materiale glebowym

Do parownicy kwarcowej naważano 1g przesianej przez sito i roztartej w moździerzu agatowym glebę i zalewano 10 cm^3 roztworu 1:1 HNO_3 i wody redestylowanej. Następnie próbki podgrzewano przez 15minut w temperaturze 95 °C na płycie grzejnej. Po ochłodzeniu dodawano 5ml stężonego HNO_3 i ponownie podgrzewano pod przykryciem przez 30 minut. Po tym czasie dodawano 3 cm^3 H_2O_2 i nadal podgrzewano w temperaturze 95°C do momentu rozłożenia się perhydrolu. Następnie dodawano kolejne porcje H_2O_2 (po 2 cm^3) do chwili odbarwienia się roztworu. Do bezbarwnego roztworu dodawano 20 cm^3 roztworu HCl i wody redestylowanej (1:1) i podgrzewano przez 1h w temperaturze 95°C. Następnie próbkę przenoszono do kolbek miarowych na 50 cm^3 . W uzyskanym przesączu dokonano pomiaru stężenia selenu.

3. Metodyka oceny statystycznej

Opracowanie statystyczne przeprowadzono z wykorzystaniem programów STATISTICA 8.0. oraz Microsoft Office Excel 2010. Za pomocą programów dokonano obliczenia wartości średniej arytmetycznej, odchylenia standardowego, wartości minimalnych

i maksymalnych, współczynnika zmienności, korelacji przy poziomie istotności $p=0,05$ oraz analizy wariancji za pomocą testu Duncana.

3.3. Wyniki badań - badania polowe

Celem tych badań była ocena zmian zawartości selenu w częściach nadziemnych 32 odmian kukurydzy w zależności od fazy rozwojowej [faza 3-go liści (BBCH 13); faza 7-9 liścia (BBCH 17-19); pełnia kwitnienia (BBCH 67); dojrzałość pełna – ziarno (BBCH 89)] oraz kategorii agronomicznej gleb, na której były uprawiane. Wyniki uzyskane w tych badaniach stały się podstawą do wytypowania odmian kukurydzy uwzględnionych w przeprowadzonych doświadczeniach wazonowych.

3.3.1. Doświadczenie I. Dynamika pobierania selenu przez nadziemne części 32 odmian kukurydzy

Zawartość selenu w nadziemnych częściach badanych odmian kukurydzy przedstawiono w tabeli 12 oraz na wykresach (fig. 1,2), a wartości liczbowe w tabelach I - zamieszczonych w materiałach źródłowych.

Zawartość selenu w nadziemnych częściach kukurydzy zebranej z poletek demonstracyjnych Instytutu Hodowli Roślin w Smolicach była znacznie zróżnicowana i zależała od właściwości odmianowych, fazy rozwojowej, ale także od kategorii agronomicznej gleby, na której była uprawiana (fig. 1, 2). Obliczony współczynnik zmienności (V) dla 32 odmian uprawianych na glebach obu kompleksów przydatności rolniczej wynosił 34 % (BBCH 13), 30 % (BBCH 17-19) oraz 33% (BBCH 67) (tab.7). Mniejszym zróżnicowaniem zawartości Se charakteryzowały się odmiany uprawiane na glebie kompleksu żyniego dobrego (IVa) (tab.12), niż określone dla pszennego bardzo dobrego.

Tab.12. Średnia oraz wahania zawartości Se w częściach nadziemnych 32 odmian kukurydzy

	22.05 BBCH 13	22.06 BBCH 17-19	4.08 BBCH 67
kompleks pszeny bardzo dobry II			
Średnia	62,7	42,6	31,2
SD	21,3	14	11,5
V (%)	34	33	37
NIR0,05	7,37	4,85	3,98
Min	30	21,9	12,5
Max	119,4	74,3	53
kompleks żytni dobry (IVa)			
Średnia	46,6	35,2	27,7
SD	11,6	7,8	7,2
V (%)	25	22	26
NIR0,05	4,01	2,7	2,5
Min	29,5	23,1	17
Max	75,5	64,4	43,2
dla obu kompleksów			
Średnia	54,6	38,9	29,5
SD	18,8	11,8	9,7
V (%)	34	30	33
NIR0,05	4,61	2,9	2,37
Min	29,5	21,9	12,5
Max	119,4	74,3	53

Najwyższą zawartością selenu charakteryzowały się rośliny młode- sprzątane w fazie 3-go liścia (BBCH 13). Wraz z rozwojem roślin zawartość tego mikroelementu zmniejszała się, co jest związane z wystąpieniem efektu rozcieńczenia na wskutek intensywnego przyrostu masy (tab. 12, fig. 1, 2). W fazie 9-go liścia (BBCH 17-19) była ona już niższa, odpowiednio dla kompleksów, o 32% i 24%, niż określona dla roślin zebranych we wcześniejszej fazie.

Wpływ gleby na zawartość selenu w roślinach uwidocznił się przede wszystkim we wcześniejszych fazach rozwojowych. Stwierdzono bowiem, że w fazie 3-go liścia zawartość tego mikroelementu w badanych odmianach kukurydzy uprawianych na glebie średniej była o 26% wyższa niż określona dla roślin zebranych z gleby lekkiej. W kolejnej fazie rozwojowej (BBCH 17-19) różnica ta kształtowała się na poziomie 17%, a w BBCH 67 średnia zawartość selenu w roślinach zebranych z obu gleb była zbliżona.

Analizując zawartość selenu w suchej masie poszczególnych odmian można stwierdzić, że w warunkach uprawy kukurydzy na glebie kompleksu pszenego bardzo dobrego (II) w fazie 3-go liścia najwięcej selenu zawierała odmiana Reduta ($119 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$) i jako jedyna spełniała normy paszowe w żywieniu bydła. U czterech z badanych odmian (Jawor, Maksym, Opoka, Bosman) stwierdzono zawartość Se w przedziale $80\text{-}100 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

s.m. Największą grupę stanowiły odmiany, które nagromadziły w swych tkankach od 60-80 $\mu\text{gSe}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$ W przypadku dwóch odmian (Wilga i Smok) zawartość selenu była bardzo niska, kształtowała się bowiem poniżej 40 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$ (fig.1, tab.I).

W fazie 7-9-go liścia mieszańce Jawor, Dumka, Bielik, Maksym i Malibu nagromadziły w nadziemnych częściach wyraźnie więcej selenu niż pozostałe odmiany. W ich suchej masie stwierdzono powyżej 60 $\mu\text{gSe}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$ Sześć odmian charakteryzowało się bardzo niską zawartością tego pierwiastka. Mniej niż 30 $\mu\text{gSe}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$ stwierdzono dla odmian: Wilga, Cedr, Smolitop, Smok, Smh27008) (fig.1, tab.I).

W ciągu kolejnych 43 dni wegetacji (BBCH 67) zawartość selenu w suchej masie roślin testowych zmniejszyła się średnio o 27% w porównaniu do stwierdzonej we wcześniejszej fazie (BBCH 17-19). Wielkość tego spadku uwarunkowana była właściwościami odmianowymi uprawianej kukurydzy. W najmniejszym stopniu spadła zawartość selenu u odmiany Lober (spadek o 4%) oraz Malibu (spadek o 7%), a w największym w suchej masie odmian Smolitop i Reduta (spadek o 52%).

Oceniając zawartość selenu w kukurydzy sprzątanej w fazie pełnia kwitnienia (BBCH 67) można stwierdzić, iż spośród 32 badanych odmian uprawianych na glebie kompleksu pszennego bardzo dobrego aż 53% stanowiły rośliny zawierające 20-40 $\mu\text{gSe}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$, a tylko u 9% odmian ilości tego pierwiastka przekraczała 50 $\mu\text{gSe}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$

W omawianej fazie rozwojowej najwięcej selenu zawierały odmiany Bielik, Maksym i Malibu, które w swych tkankach nagromadziły powyżej 50 $\mu\text{gSe}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$ Odmianami o najniższej zawartości Se w tej fazie (zawierające poniżej 20 $\mu\text{gSe}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$) były Rataj, Wilga, Blask i Smolitop (fig.1, tab.I).

Uzyskane wyniki wskazują, że nawet w warunkach uprawie kukurydzy na glebie wykazującej zawartość selenu na poziomie 0,239 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (tab. 3) zawartość tego mikroelementu będzie zależna od zdolności nagromadzania tego pierwiastka przez uprawianą odmianę.

Obliczona średnią zawartość Se w kukurydzy uprawianej na glebie kompleksu żytniego dobrego (IVa) była niższa niż określona dla kompleksu pszennego bardzo dobrego, ale w przypadku 7 odmian zebranych w fazie 3-go liścia, a także 13 odmian z późniejszych terminów wystąpiła zależność odwrotna (fig.2, tab.II). W fazie 3-go liścia najwyższą zawartością tego pierwiastka charakteryzowała się odmiany Maksym i Opoka - powyżej 70 $\mu\text{gSe}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$, a najniższą Glejt (29,5 $\mu\text{gSe}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$). Blisko 40% spośród 32 analizowanych odmian nagromadziło ten mikroskładnik w ilości 20-40 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$ (Wigo, Smolitop, Reduta,

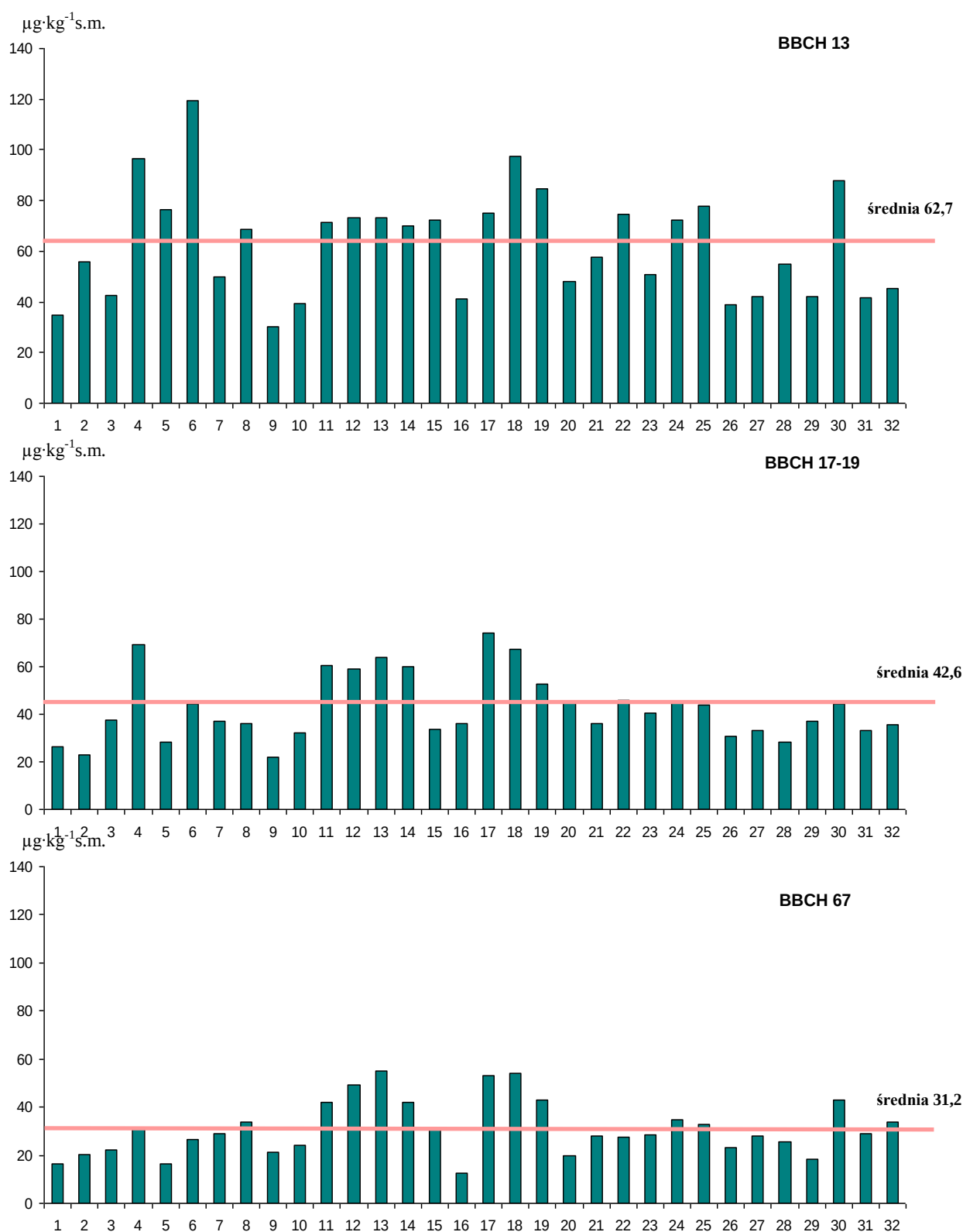
Smok, Dumka, Bielik, Lober, Fmb10, Juhas, Bosman, Wigo, Glejt), natomiast u 11 mieszańców stwierdzono zawartość selenu od 40 do 50 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$

W fazie 7-9-go liścia najwięcej badanego pierwiastka zgromadziła odmiana Kresowiak (60 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$), a najmniej Glejt (23,1 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$).

W pełni kwitnienia (BBCH 67) odmiana Rataj zawierała najwyższą ilość tego pierwiastka (43,5 $\mu\text{gSe}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$) spośród wszystkich badanych. Najślabiej wykorzystującą selen była Wilga. Odmiana ta bez względu na kategorię agronomiczną gleby nie nagromadziła więcej, niż 20 $\mu\text{gSe}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$ (fig.2, tab.II).

Omawiając zawartość selenu w odmianach kukurydzy sprzątniętych w tej fazie uprawianych na glebie klasy IV można stwierdzić, że 78% badanych odmian zawierało 20-40 $\mu\text{gSe}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$, natomiast odmiany wykazujące zawartość Se powyżej 40 $\mu\text{gSe}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$ stanowiły 9%.

Podsumowując można stwierdzić, że żadna z 32 badanych odmian nie zawierała w nadziemnych częściach roślin zebranych w fazie pełni kwitnienia dostatecznej, z punktu żywienia zwierząt, zawartości selenu.



1. Wilga; 2. Cedr; 3. Wiarus; 4. Jawor; 5. Smolito; 6. Reduta; 7. Glejt; 8. Piorun; 9. Smok; 10. Smh 220; 11. Dumka; 12. Tur; 13. Bielik; 14. Bejm; 15. Smolik; 16. Rataj; 17. Malibu; 18. Maksym; 19. Opoka; 20. Lober; 21. Narew; 22. Kresowiak; 23. Fmb10; 24. Juhas; 25. San; 26. Vitras; 27. Popis; 28. Smh27008; 29. Blask; 30. Bosman; 31. Wigo; 32. Kozak

Fig. 1. Zawartość selenu [$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$] w nadziemnych częściach kukurydzy uprawianej na glebie kompleksu pszennego bardzo dobrego (II)



1. Wilga; 2. Cedr; 3. Wiarus; 4. Jawor; 5. Smolitoj; 6. Reduta; 7. Glejt; 8. Piorun; 9. Smok; 10. Smh 220; 11. Dumka; 12. Tur; 13. Bielik; 14. Bejm; 15. Smolik; 16. Rataj; 17. Malibu; 18. Maksym; 19. Opoka; 20. Lober; 21. Narew; 22. Kresowiak; 23. Fmb10; 24. Juhas; 25. San; 26. Vitras; 27. Popis; 28. Smh27008; 29. Blask; 30. Bosman; 31. Wigo; 32. Kozak

Fig. 2. Zawartość selenu [$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$] w nadziemnych częściach kukurydzy uprawianej na glebie kompleksu żytanego dobrego (IVa)

Na wykresie 3 (Fig. 3) zestawiono średnie zawartości selenu w nadziemnych częściach kukurydzy w zależności od klasy wczesności i kompleksu przydatności rolniczej, na której były uprawiane.

Uzyskane dane wskazują, że w warunkach uprawy na glebie średniej różnice w zawartości Se w zależności od klasy wczesności były znacznie większe, niż określone dla klasy IVa. Na kompleksie psennym bardzo dobrym najwięcej selenu zawierały odmiany średnio wczesne, a najmniej wczesne. Porównując obliczone wartości średnie dla kolejnych faz rozwojowych można stwierdzić, że w czasie w największym stopniu spadała zawartość Se u odmian wczesnych (o około 40%), natomiast u odmian średnio wczesnych i późnych w fazie BBCH 17-19 była ona o około 30%, a w fazie BBCH 67 o około 25% niższa, niż określona dla fazy wcześniejszej.

Na glebie kompleksu żytniego dobrego średnia zawartość w fazie BBCH 17-19 była niższa niż obliczona dla wcześniejszej fazy (BBCH 13) o odpowiednio dla klas wczesności o 32%, 27% i 18%. Pomiędzy tą fazą a pełnią kwitnienia u odmian wczesnych i średnio wczesnych nagromadzenie selenu nie uległo zmianie, natomiast u odmian późnych zawartość ta spadła o 30%.

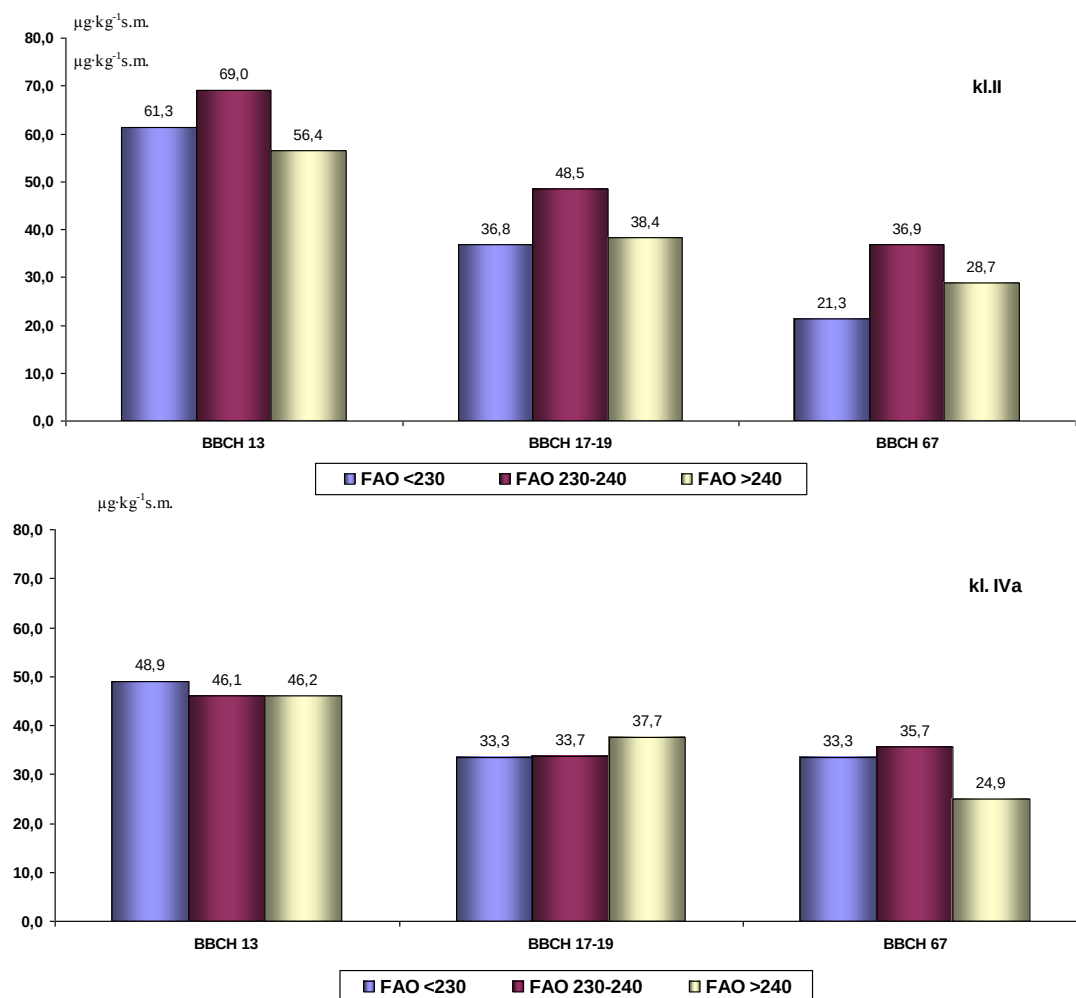
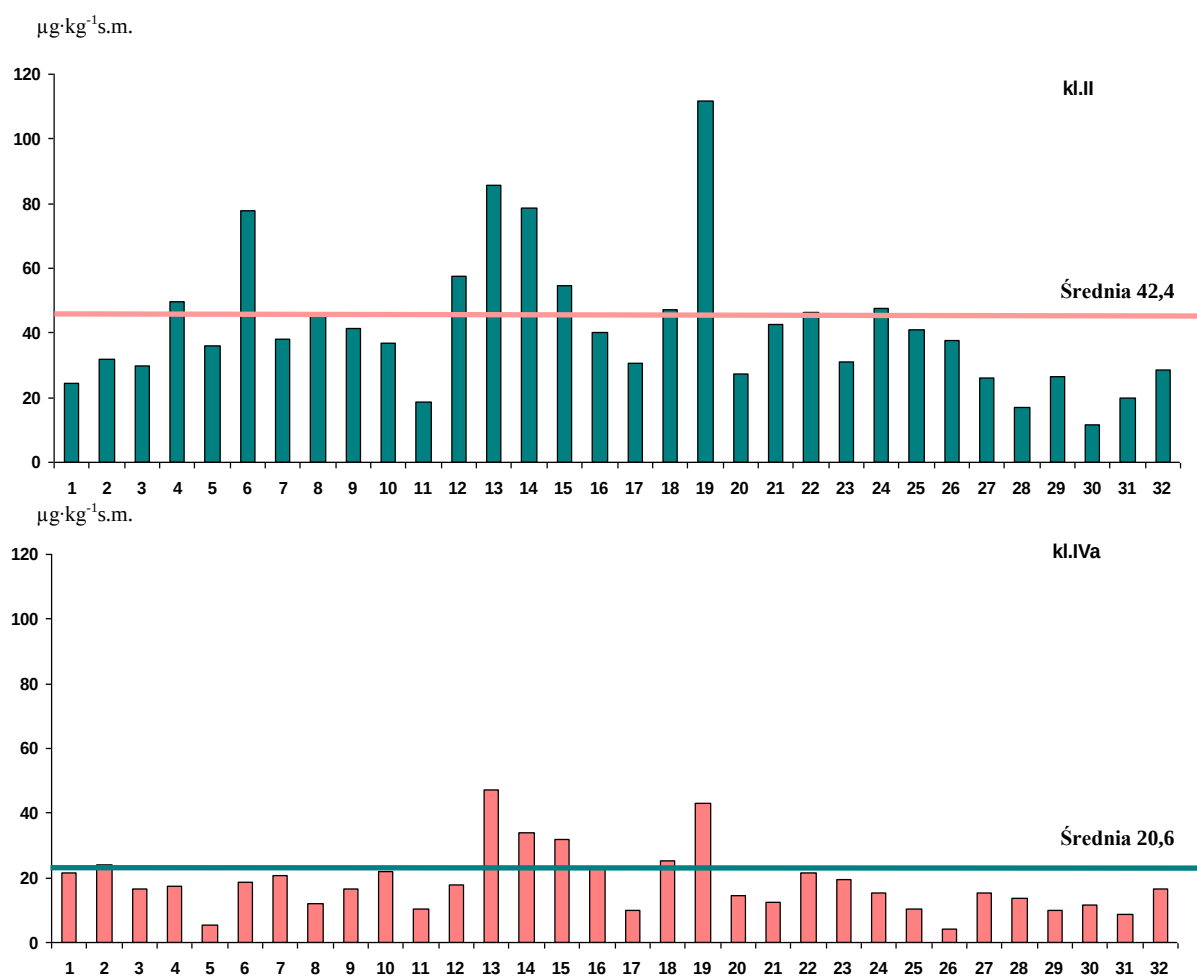


Fig. 3 Zawartość selenu w nadziemnych częściach kukurydzy w zależności od FAO oraz fazy rozwojowej [$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$]

3.3.2. Doświadczenie II. Odmianowe zróżnicowanie zawartości selenu w ziarnie kukurydzy

Przeprowadzone badania wykazały, iż zawartość selenu w ziarnie kukurydzy była znacznie zróżnicowana, wahała się bowiem od 4,0 do 111,9 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$ (tab. III). Obliczony współczynnik zmienności (V) dla 32 odmian uprawianych na glebach obu kompleksów przydatności rolniczej wynosił 62%. Istotny wpływ na ilość tego pierwiastka w ziarnie miała kategoria agronomiczna gleb, a głównie zawartość w tych glebach selenu (tab.3, 4). Średnia zawartość tego pierwiastka w ziarnie kukurydzy zebranej z gliny lekkiej (kl. II) była około dwukrotnie większa, niż określona u roślin uprawianych na piasku gliniastym mocnym (kl.IV). (fig.4).



1. Wilga; 2. Cedr; 3. Wiarus; 4. Jawor; 5. Smolito; 6. Reduta; 7. Glejt; 8. Piorun; 9. Smok; 10. Smh 220; 11. Dumka; 12. Tur; 13. Bielik; 14. Bejm; 15. Smolik; 16. Rataj; 17. Malibu; 18. Maksym; 19. Opoka; 20. Lober; 21. Narew; 22. Kresowiak; 23. Fmb10; 24. Juhas; 25. San; 26. Vitras; 27. Popis; 28. Smh27008; 29. Blask; 30. Bosman; 31. Wigo; 32. Kozak

Fig. 4 Zawartość selenu [$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$] w ziarnie kukurydzy

Porównując ilości Se w ziarnie 32 odmian kukurydzy zebranej z gleby kompleksu II (fig. 4 tab. III) można stwierdzić, iż wahała się ona od 11,6 do 111,9 $\mu\text{gSe}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$, a średnia wartość wynosiła 42,4 $\mu\text{gSe}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$ Bardzo niską zdolnością do nagromadzenia selenu (poniżej 30 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$) charakteryzowało się ziarno 9 odmian (Wilga, Smh220, Lober, Popis, Smh27008, Blask, Bosman, Wigo i Kozak). Odmiany zawierające ilości od 30 do 50 $\mu\text{gSe}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$ stanowiły 53% (17) wszystkich badanych prób w tej grupie. U odmiany Bejm i Dumka zawartość tego pierwiastka wahała się w przedziale 50-70 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$, a tylko 4 odmiany (Tur, Bielik, Opoka i Maksym) nagromadziły więcej niż 70 $\mu\text{gSe}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$

Średnia zawartość selenu w ziarnie 32 odmian kukurydzy uprawianych na glebie kompleksu IVa kształtowała się na poziomie 20,6 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$, przy wahaniach od 4,0 do 47 $\mu\text{gSe}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$ Wśród badanych odmian najwyższą zawartością tego pierwiastka charakteryzowały się odmiany Tur i Maksym ($> 40 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$), w dalszej kolejności Bielik i Bejm ($>30 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$). Spośród pozostałych odmian aż 23 zawierały mniej niż 20 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$, w tym 3 z nich (Wigo, Vitras i Smolito) mniej niż 10 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$ (fig. 4 tab. III).

Spośród wszystkich badanych odmian Maksym, Tur, Bielik i Bejm zebrane zarówno z gleby klasy II, jak i IVa zawierały istotnie więcej selenu w ziarnie, niż pozostałe odmiany (tab.III).

Na rysunku 5 (Fig.5) przedstawiono wpływ zarówno klasy wczesności odmian, jak i kategorii agronomicznej gleby na nagromadzanie selenu w ziarnie kukurydzy. Zarówno w warunkach uprawy na glebie klasy II, jak i IVa najwyższą średnią zawartością Se charakteryzowały się odmiany średniowczesne (FAO 230-240), a najniższą ziarno odmian średniopóźnych. Dla tej grupy odmian uprawianych na obu kompleksach glebowych były to wartości o 44% niższe, niż określone dla mieszańców średniowczesnych (fig.5).

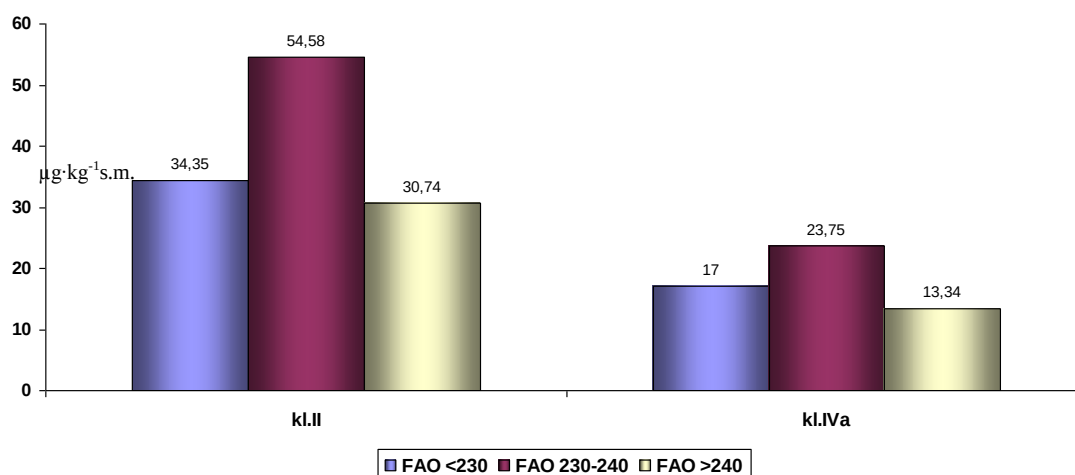


Fig. 5 Zawartość selenu w ziarnie kukurydzy w zależności od FAO oraz fazy rozwojowej [$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$]

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, iż uprawa 32 badanych odmian na glebie lekkiej (kl. IVa) może być przyczyną bardzo niskiej, niedoborowej z punktu żywienia zwierząt, zawartości selenu. Odmiany Maksym, Tur, Bielik i Bejm zarówno w okresie rozwoju wegetatywnego, jak i w ziarnie zawierały istotnie więcej selenu, niż pozostałe mieszańce. Dodatkowo dwie z nich, Maksym i Tur są odmianami, które nawet w warunkach uprawy na słabszych kompleksach glebowych mogą nagromadzić stosunkowo wysoką zawartość tego pierwiastka w ziarnie. Odmiany Wilga i Lober we wszystkich fazach rozwojowych wykazywały niską zdolność do nagromadzania selenu.

Porównując średnie zawartości Se w ziarnie trzech klas wczesności można je uszeregować w kolejności malejącej: FAO 230-240 > FAO do 230 > FAO > 240.

3.4. Wyniki badań – wegetacyjne doświadczenia wazonowe

3.4.1. Doświadczenie I. Odmianowe różnicowanie zawartości selenu w częściach nadziemnych kukurydzy

Stwierdzone we wcześniejszych badaniach, odmianowe różnicowanie w zdolności nagromadzania selenu stały się podstawą do wytypowania odmian do dalszych badań. Celem pierwszego doświadczenia była ocena reakcji 5 odmian kukurydzy na zastosowane nawożenie selenem. Do badań tych zakwalifikowano dwie odmiany (Wilga i Lober) wykazujące w warunkach ich polowej uprawy (tab. I i II), niską zdolność do nagromadzania tego mikroskładnika oraz trzy odmiany (Bejm, Bielik i Tur) charakteryzujące się wyższą, niż pozostałe odmiany, zawartością selenu.

Plon

Przeprowadzone badania wykazały, że plonowanie badanych odmian kukurydzy w większym stopniu było uzależnione od ich właściwości odmianowych niż dawki zastosowanego selenu. Porównując średnie wartości plonu uzyskanego dla mieszańców można stwierdzić, iż największą masę zebrano dla odmiany Wilga, w dalszej kolejności dla Lober i Bejm. Bielik i Tur plonowały na zbliżonym poziomie i istotnie niżej niż pozostałe trzy odmiany.

Wpływ wprowadzonego do gleby selenu na wielkość plonu był różnicowany i zależny od odmiany. U mieszańców takich, jak Lober, Bielik i Bejm nie wykazano istotnych relacji pomiędzy nawożeniem Se, a plonowaniem roślin. Ograniczający wpływ wyższej dawki Se ($0,2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) na ilość uzyskanej masy stwierdzono dla odmiany Tur. Natomiast wprowadzenie tego mikroskładnika do gleby miało korzystny wpływ na rozwój kukurydzy Wilga (tab. 13).

Tab. 13 Plon powietrznie suchej masy części nadziemnych badanych odmian kukurydzy [g s.m. z wazonu]

Dawka Se [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$]	LOBER	BIELIK	TUR	BEJM	WILGA	Średnia dla dawki
0	150,0	139,0	144,5	140,8	157,8	146,4
0,1	152,6	135,8	141,0	141,9	171,1	148,5
0,2	154,1	133,6	131,6	141,8	170,5	146,3
Średnia dla odmiany	152,2	136,2	139,0	141,5	166,5	-
NIR _{0,05}	Odmiana 3,12; Dawka Se n.i.; Interakcja 5,40					

Zawartość selenu

Zawartość selenu w suchej masie nadziemnych częściach kukurydzy była uzależniona zarówno od właściwości odmianowych, jak i ilości wprowadzanego do gleby selenu (tab.III, fig. 6). Mieszańcem o najwyższej średniej zawartości Se był Tur ($517 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$), natomiast najmniej zawierały rośliny odmiany Lober ($343 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$) i Wilga ($349 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$).

U wszystkich badanych odmian uprawianych na glebie o naturalnej zasobności w Se zawartość tego mikrośkładnika była na bardzo niskim poziomie, wahała się bowiem od $10 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$ (Lober) do $47 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$ (Tur). Wraz ze wzrostem ilości selenu w podłożu zwiększała się jego zawartość w tkankach roślin. Różnice wśród mieszańców w zdolności do gromadzenia tego pierwiastka ujawniły się już przy dawce $0,1 \text{ mgSe}\cdot\text{kg}^{-1}$. Przy tym poziomie nawożenia zawartość selenu w tkankach roślin odmiany Wilga i Lober nie różniła się istotnie i była istotnie niższa, niż określona dla pozostałych. Najwyższą zawartość selenu stwierdzono w suchej masie odmiany Tur. Zależność ta ujawniła się również przy wyższej dawce selenu.

Zastosowane dawki selenu w różnym stopniu zwiększały zawartość tego mikroelementu u poszczególnych odmian. W porównaniu do roślin uprawianych na glebie o naturalnej zasobności w ten pierwiastek, zawartość Se u roślin odmiany Lober zebranych z gleby z dodatkiem $0,1 \text{ mgSe}\cdot\text{kg}^{-1}$ była 33 razy wyższa. Wielkość tego przyrostu dla odmiany Wilga, Bielik i Bejm była na podobnym poziomie (12, 12 i 13 razy więcej), natomiast ilość selenu w kukurydzy odmiany Tur była tylko o 10 razy wyższa, niż u roślin uprawianych na glebie o naturalnej zasobności Se. Zawartość tego pierwiastka w tkankach mieszańców pod wpływem najwyższej dawki selenu u odmiany Lober była 69-krotnie wyższa, u odmian Wilga, Bielik i Bejm zawartość ta była 29, 30 i 33-krotnie wyższa, a u mieszańca Tur 22-krotnie wyższa, niż określona dla roślin z obiektu kontrolnego (fig 6.).

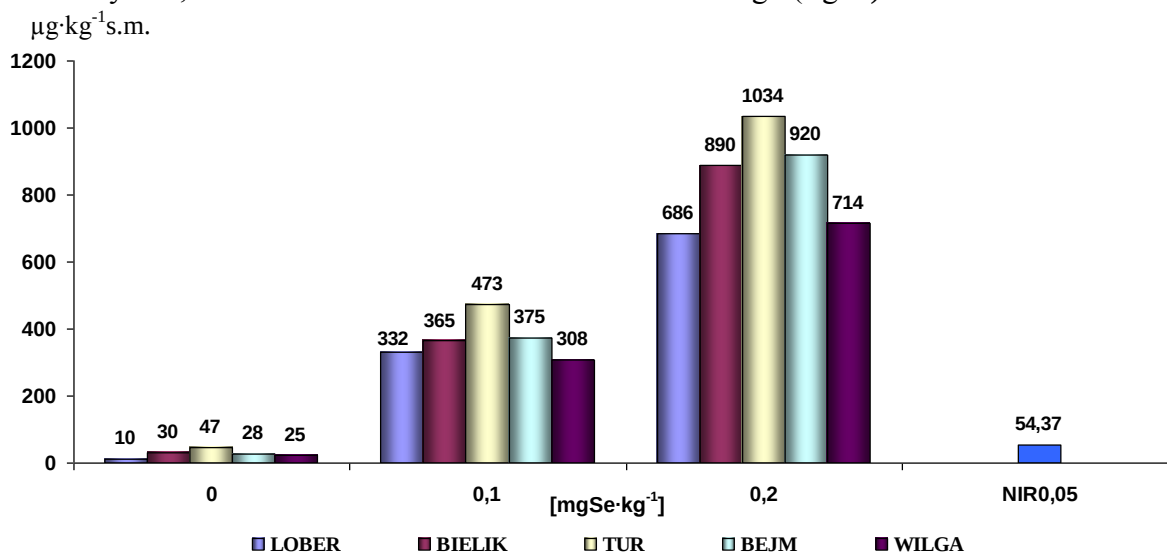


Fig. 6 Zawartość selenu w nadziemnych częściach badanych odmian kukurydzy [$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$]

Stwierdzona w badaniach różna zdolność badanych odmian do nagromadzania selenu wskazuje na konieczność uwzględniania również tej właściwości przy określaniu wielkości dawki tego mikroelementu w planowanym nawożeniu.

Pobranie selenu

Nagromadzanie selenu przez kukurydzę było również uzależnione zarówno od ilości wprowadzonego Se do gleby, jak i od właściwości uprawianego mieszańca (tab. 14). Średnią wartość pobrania selenu przez nadziemne części badanych odmian kukurydzy można przedstawić w szeregu: Lober < Bielik i Wilga < Bejm < Tur. Wraz ze wzrostem wprowadzanej do gleby ilości tego pierwiastka zwiększało się jego pobranie i przy najwyższym poziomie nawożenia Se ($0,2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) odmiana Lober pobrała 70 razy więcej selenu, niż rośliny z obiektu kontrolnego. U mieszańca Tur pobranie zwiększyło się 20-krotnie.

Tab. 14 Pobranie selenu przez nadziemne części badanych odmian kukurydzy [μg z wazonu]

Dawka Se [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$]	LOBER	BIELIK	TUR	BEJM	WILGA	Średnia dla dawki
0	1,5	4,1	6,8	4,0	3,9	4,1
0,1	50,7	49,6	66,6	53,3	52,7	54,6
0,2	105,6	118,9	135,9	130,5	121,6	122,5
Średnia dla odmiany	52,6	57,5	69,8	62,6	59,4	-
NIR _{0,05}	Odmiana 4,09; Dawka Se 3,17; Interakcja 7,08					

Badania przeprowadzone w kontrolowanych warunkach w ramach doświadczenia wegetacyjnego potwierdziły zależności uzyskane w badaniach polowych na materiale roślinnym pobranym z IHR Smolicach (tab. I, II). Odmiany Wilga i Lober charakteryzują się niską zdolnością do nagromadzania selenu przez nadziemne części kukurydzy w warunkach ich uprawy na glebach o średniej zasobności (tab. 14) w ten pierwiastek. Przy wyższych stężeniach Se w podłożu mieszańce Lober jest zdolny do intensywniejszego pobierania tego składnika, niż Wilga oraz pozostałe odmiany. Mieszańce Tur charakteryzował się wysoką zawartością selenu w tkankach roślin zarówno w uprawie polowej, jak i w warunkach kontrolowanych. Jego reakcja na nawożenie tym pierwiastkiem była słabsza, niż określona dla odmiany Lober. Badania własne wskazują, iż przy nawożeniu kukurydzy selenem należy zachować wysoką ostrożność, by nie przekroczyć wartości porządanej w żywieniu zwierząt,

gdyż nie tylko dawka, ale również właściwości odmianowe mogą wpływać na wielkość nagromadzenia tego pierwiastka.

Gleba

Na podstawie przeprowadzonych badań własnych można stwierdzić, iż średnia zawartość selenu w glebach pobranych po zakończeniu doświadczenia była zależna od ilości wprowadzanego pierwiastka, brak było natomiast wpływu uprawianej w tych warunkach odmiany (tab. 15).

Tab. 15 Zawartość selenu w glebie po zakończeniu doświadczenia [$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$]

Dawka Se [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	LOBER	BIELIK	TUR	BEJM	WILGA	Średnia dla dawki
0	127	112	112	128	136	123,0
0,1	165	163	154	168	166	163,2
0,2	210	194	216	210	206	207,2
Średnia dla odmiany	167,3	156,3	160,7	168,7	169,3	-
NIR _{0,05}	Odmiana n.i.; Dawka Se 12,4; Interakcja 27,7					

Nie wykazano wpływu nawożenia selenem na zmianę odczynu gleby pobranej po zakończeniu doświadczenia (tab. 16)

Tab. 16 Odczyn gleby po zakończeniu doświadczenia

Dawka Se [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	LOBER	BIELIK	TUR	BEJM	WILGA
0	5,96	6,08	6,11	6,10	6,11
0,1	6,28	6,15	6,18	6,06	6,18
0,2	6,09	6,12	6,10	6,06	6,01
Średnia dla odmiany	6,11	6,12	6,13	6,07	6,10

3.4.2. Doświadczenie II. Dynamika pobierania selenu przez dwie odmiany kukurydzy

Ocenę wpływu wprowadzonego do gleby selenu na dynamikę nagromadzania tego mikroelementu przeprowadzono w oparciu o wyniki uzyskane z doświadczenia wazonowego. W badaniach tych uwzględniono dwie odmiany kukurydzy: Lober i Bielik. Ich charakterystykę przedstawiono w rozdziale Materiały i metodyka badań. Podstawą do wytypowania tych odmian był wyniki uzyskane z badań terenowych (tab.I-II) oraz w doświadczeniu I. Stwierdzono w nich, że odmiany te w znacznym stopniu różnią się w zdolnościach do pobierania selenu. Odmiana Bielik zarówno w okresie rozwoju wegetatywnego, jak i w ziarnie zawierała wyraźnie więcej selenu, niż rośliny odmiany Lober (tab. I-II). Wyniki uzyskane w badaniach polowych oraz w doświadczeniu I wykazały, że najwyższą zawartością charakteryzował się mieszaniec Tur. Jednak reakcja tej odmiany na wprowadzony do gleby selen była znacznie słabsza, niż stwierdzono dla odmiany Lober.

Plon

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, iż wielkość uzyskanego plonu części nadziemnych kukurydzy zależała od fazy rozwojowej roślin testowych, zastosowanego nawożenia selenem, a także od właściwości odmianowych roślin (fig. 7 oraz tab. IV).

Porównując średnią masę plonów uzyskaną w kolejnych terminach poboru prób można stwierdzić, że różnice w plonowaniu badanych odmian wystąpiły dopiero w późniejszych fazach - BBCH 51 i BBCH 70. W terminach tych masa plonu odmiany Lober była o około 12% wyższa, niż określona dla odmiany Bielik.

Różna była reakcja badanych odmian na wprowadzony do gleby selen. We wszystkich badanych fazach rozwojowych kukurydzy u odmiany Lober wraz ze wzrostem dawki Se następował istotny wzrost masy zebranych roślin (tab. IV).

Porównując wielkość plonu zebranego z gleb wzbogaconych w selen i z obiektu kontrolnego można stwierdzić, iż najsilniejsze plonotwórcze działanie tego pierwiastka ujawniło się u roślin młodych. Po wprowadzeniu $0,1 \text{ mgSe} \cdot \text{kg}^{-1}$ w fazie 6-tego liścia (BBCH 16) masa roślin była wyższa o 12%, w fazie 9-tego liścia (BBCH 19) o 10%, w BBCH 51 o 8%, a w fazie rozwoju ziarniaków (BBCH 70) już tylko o 2%. Dla wyższej dawki selenu ($0,2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) wartości te wyniosły odpowiednio: 23%, 13%, 12% i 3%.

Odmienne była natomiast reakcja odmiany Bielik. W fazach BBCH 16, BBCH 19 i BBCH 51 brak było wpływu dodatku tego pierwiastka do gleby na ilość wytworzonej masy. W fazie rozwoju ziarniaków (BBCH 70) wraz ze wzrostem dawki Se następował istotny spadek plonowania tej odmiany kukurydzy (tab.IV).

W celu porównania różnic odmianowych w reakcji na wprowadzony do gleby selen zestawiono uzyskaną w poszczególnych fazach masę plonu obu odmian (fig. 7). Stwierdzono, iż w warunkach naturalnej niskiej zawartości tego pierwiastka w glebie różnice w plonowaniu badanych odmian były niewielkie i zaznaczyły się dopiero w późniejszych fazach rozwojowych - w fazie BBCH 51 i BBCH 70.

Różnice odmianowe były wyraźniejsze i wystąpiły we wcześniejszej fazie rozwojowej w warunkach uprawy kukurydzy na glebie wzbogaconej w selen. Po zastosowaniu najwyższej dawki Se ($0,2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), różnice w plonowaniu odmiany Lober i Bielik zaobserwowano już w fazie 9-tego liścia (BBCH 19). W kolejnych fazach rozwojowych zebrana masa kukurydzy odmiany Lober był znacznie większa, niż odmiany Bielik (fig. 7). W fazie BBCH 51 był to plon niższy o 14%, a w BBCH 70 o 13%, niż określony dla odmiany Lober.

Różny czas wegetacji roślin pomiędzy kolejnymi terminami sprzętu roślin (I termin po 19 dniach od wschodów, II termin po kolejnych 16 dniach, III termin po 25 dniach, IV termin po kolejnych 21 dniach wegetacji) powoduje, że lepszym wskaźnikiem obrazującym tempo przyrostu masy będzie obliczony przyrost masy wyrażony w g/roślinę/dzień (fig. 8, tab. V).

Wartość tą obliczono dzieląc plon przez ilość dni wegetacji jakie upłynęły od wschodów (BBCH 16), dla pozostałych terminów ilość dni jakie upłynęły od poprzedniej fazy. Uzyskaną wartość podzielono przez 6 – taka bowiem była obsada roślin w wazonie.

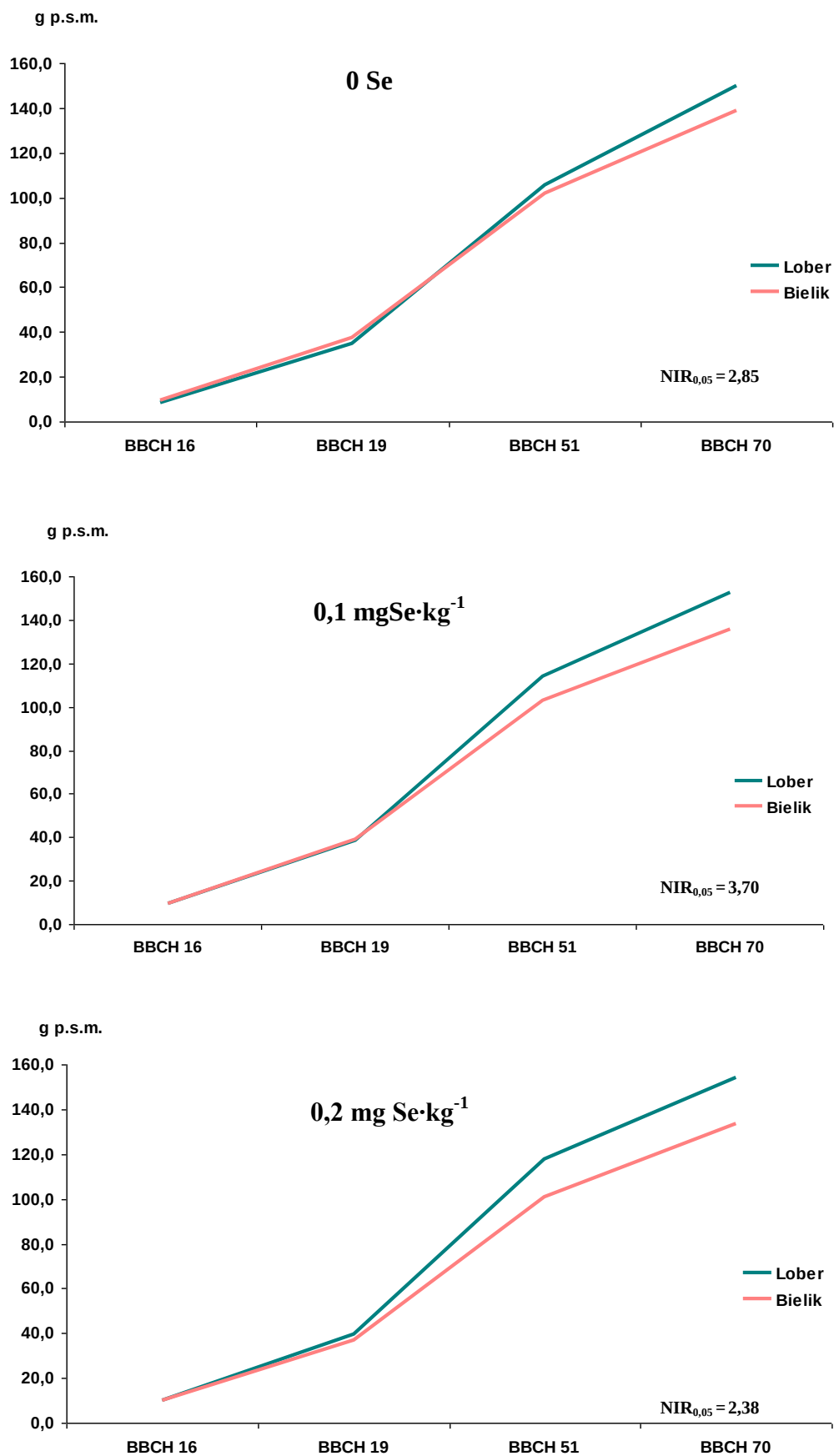


Fig. 7 Plon suchej masy kukurydzy zebranej w poszczególnych fazach rozwojowych

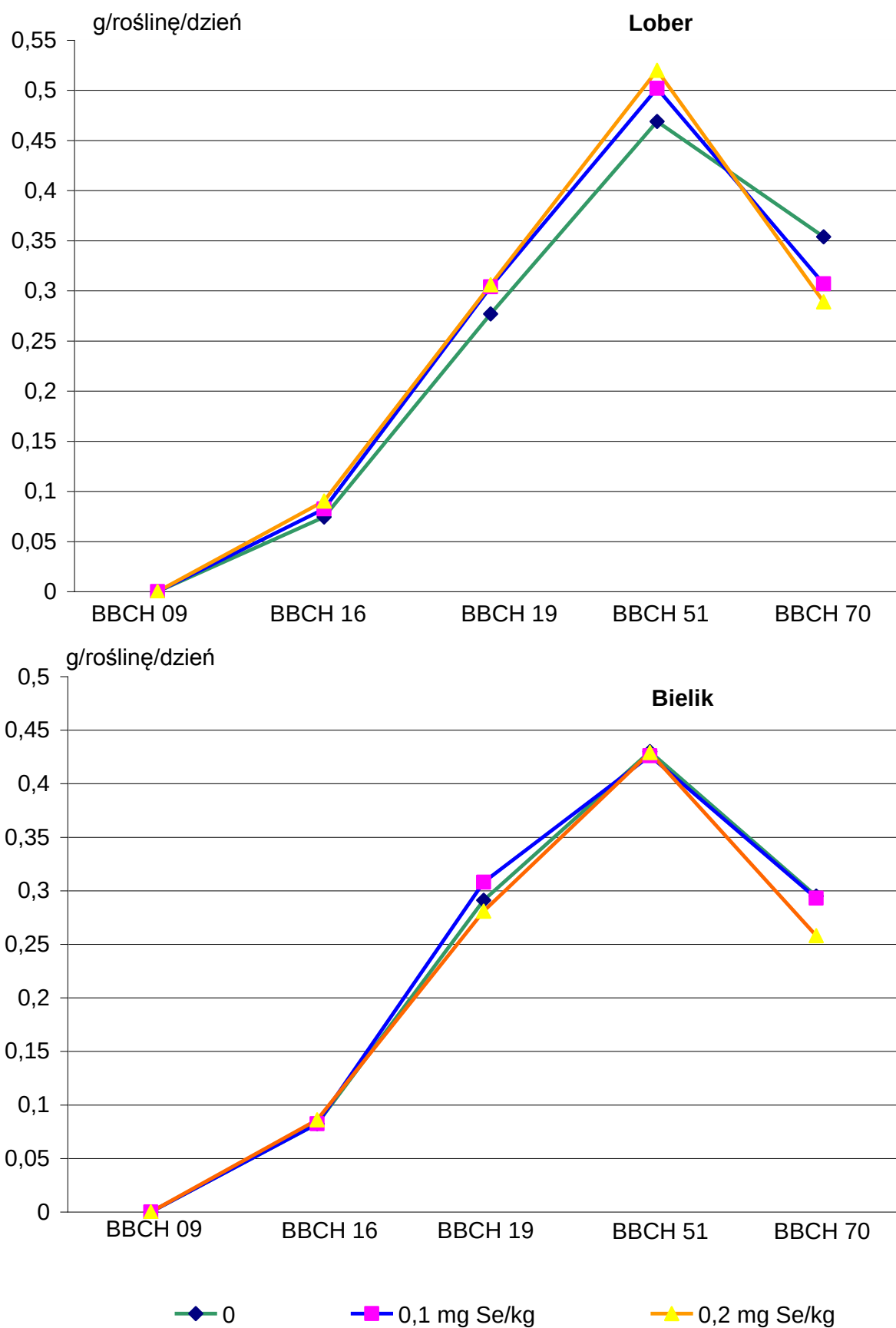


Fig. 8 Względna szybkość nagromadzania masy przez kukurydzę odmianę Lober i Bielik g p.s.m./roślinę/ dzień

Przeprowadzone badania wykazały, iż nie tylko gatunek, ale również odmiana danej rośliny może mieć wpływ na reakcję na nawożenie selenem (fig.8).

Nagromadzanie suchej masy przez obie odmiany kukurydzy, wyrażone względną szybkością nagromadzania (fig. 8), wzrastało w czasie osiągając maksimum w fazie początku ukazania się wiechy (BBCH 51). W ciągu kolejnych 21 dni wegetacji, tj. do fazy rozwoju ziarniaków, względna szybkość nagromadzania była już o 24% do nawet 44% niższa, niż określona w fazie BBCH 51.

Analizując wartość tego parametru dla roślin uprawianych na glebie kontrolnej można stwierdzić, że do fazy 9-go liścia kukurydza odmiany Bielik wytwarzała dziennie więcej masy niż odmiany Lober. Wraz z przebiegiem wegetacji zależność ta uległa zmianie. W fazie początku ukazania się wiechy (BBCH 51) dzienny przyrost masy odmiany Bielik był o 8%, a w fazie rozwoju ziarniaków o 17% niższy niż odmiany Lober.

Oceniając wpływ wprowadzonego do gleby selenu na względną szybkość nagromadzania masy przez roślinę odmiany Lober można stwierdzić, że do fazy początku ukazania się wiechy selen wykazywał działanie stymulujące akumulację. W zależności od zastosowanej dawki selenu była ona bowiem wyższa o 11%, 10% i 7% ($0,1 \text{ mg Se} \cdot \text{kg}^{-1}$) oraz o 22%, 10% i 11% ($0,2 \text{ mg Se} \cdot \text{kg}^{-1}$) wyższa niż wartość określona w kolejnych fazach dla rośliny zebranej z gleby kontrolnej. W ciągu kolejnych 21 dni wegetacji dodatek selenu ujemnie wpływał na ilość nagromadzanej masy przez roślinę tej odmiany w ciągu 1 dnia. W porównaniu do kukurydzy zebranej z gleby kontrolnej po zastosowaniu dawki $0,1 \text{ mg Se} \cdot \text{kg}^{-1}$ akumulacja suchej masy była bowiem o 13%, a przy dawce $0,2 \text{ mg Se} \cdot \text{kg}^{-1}$ o 18% niższa.

Nieco odmiennie na wprowadzony do gleby selen zareagowała odmiana Bielik. Do fazy początku ukazania się wiechy (BBCH 51) dodatek tego mikroelementu w niewielkim stopniu różnicowała ilość nagromadzanej masy. Brak było również wpływu niższej dawki Se ($0,1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) na względną szybkość nagromadzania masy pomiędzy fazami BBCH 51, a 70. Stwierdzono natomiast ograniczające działanie wyższej dawki tego pierwiastka. Dzienny przyrost plonu był bowiem o 12% niższy niż określony dla roślin zebranych zarówno z obiektu kontrolnego, jak i po wprowadzeniu do gleby $0,1 \text{ mg Se} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Zawartość selenu

Badania własne potwierdziły, iż kukurydza należy do grupy roślin, które w warunkach uprawy na glebie zasobnej w selen wykazują zdolność do nagromadzenia znacznych ilości tego pierwiastka (tab. VI).

Zawartość tego pierwiastka w nadziemnych częściach roślin istotnie zależała od długości okresu wegetacji (fazy rozwojowej), wielkości zastosowanej dawki, a także od właściwości odmianowych.

Najwyższą zawartością selenu charakteryzowały się rośliny zebrane we wczesnej fazie rozwojowej (6-go liścia; BBCH 16), ale nawet w tej fazie żadna z ocenianych odmian uprawiana na glebie o naturalnej zasobności tego pierwiastka nie osiągnęła zawartości Se $100 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$ - ilości minimalnej potrzebnej do pokrycia zapotrzebowania zwierząt na ten składnik (fig. 9). W trakcie wegetacji zawartość tego mikroelementu w częściach nadziemnych obu odmian malała, co może być związane z szybkim przyrostem suchej masy i wystąpieniem efektu rozcieńczenia. Jednocześnie rośliny zebrane z gleb nawożonych Se zawierały ilości przekraczające podawane w literaturze normy paszowe.

Porównując obliczoną średnią zawartość selenu w kukurydzy zbieranej w kolejnych fazach rozwojowych można zauważyć, że odmiana Bielik wykazywała większą zdolność do nagromadzania tego pierwiastka, niż Lober. Wartość ta była bowiem większą odpowiednio o 14%, 15%, 24% i 25%. Z zestawienia tego widać, że różnice odmianowe pogłębiały się wraz z długością okresu wegetacji.

W fazie BBCH 16 po wprowadzeniu do gleby $0,1 \text{ mgSe}\cdot\text{kg}^{-1}$ kukurydza obu odmian zawierała 21 razy więcej tego pierwiastka, niż rośliny uprawiane na podłożu o naturalnej jego zawartości. Zwiększenie dawki do $0,2 \text{ mgSe}\cdot\text{kg}^{-1}$ spowodowało wystąpienie różnic odmianowych. W kukurydzy odmiany Lober zawartość selenu zwiększyła się 45 krotnie, a u odmiany Bielik 36 krotnie.

Zawartość selenu w kukurydzy z kolejnej fazy zbioru (BBCH 19) była wyraźnie niższa niż określona w fazie 6-go liścia. Największy procentowy spadek zawartości Se odnotowano dla roślin zebranych z obiektu kontrolnego, wyniósł on bowiem odpowiednio dla odmiany Lober 40%, a dla Bielika 28%. Zastosowane dawki selenu wpłynęły istotnie na wzrost zawartości tego mikroelementu w obu odmianach kukurydzy. W porównaniu do roślin zebranych z obiektu kontrolnego była ona wyższa odpowiednio 28 i 64 razy dla odmiany Lober oraz 24 i 44 razy u odmiany Bielik. Porównując zawartość selenu w roślinach sprzątanych w fazie 9-go liścia z określoną w fazie 6-go liścia można stwierdzić, że procent spadku zawartości Se uwarunkowany był ilością wprowadzonego selenu, brak natomiast było wpływu odmiany. Po zastosowaniu $0,1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ zawartość tego pierwiastka u obu odmian spadła o 20%, a przy wyższym poziomie nawożenia ($0,2\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) o 13%, co przy braku istotnych różnic w plonowaniu (tab. VI) wskazuje na jednakową zdolność porównywanych odmian do kumulacji selenu.

W ciągu kolejnych dni wegetacji następował dalszy spadek zawartości selenu. W porównaniu do zawartości określonej w roślinach zebranych w fazie 9-go liścia w fazie początku ukazania się wiechy była ona niższa u odmiany Lober o 28, 53 i 38 %, a u odmiany Bielik o 17, 47 i 28%. U obu odmian zwraca uwagę dużo większy, niż w pozostałych obiektach, spadek zawartości Se po zastosowaniu dawki 0,1 mg·kg⁻¹. Kukurydza odmiany Lober zebrana w fazie BBCH 51 z gleb nawiezionych dawką 0,2 mgSe·kg⁻¹ zawierała 3,1 razy więcej selenu, niż uprawiana na glebie z dodatkiem 0,1 mgSe·kg⁻¹. Dla odmiany Bielik wartość ta była 2,6 razy większa (tab. VI).

W fazie rozwoju ziarniaków zawartość selenu w kukurydzy odmiany Lober stanowiła 17% (dla obiektu kontrolnego) i 27-26% (przy dawkach 0,1 i 0,2 mgSe·kg⁻¹) ilości określonej w fazie 6-tego liścia (tab. VI). Dla odmiany Bielik wartości te wynosiły odpowiednio 40, 23 i 32%.

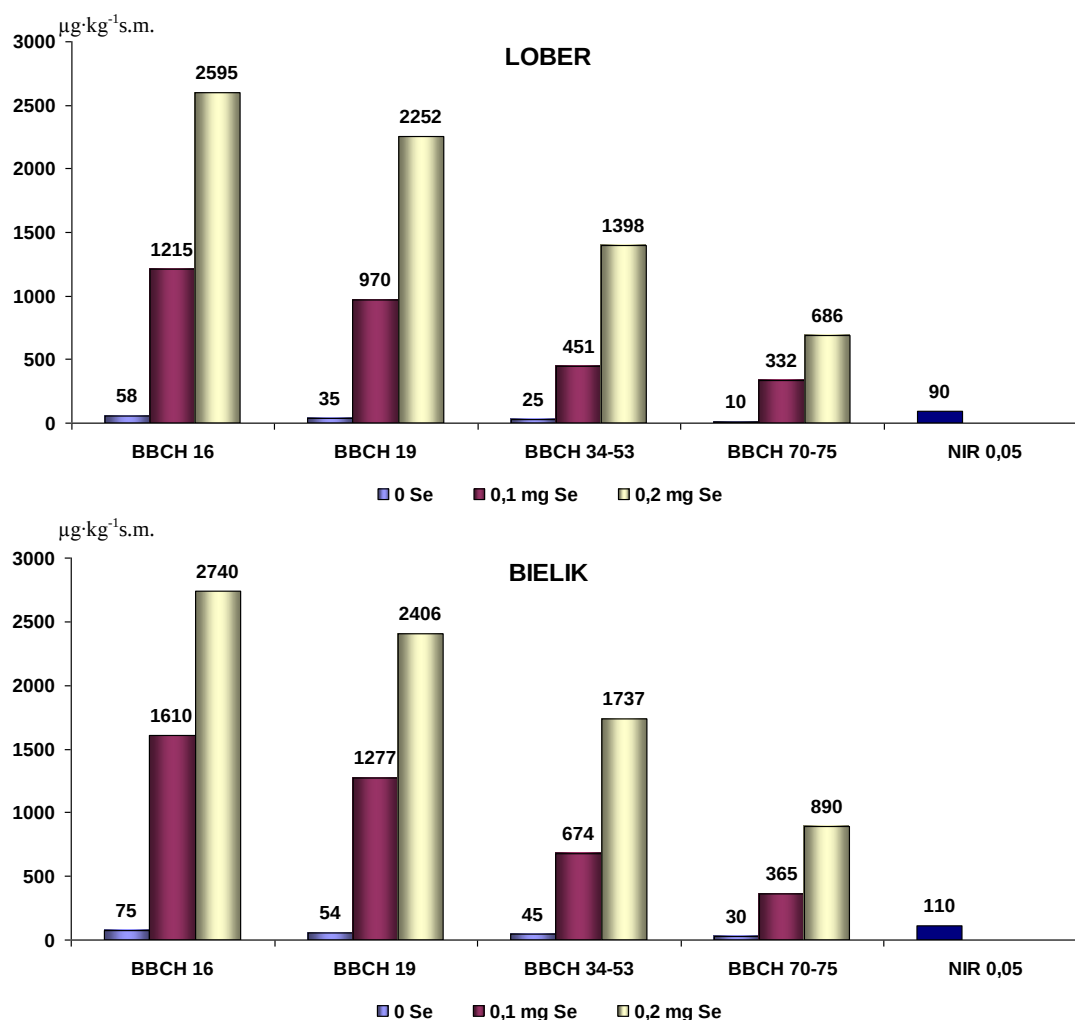


Fig. 9 Zawartość selenu [$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$] w nadziemnych częściach badanych odmian kukurydzy

Porównując zawartość selenu w częściach nadziemnych obu odmian kukurydzy można stwierdzić, że na glebach nawożonych selenem nawet po 81 dniach wegetacji (BBCH

70) jest ona nadal bardzo wysoka. Określone w badaniach własnych wartości dla roślin zebranych z gleb nawożonych dawką $0,1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ nieznacznie przekraczają, podawane w literaturze, wartości normy w żywieniu zwierząt. Podwojenie tej dawki spowodowało znaczny wzrost zawartości selenu w częściach nadziemnych badanych odmian kukurydzy. Tkanki odmiany Bielik zawierały około $200 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. więcej selenu niż odmiany Lober. Uzyskane rezultaty wskazują, że przy stosowaniu nawożenia tym mikroelementem należy uwzględniać także właściwości uprawianej odmiany.

Pobranie selenu

Różnice odmianowe w intensywności pobierania selenu najsilniej zaznaczyły się u roślin uprawianych na glebie z naturalną zawartością tego pierwiastka (fig. 10). Wraz ze wzrostem zawartości w glebie łatwo dostępnego selenu różnice te bardzo wyraźnie się zmniejszyły.

Oceniając dynamikę pobierania selenu (fig. 10) przez kukurydzę można stwierdzić, że kumulacja tego składnika wzrastała intensywnie do fazy BBCH 51. Od tego stadium do rozwoju ziarniaków pobieranie selenu uległo ograniczeniu. Porównując pobranie Se z gleb nawożonych tym pierwiastkiem można zauważyć, że najintensywniej był on pobierany między fazą 6-go i 9-go liścia. Po zastosowaniu zarówno $0,1$, jak i $0,2 \text{ mg Se} \cdot \text{kg}^{-1}$ u obydwu odmian pobranie zwiększyło się w jednakowym stopniu. W fazie BBCH 19 ilość nagromadzonego Se u obu odmian była wyższa o 3,3 razy, niż określona dla roślin zebranych w fazie BBCH 16. W ciągu kolejnych 25 dni wegetacji (BBCH 51) intensywność nagromadzania selenu zmniejszyła się. Po wprowadzeniu do gleby $0,1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ u obydwu odmian pobranie zwiększyło się o 1,4 razy. Przy wyższym poziomie nawożenia między fazą BBCH 51, a BBCH 19 ilość pobranego selenu zwiększyła około 2-krotnie. Od tego stadium do fazy rozwoju ziarniaków pobieranie selenu uległo ograniczeniu. Wielkość tego spadku zależała zarówno od ilości wprowadzonego Se do gleby, jak i właściwości odmianowych (fig. 10). U odmiany Lober uprawianej na glebie bez dodatku selenu między BBCH 51, a BBCH 70 pobranie zmniejszyło się o ok. 42%, natomiast u odmiany Bielik o 11%.

Przy wyższym poziomie nawożenia selenem ($0,2 \text{ mg Se} \cdot \text{kg}^{-1}$) różnice pomiędzy odmianami się zmniejszyły. W fazie rozwoju ziarniaków odmiana Bielik pobrała 32% mniej, a Lober 36% mniej, niż określona dla kukurydzy tych odmian w fazie BBCH 51. Analizując pobranie Se w fazie BBCH 51 stwierdzono, iż przy wyższym poziomie nawożenia odmiana Lober pobrała 3,2 razy więcej, a Bielik 2,6 razy więcej tego pierwiastka, niż określona dla roślin zebranych z dodatkiem $0,1 \text{ mgSe} \cdot \text{kg}^{-1}$ (tab. VI).

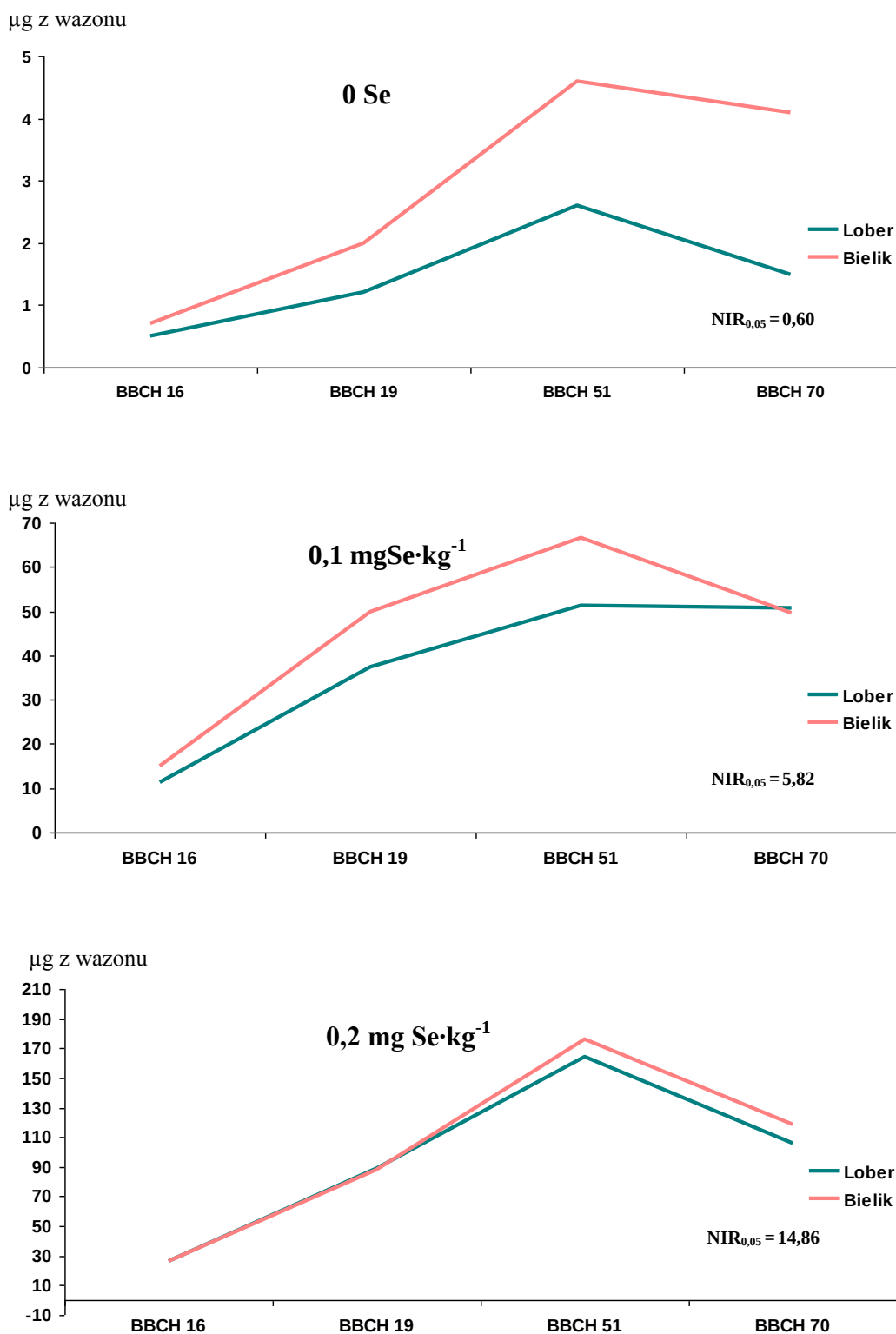


Fig. 10 Pobranie selenu [µg Se z wazonu] przez nadziemne części kukurydzy zebranej w poszczególnych fazach rozwojowych

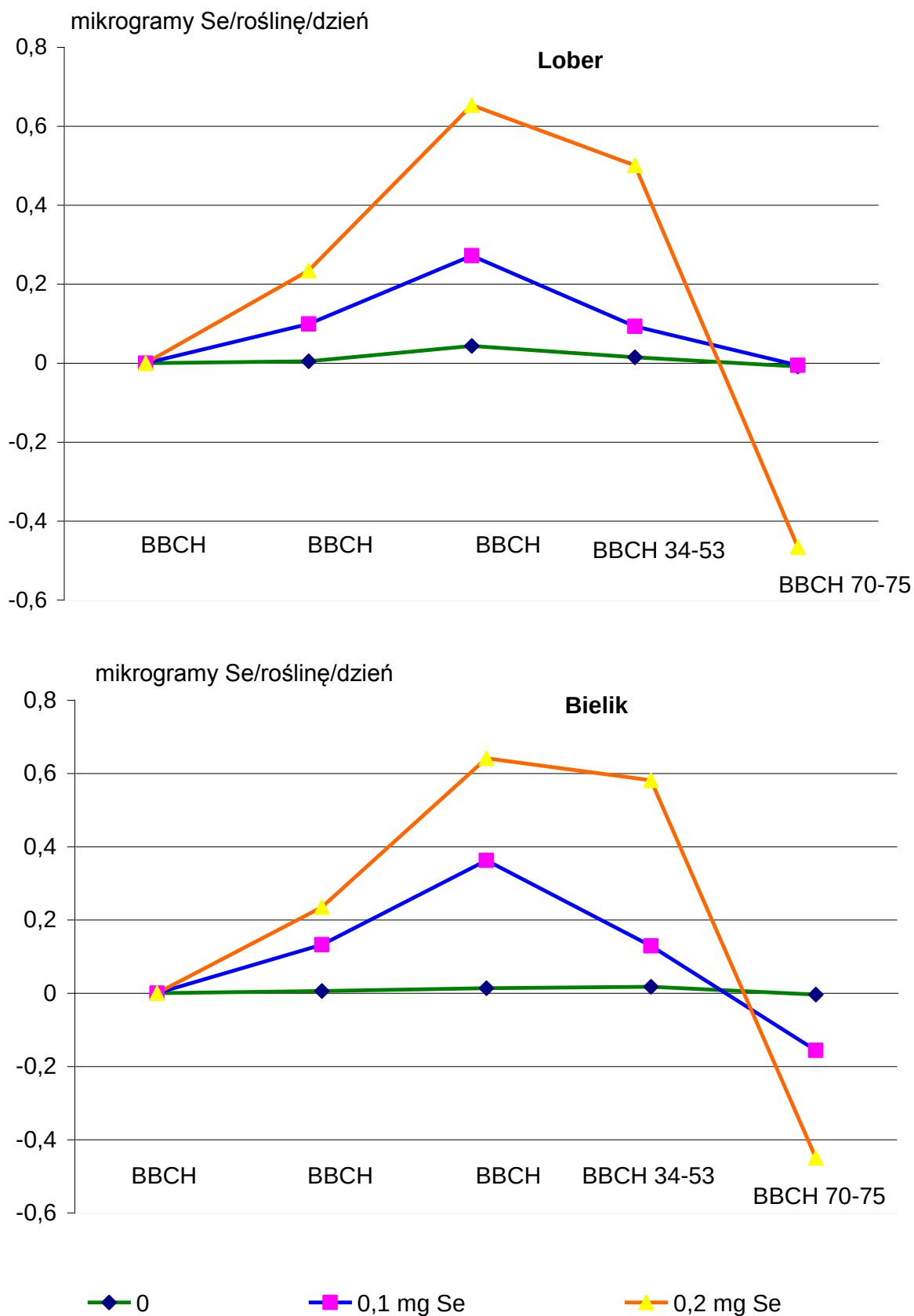


Fig. 11 Względna szybkość pobierania selenu przez kukurydzę odmiany Lober i Bielik

Nagromadzanie selenu w suchej masie dla obu odmian kukurydzy, wyrażone względną szybkością nagromadzania, przedstawiono na fig. 11, a wartości liczbowe zamieszczono w materiałach źródłowych (tab. VII).

Ilość selenu pobrana dziennie przez jedną roślinę kukurydzy zależała od wszystkich ocenianych czynników tj. właściwości odmiany, jej fazy rozwojowej oraz ilości wprowadzonego selenu. U obu badanych odmian względna szybkość nagromadzania Se wzrastała w czasie osiągając maksimum w fazie 9-go liścia (BBCH 19). W ciągu kolejnych dni wegetacji, tj. do fazy ukazania się wiechy (BBCH 51), wartość tego parametru nagromadzania była już niższa. Wielkość tego spadku zależała od zarówno od odmiany, jak i od ilości wprowadzonego do gleby selenu. Przy niższym poziomie nawożenia ($0,1 \text{ mgSe} \cdot \text{kg}^{-1}$) znacznie większy spadek nagromadzania wystąpił u odmiany Lober (spadek o 23%), niż u odmiany Bielik (spadek o 9 %). Podwojenie dawki tego mikroelementu spowodowało zatarcie różnic w reakcji roślin na obecny w glebie selen. U obydwu odmian między fazą 9-tego liścia (BBCH 19), a fazą ukazywania się wiechy (BBCH 51) kukurydza dziennie pobierała o około 65% mniej selenu niż we wcześniejszym okresie. Analizując wielkość względnej szybkości pobierania selenu przez roślinę w kolejnym okresie rozwoju można stwierdzić, że była ona ujemna. Wskazuje to na straty tego pierwiastka z rośliny na drodze metylacji. Ubytek selenu z kukurydzy uprawianej na glebie o naturalnej zawartości selenu wahał się od 0,0039 (Bielik) $\mu\text{g}/\text{roślinę}/\text{dzień}$ do 0,0087 $\mu\text{g}/\text{roślinę}/\text{dzień}$ (Lober). Po wprowadzeniu do gleby $0,1 \text{ mgSe} \cdot \text{kg}^{-1}$ u odmiany Lober spadek ten kształtował się na zbliżonym poziomie, co określony dla rośliny z obiektu kontrolnego, natomiast u Bielika wartość ta wzrosła blisko 3-krotnie. Znacznie większy ubytek selenu z rośliny odnotowano przy wyższej dawce tego mikroelementu ($0,2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Obliczona wartość wskazuje, że dziennie z jednej rośliny kukurydzy ubywało od 0,450 (Bielik) do 0,466 μg selenu.

Gleby

Odczyn gleb pobranych po kolejnych sprzętach roślin (tab. 5) był zróżnicowany w niewielkim stopniu. Obliczony współczynnik zmienności kształtował się bowiem na poziomie $V = 5\%$. Nie stwierdzono wpływu wprowadzonego do gleby selenianu (VI) na zmiany wartości tego parametru. (tab. 17).

W tabeli 17 przedstawiono zawartość selenu w glebach pobranych po sprzęcie roślin, a w tabeli 18 bilans tego mikroelementu.

Długość okresu wegetacji rośliny testowej, zastosowana dawka, a także odmiana uprawianej kukurydzy miały wpływ na zawartość i straty selenu z gleb. Porównując zawartość tego mikroelementu w glebach pobranych z obiektów kontrolnych w kolejnych

terminach można stwierdzić, że już po 19 dniach od wschodów roślin (BBCH 16) była ona o 7% (Lober) do 14% (Bielik) niższa, niż oznaczona w glebie użytej do przeprowadzenia doświadczenia ($0,143 \text{ mgSe}\cdot\text{kg}^{-1}$; tab. 6).

Tab. 17 Odczyn gleby oraz zawartość selenu w glebie [$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$] po zakończeniu doświadczenia

Dawka Se [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	pH _{KCl}		Zawartość Se	
	LOBER	BIELIK	LOBER	BIELIK
BBCH 16				
0	5,93	5,85	133	123
0,1	5,96	5,92	172	176
0,2	5,94	5,87	214	204
Średnia dla terminu	5,94	5,88		
BBCH 19				
0	5,80	6,03	132	119
0,1	6,00	5,97	166	175
0,2	5,92	6,05	215	206
Średnia dla terminu	5,91	6,02		
BBCH 51				
0	5,83	5,86	128	114
0,1	6,06	6,02	168	165
0,2	5,74	5,87	212	195
Średnia dla terminu	5,88	5,94		
BBCH 70				
0	5,96	6,08	127	112
0,1	6,05	6,08	165	163
0,2	6,09	6,12	210	194
Średnia dla terminu	6,11	6,12		

W obliczeniach bilansu selenu (tab. 18) po stronie przychodów uwzględniono: zawartość tego pierwiastka w glebie wyjściowej ($0,143 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), masę gleby w wazonie (5 kg), wielkość zastosowanej dawki Se (0; 0,1; $0,2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), a po stronie rozchodów: pobranie przez rośliny oraz zawartość tego pierwiastka w glebach pobranych po sprzęcie roślin w kolejnych terminach.

Obliczona różnica bilansowa wskazuje, że w czasie wegetacji obu odmian kukurydzy następował spadek ilości selenu w wazonie (gleba + roślina). Jego wielkość uwarunkowana była wielkością zastosowanej dawki selenu, czasem, a także właściwościami odmianowymi uprawianej kukurydzy. W ciągu całego okresu wegetacji ubytek selenu z wazonów, w których była uprawiana odmiana Bielik był większy, niż określony dla odmiany Lober. Najwyraźniej różnice te zaznaczyły się w warunkach ich uprawy na glebie o naturalnej zawartości tego

mikroelementu (obiekty kontrolne). W obiektach tych ubytek ilości selenu z wazonu dla mieszańca Bielik był 2-krotnie większy niż dla drugiej z badanych odmian.

Tab. 18 Bilans selenu

odmiana	Faza	Początkowa z zawartość w glebie w wazonie µg	Pobranie przez rośliny z wazonu µg	Zawartość w glebie w wazonie po sprzęcie roślin µg	Suma roślina + gleba µg	Ubyło z wazonu	
						µg Se	% początko wej ilości w wazonie
0 (zawartość naturalna 0,143 mg Se·kg ⁻¹)							
Lober	16	715	0,5	665	665,5	49,5	6,9
	19		1,2	660	661,2	53,8	7,5
	51		2,6	640	642,6	72,4	10,1
	70		1,5	635	636,5	78,5	11,0
Bielik	16		0,7	615	615,7	99,3	13,9
	19		2,0	595	597,0	118,0	16,5
	51		4,6	570	574,6	140,4	19,6
	70		4,1	560	564,1	150,9	21,4
0,1 mg Se·kg ⁻¹							
Lober	16	1215	11,3	860	871,3	343,8	28,3
	19		37,4	830	867,4	347,6	28,6
	51		51,4	840	891,4	323,6	26,6
	70		50,7	825	826,5	388,5	32,0
Bielik	16		15,1	880	895,1	319,9	26,3
	19		49,9	875	924,9	290,1	23,9
	51		69,3	825	894,3	320,7	26,4
	70		49,6	815	864,6	350,4	28,8
0,2 mg Se·kg ⁻¹							
Lober	16	1715	26,7	1070	1096,7	618,3	36,0
	19		89,4	1075	1164,4	550,6	32,1
	51		164,5	1060	1224,7	490,3	28,6
	70		105,7	1050	1155,6	559,4	32,6
Bielik	16		26,8	1020	1046,8	668,2	39,0
	19		88,4	1030	1118,4	596,6	34,8
	51		175,6	975	1150,6	564,4	32,9
	70		118,9	970	1088,9	626,1	36,5

Już po 19 dniach, jakie upłynęły od wschodów roślin (BBCH 16) ilość selenu w wazonie zmniejszyła się o 6,9% (Lober) do 13,9% (Bielik) w stosunku do poziomu wyjściowego. Ubytek tego pierwiastka na drodze pobierania przez rośliny (Fig. 12) kształtował się na poziomie 1% i 0,7%. Wskazuje to na zachodzące w czasie straty tego pierwiastka na drodze metylacji. Na wielkość strat wpływ mogło mieć zastosowane na 14 dni przed wysiewem roślin, wapnowanie.

Wprowadzenie do gleby Na_2SeO_4 przyczyniło się do wzrostu ubytku selenu z wazonu. W zależności od wielkości zastosowanej dawki po 19 dniach od wschodów ubyło 28% - 36% wyjściowej ilości selenu u odmiany Lober i 36% - 39% dla Bielika.

Porównując procentowy ubytek ilości selenu w czasie można stwierdzić, że o jego wielkości decydowały straty zachodzące w ciągu pierwszych 19 dni wegetacji roślin. W późniejszych fazach rozwojowych obydwu odmian kukurydzy był on zbliżony lub tylko nieco większy niż określony dla BBCH 16.

Zarówno w obiektach kontrolnych, jak i nawożonych selenem największy udział pobrania w obliczonych stratach występował w fazie BBCH 51- wynosił on, bowiem od 16% (Lober) do 22% (Bielik) po wprowadzeniu $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$ i blisko 30% po dodaniu do gleb $0,2 \text{ mg kg}^{-1}$. W fazie BBCH 70 u obydwu odmian udział pobrania w stratach Se z wazonu był już wyraźnie mniejszy niż określony dla wcześniejszej fazy.

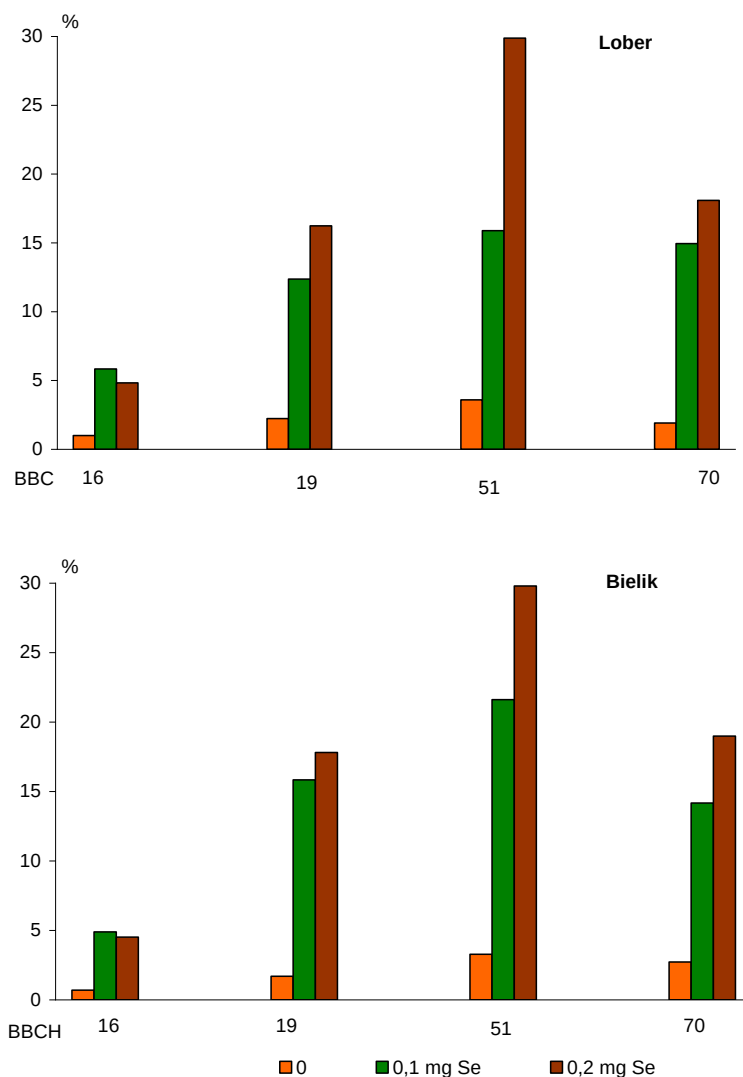


Fig. 12 Procentowy udział pobrania w stratach Se z wazonu (sumaryczny ubytek Se μg z wazonu = 100)

Uzyskane dane wskazują, że w warunkach prowadzenia badań straty selenu z wazonu na drodze ulatniania były znaczne, a przy tym zachodziły zarówno z gleby, jak i z części nadziemnych roślin testowych.

3.4.3. Doświadczenie III. Wpływ formy chemicznej wprowadzonego do gleby selenu na plonowanie i skład chemiczny kukurydzy

Celem tego doświadczenia wazonowego było określenie wpływu formy (Na_2SeO_4 , Na_2SeO_3) oraz dawki selenu (0; 0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ gleby) na plonowanie oraz zawartość tego pierwiastka w częściach nadziemnych kukurydzy. W badaniach tych oceniono również wpływ tych czynników na skład chemiczny roślin.

Plon

Przeprowadzone badania wykazały, iż plonowanie kukurydzy było zależne zarówno od formy, jak i dawki zastosowanego selenu (fig. 13, tab. VIII). Przy wszystkich poziomach nawożenia tym mikroelementem biomasa roślin uprawianych na glebie z dodatkiem selenianu (VI) była istotnie wyższa, niż uzyskana po zastosowaniu selenianu (IV).

Porównując plonotwórcze działanie obu form chemicznych selenu można stwierdzić, iż zastosowanie tego pierwiastka w postaci Na_2SeO_4 nie ograniczało wzrostu roślin, a plon kukurydzy uprawianej na glebie nawiezionej dawką 0,25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ był nawet istotnie wyższy, niż określony dla roślin z obiektu kontrolnego. Odmienna była reakcja roślin testowych na wprowadzony do gleby selenian (IV). W porównaniu do masy kukurydzy zebranej z obiektu kontrolnego dodatek do gleby selenu w dawkach 0,1 oraz 0,25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ w formie Na_2SeO_3 nie zmienił ilości wytworzonej biomasy, natomiast zwiększenie ilości zastosowanego Se w tej postaci ograniczyło rozwój kukurydzy. Plon roślin uprawianych na glebie z dodatkiem 2,0; 3,0; oraz 4,0 $\text{mgSe}\cdot\text{kg}^{-1}$ kształtował się na tym samym poziomie i był on o około 15% niższy, niż uzyskany z obiektu kontrolnego.

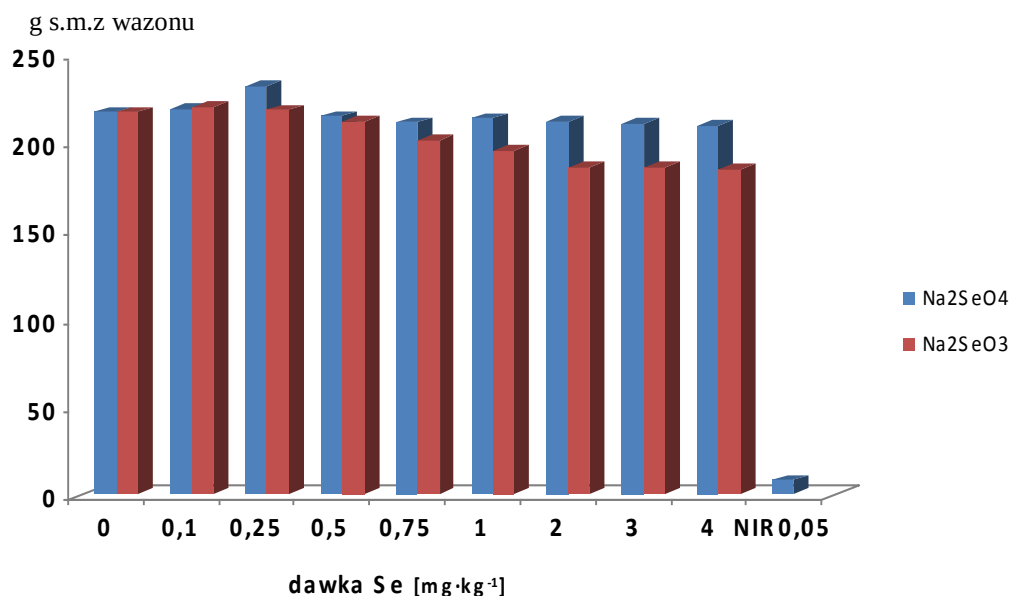


Fig. 13 Plon suchej masy części nadziemnych kukurydzy [g s.m. z wazonu]

Zawartość i pobranie selenu

Przeprowadzone badania własne potwierdziły podawaną w literaturze, dużą zdolność kukurydzy do nagromadzania selenu w warunkach jej uprawy na glebach wykazujących wysoką zawartość tego mikroelementu. Stwierdzono bowiem, że dodatek selenu do gleby zarówno w formie Na₂SeO₄, jak i Na₂SeO₃ przyczyniło się do istotnego wzrostu zawartości oraz pobrania tego pierwiastka przez kukurydzę (Fig. 14, tab. IX). Porównując wpływ obu form tego składnika można stwierdzić, iż po zastosowaniu selenianu (VI) średnia zawartość Se w nadziemnych częściach roślin była prawie 13 razy wyższa, a pobranie tego składnika 14 razy większe, niż określone średnie dla kukurydzy nawiezianej selenianem (IV).

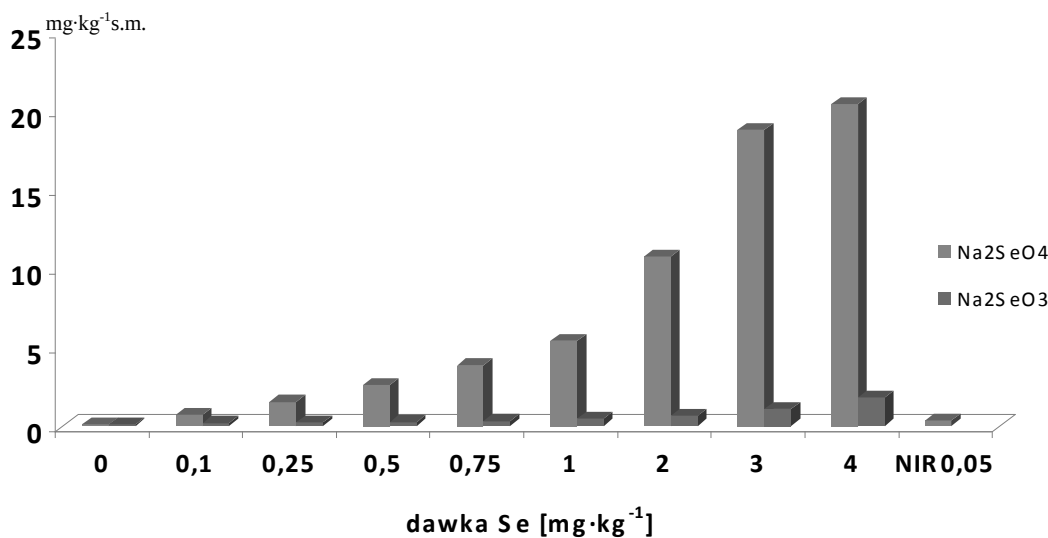


Fig.14 Zawartość selenu w suchej masie części nadziemnych roślin [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$]

Po wprowadzeniu do gleby obu form chemicznych selenu wraz ze wzrostem jego dawki zwiększała się zawartość oraz pobranie tego pierwiastka przez kukurydzę (tab. IX., fig. 14, 15). Średnia zawartość Se w roślinach po wprowadzeniu do gleby $0,1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ w formie selenianu (VI) była 8 razy wyższa, a przy najwyższym poziomie nawożenia ($4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) ponad 200 razy wyższa, niż określona dla kukurydzy z obiektu kontrolnego. W tych samych warunkach zastosowanie selenianu (IV) spowodowało wzrost zawartości Se o odpowiednio 2 i 18 razy. Podobne zależności stwierdzono w przypadku pobrania tego składnika przez nadziemne części roślin (fig. 15).

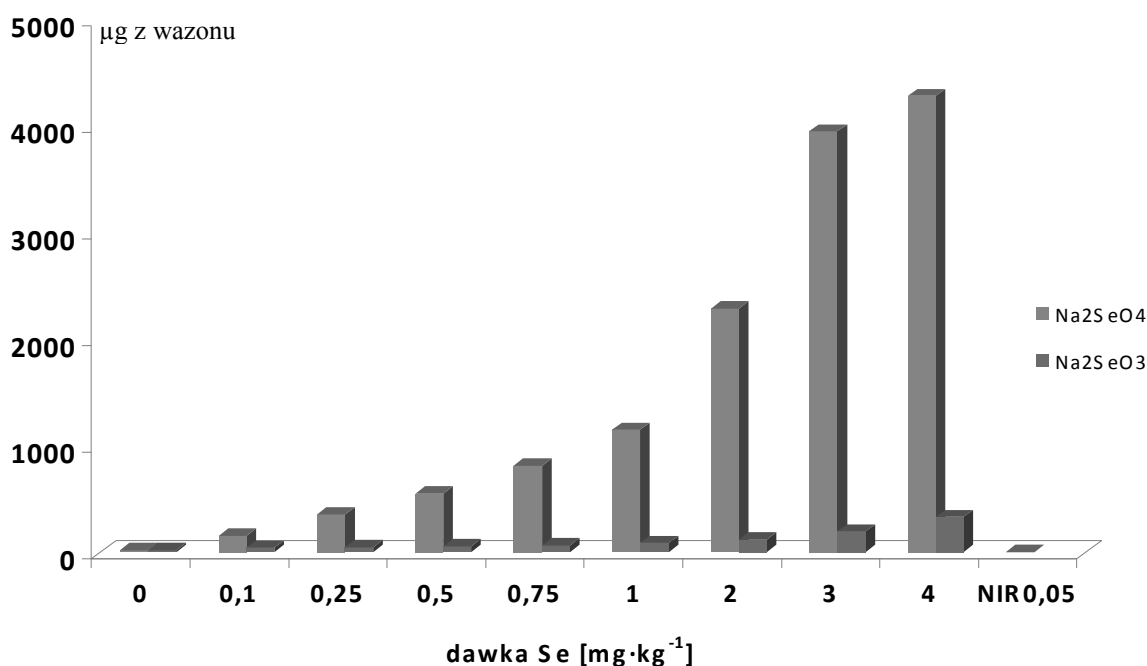


Fig. 15 Pobranie selenu przez suchą masę części nadziemnych roślin [μg z wazonu]

Wpływ nawożenia selenem na skład chemiczny kukurydzy

Wprowadzenie do gleby selenu, zwłaszcza jego większych dawek, spowodowało zmiany składu chemicznego uprawianej w tych warunkach kukurydzy. Wpływ ten był zależny zarówno od ilości zastosowanego Se, jak i formy w jakiej został on dodany.

Zawartość i pobranie makroskładników

Przeprowadzone badania wykazały, iż wprowadzenie selenu do gleby miało ujemny wpływ zarówno na zawartość, jak i pobieranie **azotu** przez kukurydzę (tab.19). Wraz ze wzrostem dawki tego mikroelementu zmniejszała zawartość N w tkankach roślin, a także jego pobranie tego makroelementu. Stwierdzono jednak, iż selenian (IV) znacznie silniej ograniczał nagromadzenie azotu, niż selenian (VI), gdyż po zastosowaniu najwyższej dawki

tego mikroskładnika w formie Na_2SeO_4 nastąpił 21% spadek zawartości N w porównaniu do ilości stwierdzonej dla roślin z obiektu kontrolnego, a w formie Na_2SeO_3 zawartość azotu była aż o 36 % niższa.

Tab. 19 Zawartość [$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$] oraz pobranie [g z wazonu] **azotu** przez suchą masę części nadziemnych kukurydzy

Dawka Se [mg·kg ⁻¹]	Zawartość		Średnia dla dawki	Pobranie		Średnia dla dawki
	Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃		Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃	
0	11,7		11,7	2,5		2,5
0,1	11,2	9,8	10,5	2,5	2,2	2,3
0,25	10,7	9,6	10,2	2,5	2,1	2,3
0,5	9,8	9,3	9,6	2,1	2,0	2,1
0,75	10,0	9,1	9,6	2,1	1,8	2,0
1,0	9,8	9,1	9,5	2,1	1,8	2,0
2,0	9,4	9,0	9,2	2,0	1,6	1,9
3,0	9,3	8,6	8,9	2,0	1,6	1,8
4,0	9,2	7,5	8,4	1,9	1,4	1,8
Średnia dla formy	10,1	9,3	-	2,2	1,9	-
NIR _{0,05}	Forma 0,12			Forma 0,027		
	Dawka Se 0,23			Dawka Se 0,072		
	Interakcja 0,32			Interakcja 0,099		

Nawożenie selenem różnicowało również zawartość i pobranie **fosforu** przez kukurydzę (tab. 20). Stwierdzone zmiany były zależne zarówno od formy, jak i dawki zastosowanego mikroskładnika. Wyższą średnią zawartością i pobraniem P charakteryzowały się rośliny nawiezione selenianem (IV), niż selenianem (VI). W porównaniu do roślin zebranych z gleby kontrolnej niższe dawki Se ($0,1 - 2,0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) wprowadzonego w postaci Na_2SeO_4 spowodowały wzrost zawartości fosforu w częściach nadziemnych kukurydzy, natomiast zwiększenie stężenia tego pierwiastka w podłożu wpłynęło na zmniejszenie zawartości tego makroskładnika. Po zastosowaniu $4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ zawartość P była już taka sama jak określona w kukurydzy zebranej z obiektu kontrolnego.

Odmierna była reakcja roślin na selen wprowadzony w formie selenianu (IV). Wraz ze wzrostem dawki tego pierwiastka zastosowanego w formie Na_2SeO_3 zwiększała się bowiem zawartość oraz pobieranie fosforu przez nadziemne części kukurydzy.

W odróżnieniu od roślin uprawianych na glebie z dodatkiem $4 \text{ mgSe}\cdot\text{kg}^{-1}$ w postaci selenianu (VI) po zastosowaniu tej samej ilości tego mikroskładnika w formie selenianu (IV) zawartość P w tkankach kukurydzy zwiększyła się o około 66% w porównaniu do określonej u roślin kontrolnych, a pobranie tego makroskładnika wzrosło o 40%.

Tab. 20 Zawartość [$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$] oraz pobranie [g z wazonu] **fosforu** przez suchą masę części nadziemnych kukurydzy

Dawka Se [mg·kg ⁻¹]	Zawartość		Średnia dla dawki	Pobranie		Średnia dla dawki
	Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃		Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃	
0	2,62		2,62	0,57		0,57
0,1	2,85	3,15	3,00	0,62	0,69	0,66
0,25	2,91	3,62	3,27	0,68	0,79	0,73
0,5	3,05	3,94	3,50	0,66	0,83	0,75
0,75	2,94	4,20	3,57	0,61	0,85	0,73
1,0	2,96	4,28	3,62	0,63	0,84	0,73
2,0	2,85	4,25	3,55	0,61	0,79	0,70
3,0	2,74	4,40	3,57	0,58	0,82	0,70
4,0	2,62	4,35	3,49	0,55	0,80	0,68
Średnia dla formy	2,84	3,87	-	0,61	0,77	-
NIR _{0,05}	Forma 0,13			Forma 0,02		
	Dawka Se 0,18			Dawka Se 0,04		
	Interakcja 0,26			Interakcja 0,05		

Zbliżone właściwości geochemiczne siarki i selenu powodują, że o ich pobieraniu przez rośliny decydować będzie stosunek zawartości w glebie. Przeprowadzone badania własne potwierdziły tę zależność. W glebie użytej do przeprowadzenia doświadczenia stosunek S:Se był bardzo szeroki i kształtował się na poziomie 2168:1 (zawartość siarki $310 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, zawartość selenu $0,143 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; tab. 21). Wprowadzone dawki selenu spowodowały znaczne zawężenie tej wartości i w glebie wzbogaconej w Se w dawce $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ wynosił on już tylko 75:1.

Wpływ selenu na zawartość oraz pobranie **siarki** przez kukurydzę zależał zarówno od formy, jak i dawki zastosowanego składnika (tab. 21). Porównując obliczone dla formy średnie wartości można stwierdzić, iż pierwiastek ten wprowadzony w postaci selenianu (IV) silniej ograniczał nagromadzenie siarki przez nadziemne części roślin, bowiem zarówno zawartość, jak i pobranie S było około 1,5 razy niższe, niż po zastosowaniu selenianu (VI).

Porównując zmiany w zawartości siarki w częściach nadziemnych kukurydzy uprawianej na glebie nawiezionej selenianem (VI) można stwierdzić, że w porównaniu do roślin zebranych z gleby kontrolnej wraz ze wzrostem dawki Se do $0,5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ spadała zawartość tego makroskładnika. Spadek ten wyniósł odpowiednio dla dawek: 25% ($0,1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 22% ($0,25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) i 36% ($0,5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Po wprowadzeniu do gleby $0,75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ i $1,0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ zawartość Se była wyższa niż określona dla roślin zebranych z gleby z dodatkiem $0,5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, ale o istotnie niższa niż oznaczona w kukurydzy zebranej z obiektu kontrolnego.

Dopiero pod wpływem zwiększenia stężenia selenu w podłożu do poziomu 2,0; 3,0 i 4,0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ nastąpił wzrost zawartości oraz pobrania siarki przez nadziemne części kukurydzy. Odmienną reakcję zaobserwowano u kukurydzy nawiezionej selenem w formie Na_2SeO_3 . Wprowadzenie dawki 0,1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ spowodowało istotny wzrost zawartości oraz pobrania siarki przez rośliny w porównaniu do uprawianych na obiekcie kontrolnym. Przy dalszym wzroście dawek Se od 0,25 do 2,0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ nastąpiło ograniczanie pobierania oraz istotne zmniejszenie się zawartości siarki w nadziemnych częściach kukurydzy. Najwyższa dawka (4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) selenianu (IV) wpłynęła na zwiększenie zawartości S w porównaniu do niższego poziomu nawożenia tym mikroelementem, ale była one wciąż niższa, niż określona w roślinach kontrolnych.

Tab.21 Zawartość [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] oraz pobranie [mg z wazonu] **siarki** przez suchą masę części nadziemnych kukurydzy

Dawka Se [mg·kg ⁻¹]	Zawartość		Średnia dla dawki	Pobranie		Średnia dla dawki
	Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃		Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃	
0	1275		1275	277		277
0,1	1091	1362	1227	240	300	269
0,25	997	1025	1011	231	224	228
0,5	819	997	908	176	211	194
0,75	1113	822	968	235	166	201
1,0	1171	579	875	250	113	182
2,0	1544	506	1025	328	94	191
3,0	1828	647	1238	385	120	211
4,0	1950	806	1378	409	149	253
Średnia dla formy	1310	891	-	281	184	-
NIR _{0,05}	Forma 26			Forma 6		
	Dawka Se 42			Dawka Se 10		
	Interakcja 61			Interakcja 15		

Przeprowadzone badania wykazały, iż wprowadzenie zwiększających się dawek selenu spowodowało spadek zawartości oraz pobrania **potasu** (tab. 22) przez nadziemne części kukurydzy. Różnice we wpływie selenianu (VI) i selenianu (IV) na kumulację tego składnika wystąpiły jedynie po zastosowaniu niższych dawek Se. Zawartość potasu w roślinach zebranych z gleb, do których wprowadzono 0,1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 0,25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ i 0,5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ w formie Na_2SeO_3 była niższa niż oznaczona w roślinach z gleby kontrolnej, ale istotnie większa niż w kukurydzy uprawianej na analogicznych dawkach Se zastosowanym w postaci Na_2SeO_4 . Przy wyższych poziomach nawożenia tym mikroelementem brak było wpływu formy chemicznej wprowadzonego selenu na zawartość potasu. W porównaniu do wartości

oznaczonych dla roślin kontrolnych po wprowadzeniu $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ zarówno w formie Na_2SeO_4 , jak i Na_2SeO_3 zawartość tego makroskładnika była o 36% niższa.

Tab. 22 Zawartość [$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$] oraz pobranie [g z wazonu] **potasu** przez suchą masę części nadziemnych kukurydzy

Dawka Se [mg·kg ⁻¹]	Zawartość		Średnia dla dawki	Pobranie		Średnia dla dawki
	Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃		Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃	
0	12,4		12,4	2,69		2,69
0,1	10,6	11,6	11,1	2,34	2,55	2,46
0,25	10,1	11,2	10,7	2,34	2,45	2,34
0,5	9,0	10,6	9,8	1,95	2,25	2,10
0,75	8,6	8,8	8,7	1,81	1,78	1,80
1,0	8,4	8,4	8,4	1,78	1,64	1,71
2,0	8,2	8,0	8,1	1,78	1,48	1,61
3,0	8,0	8,0	8,0	1,69	1,49	1,59
4,0	7,9	8,0	7,9	1,66	1,54	1,57
Średnia dla formy	9,3	9,7	-	2,00	1,98	-
NIR _{0,05}	Forma 0,14			Forma 0,01		
	Dawka Se 0,20			Dawka Se 0,06		
	Interakcja 0,29			Interakcja 0,08		

Analizując zawartość oraz pobranie **wapnia** (tab. 23) przez kukurydzę można stwierdzić, że wyższą średnią zawartością oraz pobraniem charakteryzowały się rośliny uprawiane na glebie z dodatkiem selenianu (IV) niż selenianu (VI).

W porównaniu do zawartości określonej w roślinach kontrolnych jedynie w kukurydzy zebranej z gleby wzbogaconej w selen wprowadzony w postaci Na_2SeO_4 w dawce $0,1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ nastąpił wzrost zarówno zawartości, jak i pobrania wapnia. Wraz ze wzrostem ilości wprowadzonego w tej formie selenu stwierdzono spadek akumulacji tego makroskładnika. Rośliny zebrane z gleby z dodatkiem $4,0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ zawierały o 22% mniej niż oznaczono w kukurydzy z gleby kontrolnej.

W porównaniu do roślin kontrolnych dopiero zastosowanie dawki Se $0,25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ w postaci Na_2SeO_3 miało istotny wpływ na zwiększenie zawartości oraz pobrania wapnia. Większe dawki selenu wprowadzone do gleby powodowały powolny spadek ilości nagromadzonego makroelementu, były to jednak zawartości istotnie wyższe, niż określone dla roślin z obiektu kontrolnego.

Tab. 23 Zawartość [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] oraz pobranie [mg z wazonu] **wapnia** przez suchą masę części nadziemnych kukurydzy

Dawka Se [mg·kg ⁻¹]	Zawartość		Średnia dla dawki	Pobranie		Średnia dla dawki
	Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃		Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃	
0	504		504	110		110
0,1	550	519	534	121	114	117
0,25	488	670	579	113	146	130
0,5	460	632	546	99	134	116
0,75	435	550	493	92	111	101
1,0	426	552	489	91	108	99
2,0	407	552	479	86	102	94
3,0	405	524	465	85	97	91
4,0	394	526	460	83	97	90
Średnia dla formy	452	559	-	98	113	-
NIR _{0,05}	Forma 5			Forma 2,2		
	Dawka Se 12			Dawka Se 3,0		
	Interakcja 17			Interakcja 4,5		

Średnie zawartości **magnezu** (tab. 24) w nadziemnych częściach badanych roślin zebranych z gleb z dodatkiem selenianu (IV) i selenianu (VI) kształtowały się na tym samym poziomie i były wyższe, niż stwierdzone w kukurydzy z obiektu kontrolnego. Istotnie większym pobranie charakteryzowały się rośliny uprawiane na glebie z dodatkiem Na_2SeO_4 . Wraz ze wzrostem dawki selenianu (VI) zwiększała się zawartość magnezu w roślinach. W kukurydzy uprawianej na glebie wzbogaconej w Na_2SeO_3 zależność taka wystąpiła jedynie do dawki $1,0 \text{ mgSe} \cdot \text{kg}^{-1}$. Przy wyższych poziomach nawożenia selenem zawartość Mg kształtowała się na tym samym poziomie.

Tab. 24 Zawartość [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] oraz pobranie [mg z wazonu] **magnezu** przez suchą masę części nadziemnych kukurydzy

Dawka Se [mg·kg ⁻¹]	Zawartość		Średnia dla dawki	Pobranie		Średnia dla dawki
	Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃		Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃	
0	158		158	34		34
0,1	167	151	159	37	33	35
0,25	161	173	167	37	38	38
0,5	166	178	172	36	38	37
0,75	169	180	174	36	36	36
1,0	163	182	172	35	36	35
2,0	170	168	169	36	31	34
3,0	176	161	168	37	30	34
4,0	179	160	170	38	30	34
Średnia dla formy	168	168	168	36	34	-
NIR _{0,05}	Forma n.i.			Forma 0,9		
	Dawka Se 5,2			Dawka Se 1,2		
	Interakcja 7,7			Interakcja 1,9		

Średnia zawartość i pobranie **sodu** (tab. 25) przez rośliny była wyższa, niż u kukurydzy zebranej z obiektu kontrolnego. Na zawartość tego makroskładnika bardzo wyraźny wpływ miała forma, w jakie zastosowano selen. Pod wpływem selenianu (IV) wprowadzonego do gleby w dawkach 0,25-2,0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ zwiększała się zawartość tego składnika. Wyższe dawki ograniczyły zawartość Na, ale wartość ta był wciąż wyższa, niż stwierdzona w roślinach kontrolnych. Wpływ Na_2SeO_4 także zależał od wielkości wprowadzonej dawki Se do gleby. Zarówno zawartość sodu, jak i pobranie tego składnika przez kukurydzę zwiększało się wraz z dawką selenu do poziomu 1,0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, większe ilości Se ograniczyły kumulację tego makroskładnika.

Tab. 25 Zawartość [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] oraz pobranie [mg z wazonu] **sodu** przez suchą masę części nadziemnych kukurydzy

Dawka Se [mg·kg ⁻¹]	Zawartość		Średnia dla dawki	Pobranie		Średnia dla dawki
	Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃		Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃	
0	13,8		13,8	2,99		2,99
0,1	15,1	14,8	14,9	3,32	3,26	3,30
0,25	17,6	18,7	18,1	4,08	4,09	4,09
0,5	16,6	16,7	16,7	3,57	3,53	3,55
0,75	15,2	20,7	18,0	3,22	4,18	3,70
1,0	16,3	21,9	19,1	3,49	4,28	3,89
2,0	12,6	24,4	18,5	2,68	4,53	3,60
3,0	14,2	18,5	16,4	3,00	3,44	3,22
4,0	11,0	15,5	13,2	2,30	2,86	2,58
Średnia dla formy	14,7	18,3	-	3,18	3,69	-
NIR _{0,05}	Forma 0,43			Forma 0,13		
	Dawka Se 0,91			Dawka Se 0,19		
	Interakcja 1,28			Interakcja 0,28		

Zawartość i pobranie mikroelementów

Nawożenie selenem miało również wpływ na zawartość i pobranie **cynku** przez kukurydzę (tab. 26). Porównując średnie zawartości oraz średnie pobranie Zn można stwierdzić, iż większy ograniczający wpływ miało zastosowanie selenianu (VI) sodu. Wprowadzenie do gleby selenu w tej postaci spowodowało wzrost ilości cynku w tkankach roślin tylko po zastosowaniu dawki $0,5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, a w przypadku pobrania tego mikroskładnika po wprowadzeniu dawek Se 0,25 oraz $0,5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Nawożenie selenem w formie selenianu (IV) miało wpływ na wzrost zawartości cynku w kukurydzy, ale wartości określone dla dawek 2,0 i $4,0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ nie różniły się istotnie do średniej określonej dla roślin kontrolnych. Najwięcej cynku rośliny pobrały pod wpływem zastosowania selenianu (IV) w dawce $0,75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Tab. 26 Zawartość [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] oraz pobranie [mg z wazonu] **cynku** przez suchą masę części nadziemnych kukurydzy

Dawka Se [mg·kg ⁻¹]	Zawartość		Średnia dla dawki	Pobranie		Średnia dla dawki
	Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃		Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃	
0	23,05		23,05	5,01		5,01
0,1	24,85	28,92	26,88	5,45	6,37	5,91
0,25	25,82	29,21	27,52	6,00	6,39	6,19
0,5	26,85	29,83	28,34	5,78	6,33	6,05
0,75	25,04	36,98	31,01	5,29	7,47	6,38
1,0	24,61	28,8	26,70	5,26	5,63	5,45
2,0	26,00	24,46	25,23	5,52	4,54	5,03
3,0	23,35	27,03	25,19	4,92	5,03	4,97
4,0	20,75	25,93	23,34	4,35	4,79	4,57
Średnia dla formy	24,5	28,24	-	5,29	5,73	-
NIR _{0,05}	Forma 1,05			Forma 0,21		
	Dawka Se 2,11			Dawka Se 0,47		
	Interakcja 2,99			Interakcja 0,66		

Zawartość i pobranie **manganu** była zależne od formy i dawki wprowadzonego selenu do gleby (tab. 27). Więcej Mn zawierały rośliny nawiezione selenianem (VI) sodu i w przypadku tej formy dawka $0,25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ wpłynęła na istotny wzrost zawartości i pobrania manganu przez kukurydzę, a dawka najwyższa ($4,0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) na istotny spadek tych wartości w porównaniu do roślin z obiektu kontrolnego. Ograniczający wpływ selenu zastosowanego w postaci selenianu (IV) sodu na zawartości i nagromadzanie manganu przez kukurydzę ujawnił się po wprowadzeniu do gleby najwyższych dawek tego mikroskładnika (2,0; 3,0 oraz $4,0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Tab. 27 Zawartość [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] oraz pobranie [mg z wazonu] **manganu** przez suchą masę części nadziemnych kukurydzy

Dawka Se [mg·kg ⁻¹]	Zawartość		Średnia dla dawki	Pobranie		Średnia dla dawki
	Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃		Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃	
0	57,92		57,92	12,59		12,59
0,1	61,09	54,53	57,81	13,41	12,01	12,71
0,25	67,37	55,59	61,48	15,65	12,15	13,90
0,5	62,46	56,34	59,40	13,43	11,94	12,68
0,75	62,18	58,23	60,21	13,15	11,77	12,46
1,0	58,23	58,94	58,59	12,44	11,53	11,99
2,0	60,73	50,80	55,77	12,90	9,44	11,17
3,0	57,66	52,28	54,97	12,14	9,72	10,93
4,0	49,32	48,67	48,99	10,33	9,00	9,66
Średnia dla formy	59,7	54,81	-	12,89	11,13	-
NIR _{0,05}	Forma 1,09			Forma 0,24		
	Dawka Se 3,37			Dawka Se 0,80		
	Interakcja 4,61			Interakcja 1,10		

Zawartość **miedzi** w nadziemnych częściach kukurydzy zależała przede wszystkim od formy zastosowanego selenu (tab. 28). Brak było natomiast wpływu wielkości zastosowanej dawki.

Tab. 28 Zawartość [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] oraz pobranie [mg z wazonu] **miedzi** przez suchą masę części nadziemnych kukurydzy

Dawka Se [mg·kg ⁻¹]	Zawartość		Średnia dla dawki	Pobranie		Średnia dla dawki
	Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃		Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃	
0	2,84		2,84	0,62		0,62
0,1	3,01	2,18	2,60	0,66	0,48	0,57
0,25	3,05	2,25	2,65	0,71	0,49	0,60
0,5	3,26	2,11	2,68	0,70	0,45	0,57
0,75	2,89	2,34	2,61	0,61	0,47	0,54
1,0	2,84	2,67	2,76	0,61	0,52	0,57
2,0	3,2	2,72	2,96	0,68	0,51	0,59
3,0	2,8	2,64	2,72	0,59	0,49	0,54
4,0	2,56	2,78	2,67	0,54	0,51	0,53
Średnia dla formy	2,94	2,50	-	0,63	0,50	-
NIR _{0,05}	Forma 0,25			Forma 0,05		
	Dawka Se n.i.			Dawka Se 0,06		
	Interakcja 0,44			Interakcja 0,10		

Badania własne wykazały, że zawartość **żelaza** w kukurydzy była zależna zarówno od formy, jak i dawki zastosowanego selenu (tab. 29). Istotny wzrost tej wartości w porównaniu

do określonej dla roślin z obiektu kontrolnego, stwierdzono u kukurydzy nawiezionej selenianem (VI) sodu w dawce $3,0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ oraz selenianem (IV) w dawkach $2,0$ i $3,0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Pozostałe ilości selenu nie wpłynęły na zawartość żelaza w tkankach roślin.

Istotny wpływ Se na ograniczenie pobierania Fe przez nadziemne części roślin zaobserwowano po wprowadzeniu do gleby selenianu (IV) sodu w dawce najwyższe ($4,0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Tab. 29 Zawartość [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] oraz pobranie [mg z wazonu] **żelaza** przez suchą masę części nadziemnych kukurydzy

Dawka Se [mg·kg ⁻¹]	Zawartość		Średnia dla dawki	Pobranie		Średnia dla dawki
	Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃		Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃	
0	43,66		43,66	9,49		9,49
0,1	43,54	47,89	45,71	9,55	10,54	10,04
0,25	41,67	48,38	45,02	9,68	10,58	10,13
0,5	42,40	46,92	44,66	9,12	9,95	9,53
0,75	42,98	48,22	45,60	9,08	9,71	9,40
1,0	41,25	47,65	44,45	8,82	9,31	9,07
2,0	46,43	50,02	48,22	9,86	9,30	9,58
3,0	49,36	50,72	50,03	10,39	9,43	9,91
4,0	43,22	42,95	43,09	9,06	7,94	8,50
Średnia dla formy	43,83	47,38	-	9,45	9,58	-
NIR _{0,05}	Forma 3,04			Forma n.i.		
	Dawka Se 3,66			Dawka Se 0,77		
	Interakcja 5,65			Interakcja 1,13		

Zawartość **niklu** w kukurydzy również zależna była od formy i dawki selenu (tab. 30). Istotny wpływ na zwiększenie ilości Ni w porównaniu do roślin kontrolnych stwierdzono u kukurydzy nawiezionej dawką Se $0,5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ w formie Na_2SeO_4 oraz dawką $0,75$ i $1,0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ w postaci Na_2SeO_3 . Podobne zależności zaobserwowano w przypadku pobrania niklu przez rośliny, przy czym najwyższa dawka selenu ($4,0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) wprowadzonego w formie selenianu (IV) spowodowała ograniczenie nagromadzania badanego mikroskładnika w porównaniu do wartości określonej u kukurydzy z obiektu kontrolnego.

Tab. 30 Zawartość [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] oraz pobranie [mg z wazonu] **niklu** przez suchą masę części nadziemnych kukurydzy

Dawka Se [mg·kg ⁻¹]	Zawartość		Średnia dla dawki	Pobranie		Średnia dla dawki
	Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃		Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃	
0	0,38		0,38	0,08		0,08
0,1	0,31	0,36	0,33	0,07	0,08	0,07
0,25	0,37	0,38	0,38	0,09	0,08	0,08
0,5	0,49	0,39	0,44	0,10	0,08	0,09
0,75	0,34	0,53	0,44	0,07	0,11	0,09
1,0	0,38	0,49	0,43	0,08	0,10	0,09
2,0	0,36	0,46	0,41	0,08	0,09	0,08
3,0	0,42	0,38	0,39	0,09	0,07	0,08
4,0	0,31	0,34	0,33	0,07	0,06	0,06
Średnia dla formy	0,37	0,41	-	0,08	0,08	-
NIR _{0,05}	Forma 0,02			Forma n.i.		
	Dawka Se 0,07			Dawka Se 0,02		
	Interakcja 0,10			Interakcja 0,02		

Przeprowadzona analiza statystyczna (tab. 31) wykazała, że plonowanie roślin było istotnie ujemnie skorelowane zarówno z zawartością, jak i pobraniem selenu przez badane rośliny. Wyższe wartości współczynników korelacji określone dla selenianu (IV), niż dla selenianu (VI) wskazują, że ta forma w znacznie większym stopniu ograniczała ilość zebranej masy roślin. Wpływ zastosowanego selenu na zawartość badanych makro- i mikrośladników zależał od formy, w jakiej ten pierwiastek wprowadzono do gleby. Zawartość fosforu w roślinach był istotnie ujemnie skorelowana z zawartością selenu zastosowanego w postaci selenianu (IV), natomiast dodatnio w przypadku nawożenia gleby selenianem (VI). Odwrotną zależność stwierdzono dla siarki. Między zawartością i pobraniem selenu przez kukurydzę, a zawartością i pobraniem N, K, Ca, Na, Zn i Mn przy obu formach Se była to zależność ujemna, przy czym nie wykazano istotnego wpływu selenianu (IV) na zawartość Ca, Zn i Na oraz na pobranie P i Na. Zawartość oraz pobranie magnezu przez rośliny była dodatnio skorelowana z selenem wprowadzonym w postaci selenianu (VI). Wykazano również ujemną zależność pomiędzy pobraniem Mg, a selenianem (IV) sodu.

Tab. 31 Współczynnik korelacji prostej pomiędzy plonem, zawartością i pobraniem przez kukurydzę selenu, a zawartością i pobraniem makro- i mikrośladników

	Zawartość		Pobranie	
	Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃	Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃
plon	-0,52	-0,76	-0,51	-0,75
N	-0,76	-0,78	-0,76	-0,8
P	-0,37	0,58	-0,53	n.i.
K	-0,7	-0,71	-0,72	-0,72
S	0,91	-0,49	0,89	-0,55
Ca	-0,78	n.i.	-0,78	-0,58
Mg	0,76	n.i.	0,37	-0,72
Na	-0,63	n.i.	-0,65	n.i.
Zn	-0,50	n.i.	-0,58	-0,47
Mn	-0,60	-0,62	-0,62	-0,78
Cu	n.i.	0,39	-0,43	n.i.
Fe	0,42	n.i.	n.i.	-0,59
Ni	n.i.	n.i.	n.i.	-0,49

różnice istotne p<0,05

n.i.- różnice nieistotne

3.4.4. Doświadczenie IV. Wpływ nawożenia siarką na pobieranie selenu przez rośliny

O pobieraniu selenu przez rośliny, oprócz wielu innych właściwości, w znacznym stopniu decyduje zawartość siarki w glebie. Zbliżone właściwości geochemiczne tych pierwiastków powodują, że o wystąpieniu reakcji antagonizmu/synergizmu jonowego decydować będzie ich stosunek w glebie. Celem przeprowadzonego doświadczenia było określenie wpływu poziomu nawożenia siarką na plonowanie, zawartość i pobranie tych dwóch pierwiastków. Ocenę wpływu dodatku siarki przeprowadzono na glebie wzbogaconej w ten pierwiastek. Do wszystkich gleb wprowadzono jednorazowo, przedsiewnie $0,100 \text{ mgSe} \cdot \text{kg}^{-1}$ gleby, w postaci wodnego roztworu Na_2SeO_4 .

Przeprowadzone badania własne wykazały, iż plonowanie roślin zależne było zarówno od dawki zastosowanej siarki, jak również od właściwości odmianowych kukurydzy (tab. X, fig. 16). Porównując średni plon badanych odmian można stwierdzić, iż istotnie więcej masy (o około 8%) uzyskano u odmiany Lober, niż Bielik.

Wprowadzenie do gleby siarki spowodowało spadek plonowania obu odmian kukurydzy. Przy wszystkich poziomach nawożenia tym pierwiastkiem wielkość tego spadku zależała od ilości wprowadzonego do gleby makroskładnika, brak było natomiast wpływu właściwości odmianowych. Już po zastosowaniu najniższej dawki S ($0,03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) stwierdzono obniżenie plonu u obu odmian o około 6,5% w porównaniu do zebranego z obiektu kontrolnego. Wraz ze wzrostem ilości zastosowanej siarki następowało dalsze istotne obniżenie ich plonowania i przy najwyższym poziomie nawożenia tym pierwiastkiem spadek ten wynosił już około 16%. (tab.X,fig.16).

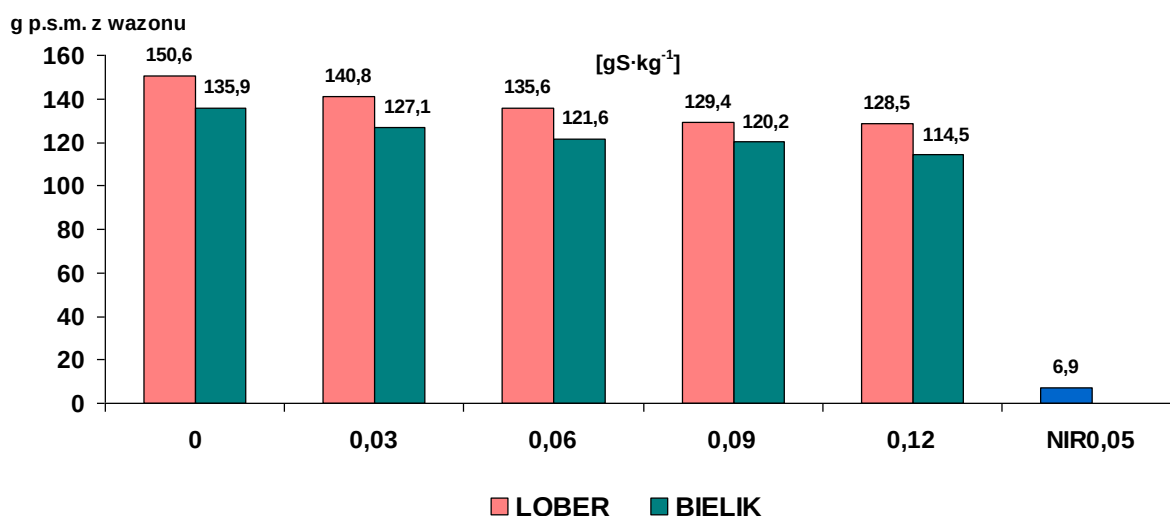


Fig. 16 Plon powietrznie suchej masy nadziemnych części kukurydzy

Badane odmiany kukurydzy wykazały znaczne zróżnicowanie w zdolności do nagromadzania siarki (tab. 32, 33). Odmiana Bielik zawierała średnio o około 25% więcej tego pierwiastka, niż odmiana Lober i była to różnica udowodniona statystycznie. Na wielkość obliczonej wartości średniej wpływ miały przede wszystkim różnice stwierdzone dla roślin zebranych z obiektu kontrolnego i z gleb nawiezionych dawką $0,03\text{gS}\cdot\text{kg}^{-1}$. W warunkach tych odmiana Bielik zawierała o odpowiednio 63% i 50% więcej siarki, niż zawartość oznaczona w suchej masie kukurydzy odmiany Lober. Przy pozostałych poziomach nawożenia S różnice te kształtowała się na poziomie 12-14%.

Wraz ze wzrostem dawki siarki zwiększyła się zawartość tego makroskładnika u obu odmian kukurydzy, z tym że wzrost ten u odmiany Bielik był istotnie mniejszy, niż u Lober. Przy najwyższym poziomie nawożenia S ($0,12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) zawartość tego składnika w biomase kukurydzy odmiany Lober była o 160% wyższa, niż określona w roślinach uprawianych na glebie z naturalną zawartością S. Przy tym samym poziomie nawożenia zawartość siarki w kukurydzy odmiany Bielik zwiększyła się o 82%.

Analizując wielkość pobrania siarki ogólnej przez kukurydzę (tab. 32) można stwierdzić, iż odmiana Bielik w ciągu całego okresu wegetacji pobrała średnio o 12 % więcej tego pierwiastka, niż Lober. Reakcja badanych odmian zależała od wielkości zastosowanej dawki siarki. U obu odmian wykazano bowiem brak istotnego różnicowania w pobraniu tego pierwiastka po zastosowaniu nawożenia siarką w dawkach $0,06\text{-}0,12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

W porównaniu do ilości S określonej dla kukurydzy odmiany Bielik uprawianej na glebie o naturalnej zasobności w ten pierwiastek istotny wzrost pobrania tego makroskładnika wystąpił po wprowadzeniu do gleby najniższej dawki siarki ($0,03\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$). Dalsze zwiększenie ilości wprowadzonej siarki nie miało istotnego wpływu na wielkość kumulacji tego pierwiastka przez tą odmianę. U odmiany Lober wraz ze wzrostem dawki S do poziomu 0,6 zwiększało się nagromadzenie tego makroskładnika. Dalsze zwiększenie wprowadzonej ilości S również u tej odmiany nie różnicowało nagromadzenia tego makroskładnika.

Tab. 32 Zawartość [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$] i pobranie [mg z wazonu] siarki ogólnej przez części nadziemne kukurydzy

Dawka S [g·kg ⁻¹]	Zawartość		Średnia dla dawki	Pobranie		Średnia dla dawki
	LOBER	BIELIK		LOBER	BIELIK	
0	531	867	699	80	118	99
0,03	912	1371	1141	128	174	151
0,06	1275	1425	1350	173	173	173
0,09	1321	1517	1419	171	182	177
0,12	1381	1575	1478	177	180	179
Średnia dla odmiany	1084	1351	-	146	166	-
NIR _{0,05}	Odmiana 35			Odmiana 6,0		
	Dawka S 56			Dawka S 9,5		
	Interakcja 79			Interakcja 13,4		

Wraz ze wzrostem ilości siarki wprowadzanej do gleby zwiększała się nie tylko zawartość siarki ogólnej, ale również ilość tego makroskładnika kumulowanego w postaci siarczanów (tab. 33). Porównując zawartość S-SO₄ w kukurydzy zebranej z poszczególnych gleb można stwierdzić, że przy wszystkich poziomach nawożenia tym makroskładnikiem odmiana Bielik zawierała istotnie więcej tej formy siarki, niż odmiana Lober. Wraz ze wzrostem dawki S w kukurydzy następował istotny wzrost zawartości siarczanów i przy najwyższym poziomie nawożenia (0,12g·kg⁻¹) kukurydza odmiany Lober zawierała o 41%, a odmiany Bielik o 30% więcej formy siarczanowej niż rośliny tych odmian uprawiane na glebie kontrolnej. Podobne zależności stwierdzono w przypadku nagromadzania tej formy siarki przez kukurydzę (tab. 33). Istotnie więcej S-SO₄ niż Lober pobrała odmiana Bielik.

Tab. 33 Zawartość [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$] i pobranie [mg z wazonu] siarki siarczanowej przez części nadziemne kukurydzy

Dawka S [g·kg ⁻¹]	Zawartość		Średnia dla dawki	Pobranie		Średnia dla dawki
	LOBER	BIELIK		LOBER	BIELIK	
0	257	342	299	39	46	42
0,03	270	395	332	38	50	44
0,06	348	398	373	47	48	47
0,09	352	400	376	46	48	47
0,12	362	445	403	47	51	49
Średnia dla odmiany	318	396	-	43	49	-
NIR _{0,05}	Odmiana 9,6			Odmiana 1,6		
	Dawka S 15,1			Dawka S 2,5		
	Interakcja 21,4			Interakcja 3,6		

Oceniając wpływ warunków prowadzenia doświadczenia na udział pobranej siarki siarczanowej w całkowitym nagromadzeniu tego pierwiastka (fig. 17) można stwierdzić, iż w porównaniu do kukurydzy obu odmian zebranej z gleby kontrolnej zastosowane dawki siarki przyczyniły się do zmniejszenia udziału S-SO₄ w Sog. Z wyjątkiem roślin z obiektu kontrolnego nie stwierdzono wpływu zarówno właściwości uprawianej odmiany, jak i wielkości zastosowanej dawki siarki na wartość obliczonego udziału siarki mineralnej w całkowitym nagromadzeniu tego makroskładnika – u obu odmian i wahał się on bowiem od 26,4 do 29,6%.

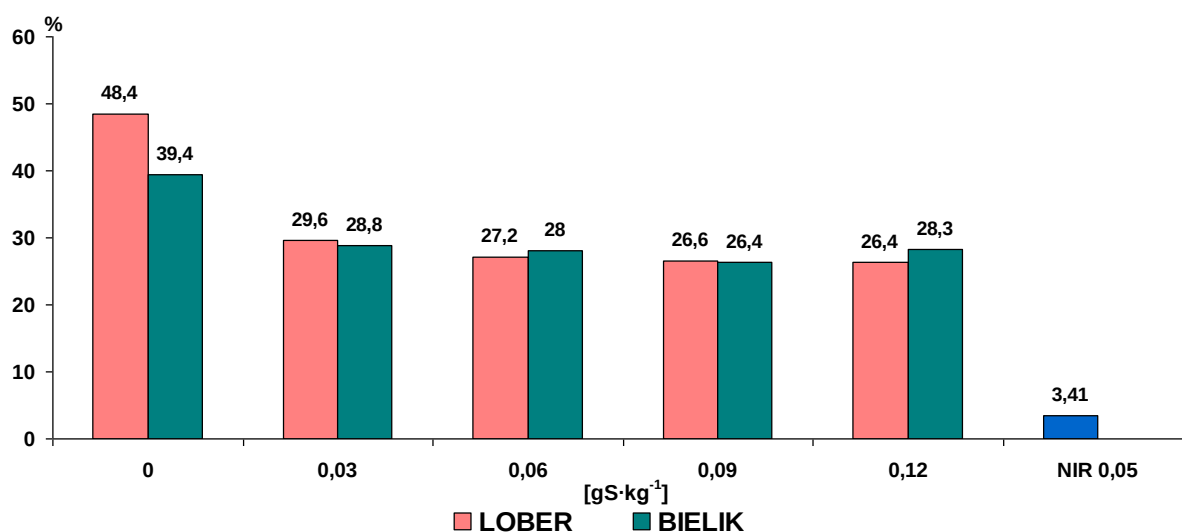


Fig. 17 Udział S-SO₄ w całkowitej zawartości siarki w częściach nadziemnych kukurydzy [%]

Zawartość i pobranie selenu

Uwzględnione w badaniach odmiany kukurydzy Lober i Bielik uprawiane na glebie o naturalnej zawartości selenu (doświadczenie I ; tab. III) zawierały bardzo mało tego mikroelementu. Były to wartości odpowiednio 10 i 30 µg·kg⁻¹s.m. Wzbogacenie gleb w ten mikroelement w dawce 0,100 mg·kg⁻¹ w postaci łatwo dostępnego selenianu (VI), a także odczyn (pH 5,82-6,28; tab.) sprzyjający jego pobieraniu przyczyniło się do znacznego wzrostu zawartości Se w suchej masie roślin testowych (tab. 34).

Przeprowadzone badania własne wykazały, iż na zawartość selenu w nadziemnych częściach kukurydzy wpływ miały nie tylko jej właściwość odmianowa, ale również ilość wprowadzanej do gleby siarki. (tab.). Podobnie jak to stwierdzono w przypadku zawartości siarki ogólnej oraz siarczanów również w odniesieniu do selenu odmiana Bielik charakteryzowała się wyższą jego zawartością niż Lober. Zależność ta wystąpiła przy wszystkich poziomach nawożenia tym makroskładnikiem.

Zawartość selenu w kukurydzy uprawianej na glebie o naturalnej zawartości siarki (gleba kontrolna) nie różniła się istotnie pomiędzy odmianami. Zastosowane nawożenie tym pierwiastkiem i wynikający z tego wzrost zawartości tego składnika w częściach nadziemnych badanych odmian kukurydzy miało wpływ na zdolność roślin do akumulacji selenu. Różnice odmianowe ujawniły się już po zastosowaniu najniższej dawki siarki, gdyż zawartość tego mikroskładnika w roślinach pod wpływem dodatku $0,03 \text{ gS}\cdot\text{kg}^{-1}$ zwiększyła się u odmiany Lober o 8% oraz o 20% u Bielik. Wraz z dalszym wzrostem dawki wprowadzanego do gleby makroelementu zwiększała się ilość selenu w nadziemnych częściach kukurydzy. W porównaniu do zawartości Se oznaczonej w roślinach zebranych z gleby kontrolnej kukurydza obu odmian uprawianych na glebie nawiezionej dawką 0,06 i $0,09 \text{ gS}\cdot\text{kg}^{-1}$ zawierała istotnie więcej tego mikroelementu. Pod wpływem najwyższej dawki S ($0,12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) ujawnił się antagonizm pomiędzy tym składnikiem, a selenem, gdyż nastąpił istotny spadek zawartości Se w kukurydzy w porównaniu do ilości określonych u roślin uprawianych na glebie z dodatkiem $0,09 \text{ gS}\cdot\text{kg}^{-1}$. Była to jednak wartość istotnie większa niż określona w roślinach zebranych z gleby kontrolnej. Zależność ta wystąpiła u obu badanych odmian.

Obliczony stosunek S:Se w glebie obiektu kontrolnego, oznaczony przed wysiewem roślin, kształtował się na poziomie 271:1. Wprowadzone nawożenie siarką spowodowało rozszerzenie tej wartości. Dla poszczególnych gleb wartość tego stosunku wynosiła: 297:1 ($0,03 \text{ gS}\cdot\text{kg}^{-1}$), 324:1 ($0,06 \text{ gS}\cdot\text{kg}^{-1}$), 350:1 ($0,09 \text{ gS}\cdot\text{kg}^{-1}$) i 376:1 ($0,12 \text{ gS}\cdot\text{kg}^{-1}$). Porównując te wartości z zawartością selenu w roślinach można stwierdzić, że najwięcej tego mikroelementu zawierała kukurydza uprawiana na glebie, w której stosunek S:Se kształtował się na poziomie 350:1. Dalsze rozszerzanie wartości tego stosunku prowadziło do ograniczenia nagromadzania selenu.

Właściwości odmianowe kukurydzy nie miały wpływu na wartość pobrania selenu przez nadziemne części roślin (tab. 34). Było ono natomiast zależne od ilości wprowadzanej siarki do gleby. W przypadku odmiany Lober, dopiero dawka $0,06 \text{ gS}\cdot\text{kg}^{-1}$ spowodowała istotny wzrost pobrania Se przez rośliny o ok. 8%. Natomiast pobranie tego mikroskładnika przez rośliny uprawiane na glebie nawiezionej najwyższą dawką S ($0,12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) nie różniła się istotnie od wartości określonych dla kukurydzy zebranej z obiektu kontrolnego.

Tab. 34 Zawartość [$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$] i pobranie [μg z wazonu] selenu przez części nadziemne kukurydzy

Dawka S [g·kg ⁻¹]	Zawartość		Średnia dla dawki	Pobranie		Średnia dla dawki
	LOBER	BIELIK		LOBER	BIELIK	
0	370	385	377	55,7	52,3	54,0
0,03	403	479	441	56,8	60,9	58,8
0,06	458	497	478	60,8	60,4	60,6
0,09	469	534	503	63,0	64,3	63,6
0,12	444	503	473	57,1	57,5	57,3
Średnia dla odmiany	429	479	-	58,7	59,1	-
NIR _{0,05}	Odmiana 9,1			Odmiana n.i.		
	Dawka S 14,3			Dawka S 2,9		
	Interakcja 20,3			Interakcja 4,0		

Przeprowadzona ocena statystyczna wyników wykazała (tab. 35), iż plon obu odmian kukurydzy był ujemnie skorelowany z zawartością siarki oraz selenu w częściach nadziemnych suchej masy roślin. Ilość siarki była natomiast dodatnio skorelowana z zawartością Se w tkankach roślin.

Tab. 35 Współczynnik korelacji prostej pomiędzy plonem, a zawartością siarki ogólnej, siarczanowej oraz selenu w częściach nadziemnych kukurydzy

Lober				Bielik			
zawartość	plon	Sog.	S-SO ₄	zawartość	Plon	Sog.	S-SO ₄
Sog.	-0,92	-	0,92	Sog.	-0,83	-	0,87
S-SO ₄	-0,88	-	-	S-SO ₄	-0,83	-	-
Se	-0,88	0,91	0,89	Se	-0,76	0,94	0,72

różnice istotne $p<0,05$

n.i.- różnice nieistotne

Na podstawie analizy statystycznej stwierdzono również, iż pobranie selenu przez kukurydzę nie miało wpływu na wielkość plonu badanych roślin, jak również na pobranie siarki siarczanowej przez kukurydzę odmiany Bielik (tab. 36). Było natomiast dodatnio skorelowane z pobraniem siarki ogólnej u obu mieszańców, a także z nagromadzeniem S-SO₄ u kukurydzy odmiany Lober.

Tab. 36 Współczynnik korelacji prostej pomiędzy plonem, a pobraniem siarki ogólnej, siarczanowej oraz selenu w częściach nadziemnych kukurydzy

Lober				Bielik			
pobranie	plon	Sog.	S-SO ₄	pobranie	plon	Sog.	S-SO ₄
Sog.	-0,87	-	0,81	Sog.	-0,64	-	0,56
S-SO ₄	-0,69	-	-	S-SO ₄	n.i.	-	-
Se	n.i.	0,61	0,60	Se	n.i.	0,68	n.i.

różnice istotne $p < 0,05$

n.i.- różnice nieistotne

Analiza gleb pobranych po sprężenie roślin wykazała, że zastosowane dawki siarki przyczyniły się do niewielkiego wzrostu zakwaszenia gleb (tab. 37). Zawartość selenu w glebach była zależna od ilości wprowadzanej siarki, z tym że istotnie więcej tego pierwiastka, niż w glebach pobranych z pozostałych obiektów, stwierdzono dopiero po zastosowaniu 0,09 i 0,12 g·kg⁻¹, co może być związane z ograniczeniem pobierania tego mikrośladnika przez kukurydzę przy tych poziomach nawożenia siarką (tab. 34), a także z wpływem dodatku tego makrośladnika na ograniczenie strat Se na drodze metylacji.

Tab. 37 Odczyn oraz zawartość selenu [$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$] w glebie pobranej po zakończeniu doświadczenia

Dawka S [$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$]	pH _{KCl}		Zawartość Se		Średnia dla dawki
	LOBER	BIELIK	LOBER	BIELIK	
0	6,28	6,15	165	163	164
0,03	6,06	5,94	174	165	169
0,06	6,07	5,90	181	168	176
0,09	5,98	5,86	186	188	187
0,12	5,79	5,82	191	191	191
Średnia dla odmiany	6,04	5,93	179	175	-
NIR _{0,05}			Odmiana		n.i.
			Dawka		14,85
			Interakcja		21,02

Na zawartość siarki ogólnej w glebie po sprężenie roślin miała wpływ ilość tego składnika wprowadzanego do podłoża (tab. 38). Średnia zawartość tej formy S nie różniła się istotnie pomiędzy badanymi odmianami. Po wprowadzeniu najniższej dawka S nastąpił istotny wzrost zawartości ogólnej puli tego składnika w glebie u obu odmian w porównaniu do obiektu kontrolnego. Wielkość tego wzrostu wynosiła 48% u odmiany Lober i 39% u Bielik. Dalszy wzrost ilości Sog. zaobserwowano tylko w przypadku stanowiska, na którym

była uprawiana odmiana Bielik i przy najwyższym poziomie nawożenia S wartość ta była o ok. 60% wyższa, niż określona dla obiektu kontrolnego. W przypadku podłoża, na którym uprawiano kukurydzę Lober, kolejne dawki siarki nie wpłynęły na istotne zwiększenie zawartości Sog. w porównaniu do stanowiska, do którego wprowadzono $0,03 \text{ gS} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Odmienne zależności stwierdzono w przypadku zawartości siarki mineralnej w glebie (tab. 38). Średnia zawartość S-SO₄ w podłożu, na którym uprawiano odmianę Lober, była o ok. 19% wyższa, niż określona dla stanowiska odmiany Bielik. Wprowadzenie $0,03 \text{ gS} \cdot \text{kg}^{-1}$ spowodowało istotny wzrost ilości mineralnej formy siarki w porównaniu do obiektu kontrolnego o ok. 60% w glebie, na której uprawiano kukurydzę Lober. Wartości te określone dla poziomu nawożenia od $0,03$ do $0,12 \text{ gS} \cdot \text{kg}^{-1}$ nie różniły się istotnie dla tej odmiany. W przypadku kukurydzy Bielik tylko najwyższa dawka S spowodowała istotny wzrost zawartości sarki siarczanowej w porównaniu do obiektu kontrolnego (tab. 38).

Tab. 38 Zawartość siarki ogólnej oraz siarczanowej [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{s.m.}$] w glebie zebranej po zakończeniu doświadczenia

Dawka S [g·kg ⁻¹]	Sog.		Średnia dla dawki	S-SO ₄		Średnia dla dawki
	LOBER	BIELIK		LOBER	BIELIK	
0	135,7	135,8	135,7	47,0	52,8	49,9
0,03	259,0	223,7	241,3	118,3	69,8	94,1
0,06	264,2	230,7	247,4	126,9	68,1	97,5
0,09	279,0	281,0	280,0	115,5	75,8	95,6
0,12	286,3	337,8	312,1	132,3	106,9	119,6
Średnia dla odmiany	244,8	241,8	-	108,0	74,7	-
NIR _{0,05}	Odmiana n.i.			Odmiana 18,43		
	Dawka S 26,42			Dawka S 29,14		
	Interakcja 37,38			Interakcja 41,21		

3.4.5. Doświadczenie V. Wpływ dolistnego nawożenia selenem na zawartość tego pierwiastka w częściach nadziemnych kukurydzy

Celem doświadczenia była ocena wpływu dolistnego dokarmiania kukurydzy Na_2SeO_3 i Na_2SeO_4 stosowanymi łącznie z azotem lub magnezem oraz obydwoma pierwiastkami na plonowanie oraz skład chemiczny roślin testowych.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, iż plonowanie roślin było zależne zarówno od ilości wprowadzonego selenu, formy w jakiej został zastosowany, a także dodatku do cieczy roboczej azotu i magnezu (fig. 18, tab. XI). Porównując wielkość plonu uzyskanego na obiektach kontrolnych (bez Se) można stwierdzić, że dokarmienie roślin azotem miało większy wpływ, niż zastosowanie magnezu.

Istotnie wyższy średni plon kukurydzy uzyskano w wyniku dokarmienia dolistnego selenianem (IV) sodu, niż selenianem (VI) sodu.

Przy obydwu poziomach nawożenia selenem stosowanym łącznie z mocznikiem nie stwierdzono istotnego zróżnicowania w plonowaniu w zależności od użytej formy chemicznej selenu. Wystąpił on natomiast u roślin dokarmianych dolistnie selenem z dodatkiem magnezu oraz azotu i magnezu. W porównaniu do masy zebranej z obiektu kontrolnego łącznie dokarmienie roślin selenianem (IV) i magnezem przyczyniło się do wykształcenia większej ilości biomasy. Plon uzyskany po oprysku cieczą zawierającą 5 μg /wazon + Mg był 3%, a po zastosowaniu 10 μg /wazon o blisko 8% wyższy, niż określony dla roślin dokarmianych tylko magnezem. Dodatek magnezu do cieczy zawierającej selenian (VI) nie miał istotnego wpływu na plonowanie kukurydzy.

Łączne zastosowanie selenu, azotu i magnezu istotnie zwiększyło plon kukurydzy jedynie po dokarmieniu roślin selenianem (IV). Uzyskana masa roślin dokarmianych dolistnie selenianem (VI) z dodatkiem mocznika oraz siarczanu magnezu była na tym samym poziomie, co określona dla roślin z obiektu kontrolnego.

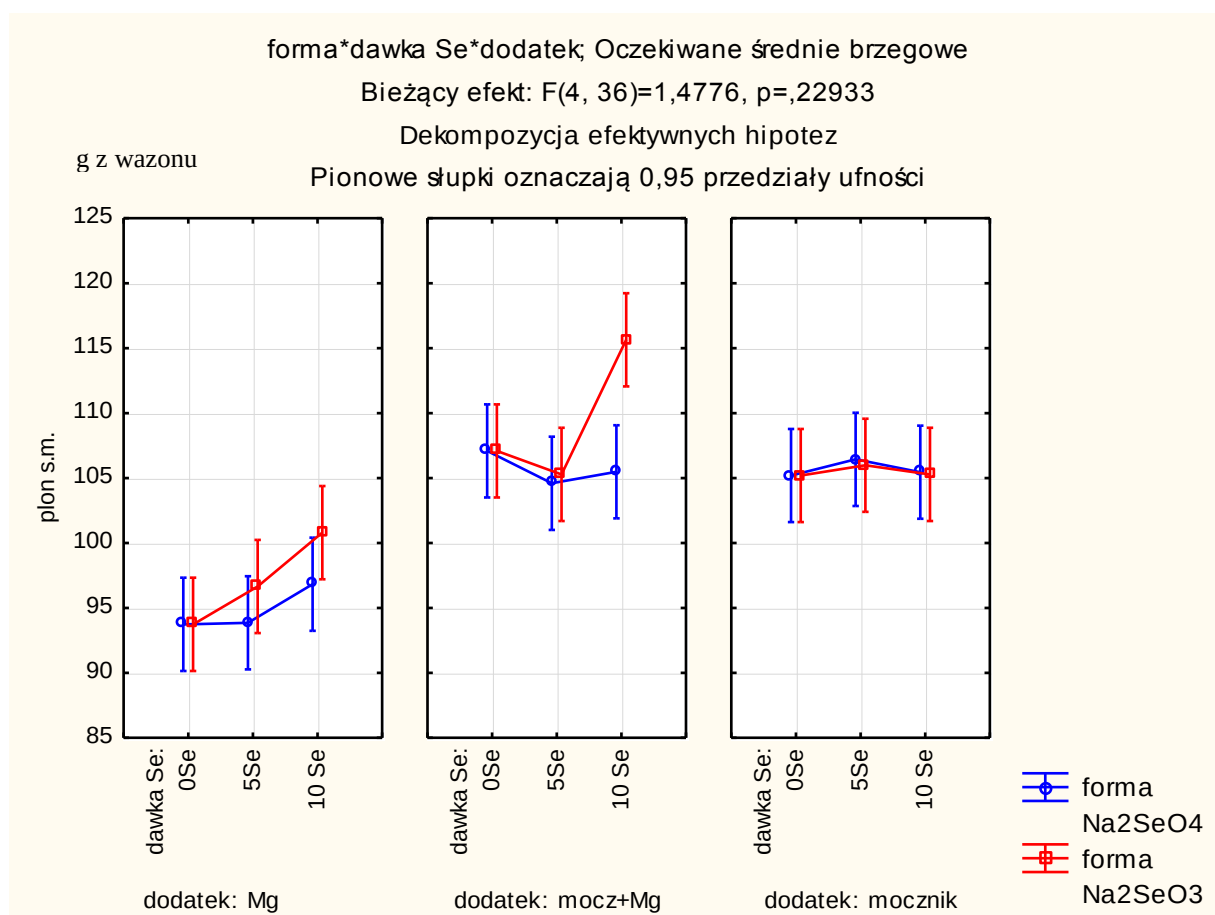


Fig. 18. Wpływ dodatku, formy oraz dawki selenu na plonowanie kukurydzy

Zawartość selenu w nadziemnych częściach kukurydzy zależna była zarówno od dawki i formy chemicznej wprowadzonego Se, jak i od rodzaju zastosowanego dodatku (fig. 19-21, tab. XII). Zawartość tego mikroelementu w kukurydzy była w znacznym stopniu zróżnicowana, wahała się bowiem od $13,8 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. w roślinach dokarmianych tylko azotem do $110 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. w roślinach dokarmianych dolistnie selenem w postaci Na₂SeO₃ stosowanym łącznie z azotem i magnezem (tab. XII).

Analizując wpływ formy oraz dawki zastosowanego selenu na jego zawartość w kukurydzy można stwierdzić, iż więcej selenu zawierały rośliny nawiezione selenianem (VI) sodu, niż selenianem (IV) (fig. 19). Wraz ze wzrostem wprowadzonej dolistnie ilości tego pierwiastka zwiększała się jego zawartość w nadziemnych częściach kukurydzy.

Przy niższym poziomie nawożenia selenem ($5 \mu\text{g Se /wazon}$) dodatek azotu oraz dodatek magnezu w niewielkim stopniu zróżnicowało zawartość tego mikroelementu w kukurydzy (fig. 20, tab. XII). Przy obydwu formach selenem zastosowanego łącznie z mocznikiem zawartość ta zwiększyła się, w porównaniu do określonej dla roślin kontrolnych, około 2,8 razy, a po dodaniu do cieczy roboczej magnezu o około 2 razy. Różnice we

wpływie formy chemicznej selenu ujawniły się dopiero po łącznym zastosowaniu selenu, azotu i magnezu. Rośliny dokarmione selenianem (VI) zawierały w swoich tkankach istotnie więcej selenu, niż dokarmione selenianem (IV). Dwukrotne zwiększenie wielkości zastosowanej dawki selenu (10 µg/wazon) w postaci Na₂SeO₄ przyczyniło się do wzrostu zawartości tego pierwiastka o około 1,2 razy. Wielkość tego wzrostu nie była zależna od rodzaju dodatku wprowadzonego do cieczy roboczej. Natomiast w roślinach opryskanych Na₂SeO₃ po zastosowaniu 10 µgSe/wazon w największym stopniu zwiększyła się zawartość selenu po łącznym jego zastosowaniu z mocznikiem, a w najmniejszym w kukurydzy dokarmionj Se + N + Mg.

Przy obydwu poziomach nawożenia selenem najwyższą zawartość tego pierwiastka stwierdzono po dolistnym dokarmieniu nim roślin stosowanym łącznie z mocznikiem i siarczanem magnezu (fig. 21, tab. XII). W obiektach tych istotnie wyższą zawartością tego mikroelementu charakteryzowała się kukurydza dokarmiana selenianem (VI), niż selenianem(IV).

Oceniając skuteczność zwiększania zawartości selenu na drodze jego dolistnego stosowania można stwierdzić, że jedynie po zastosowaniu 10 µg/wazon w postaci Na₂SeO₄ łącznie z mocznikiem i siarczanem magnezu była ona wystarczająca do pokrycia zapotrzebowania zwierząt na ten mikroelement.

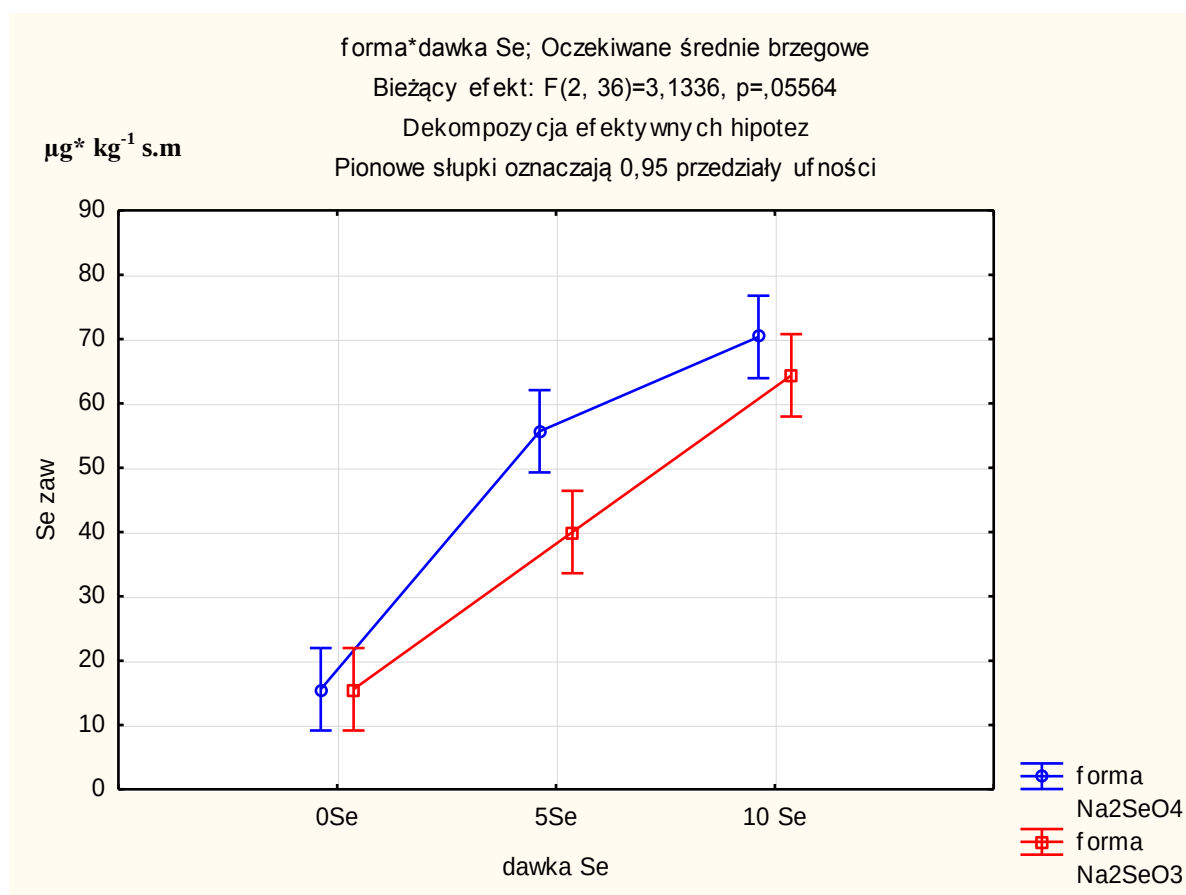


Fig. 19 Wpływ formy oraz dawki selenu na jego zawartość w nadziemnych częściach kukurydzy

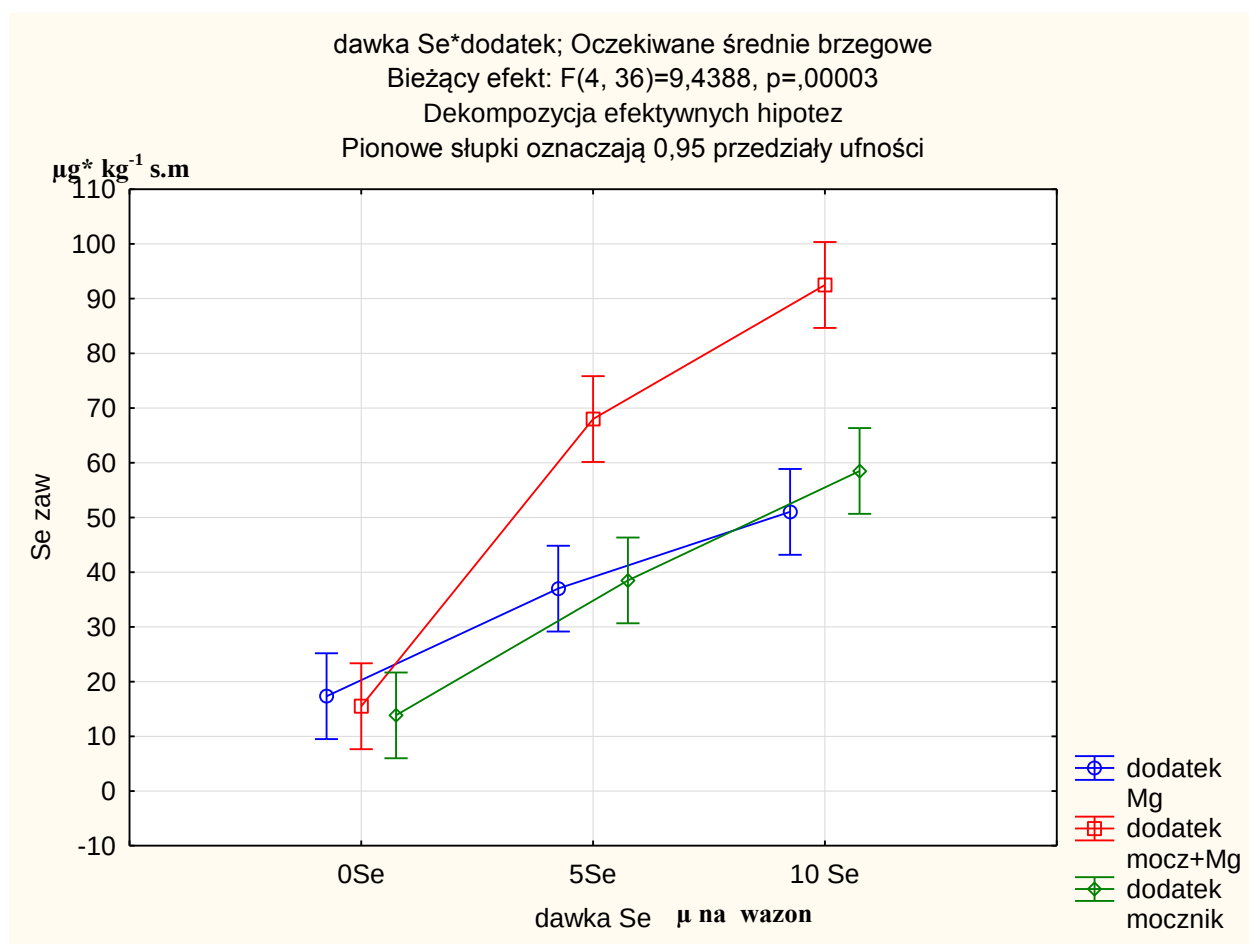


Fig. 20 Wpływ dodatku oraz dawki selenu na jego zawartość w nadziemnych częściach kukurydzy

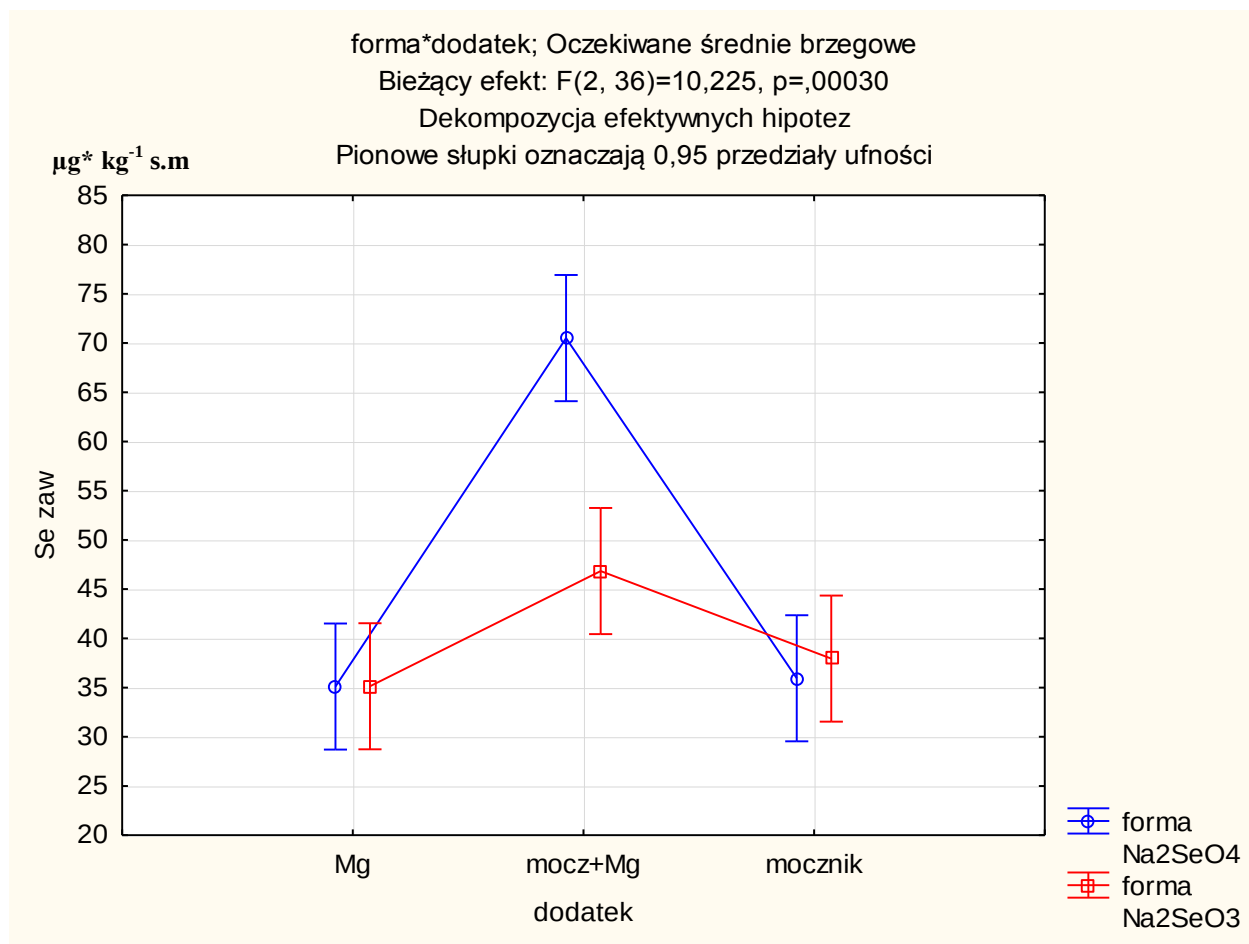


Fig. 21 Wpływ formy oraz dodatku na zawartość selenu w nadziemnych częściach kukurydzy

Analizując wielkość pobrania selenu przez kukurydzę można stwierdzić, iż wartość ta była zależna zarówno od dawki wprowadzonego Se, jego formy chemicznej, jak i rodzaju użytego dodatku przy nawożeniu dolistnym (fig. 22, tab. XII).

Zastosowane dolistne dokarmianie kukurydzy selenem istotnie zwiększyło pobranie tego mikroelementu przez rośliny testowe (tab. XII). Przy obydwu poziomach nawożenia zarówno selenianem (IV), jak i (VI) najmniej Se nagromadziła kukurydza dokarmiana tym pierwiastkiem łącznie z magnezem, a najwięcej po wprowadzeniu do cieczy roboczej mocznika i siarczanu magnezu.

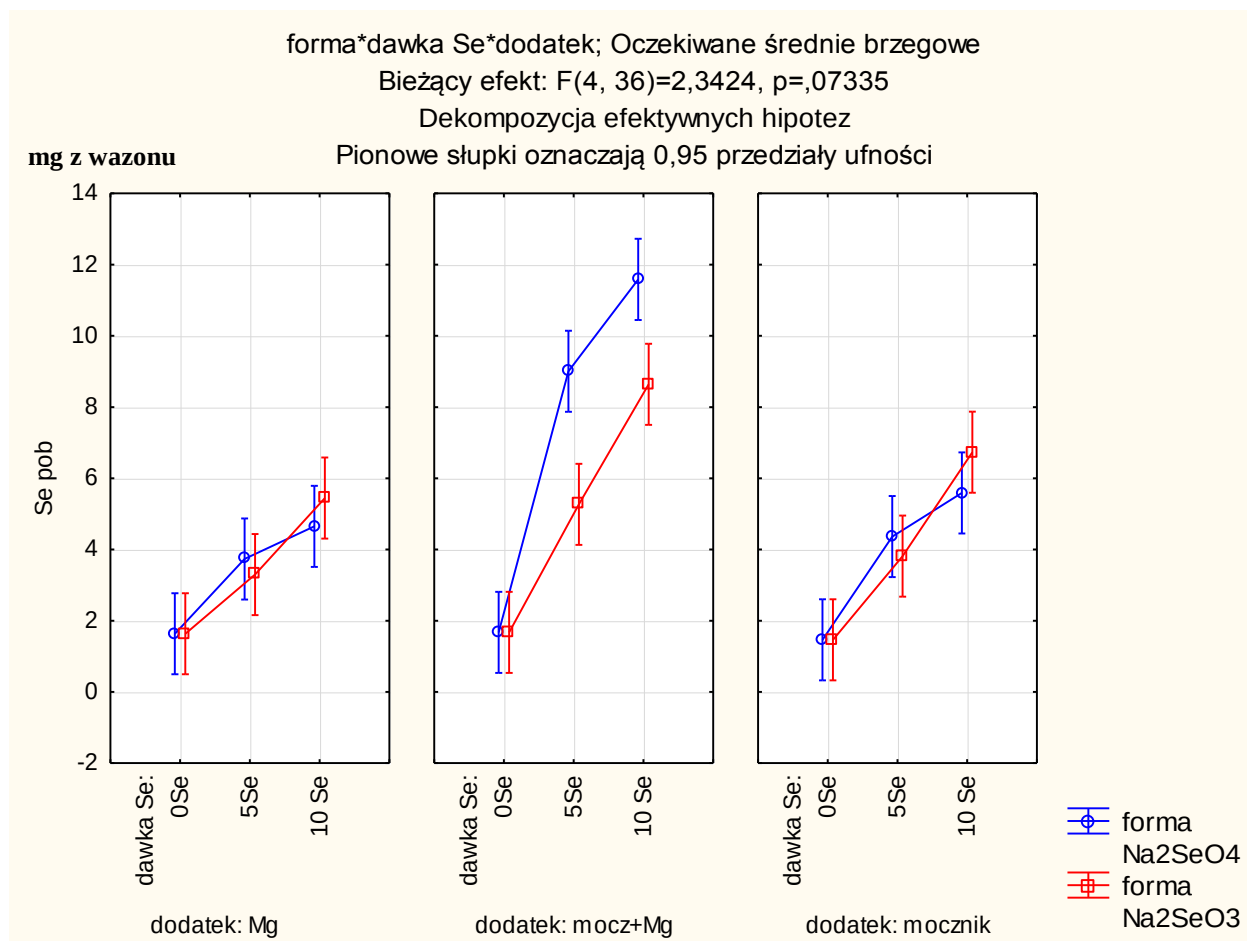


Fig. 22 Wpływ dodatku, formy oraz dawki selenu na jego pobranie przez nadziemne części kukurydzy

Zawartość makroskładników N, S, Mg

W badaniach własnych stwierdzono, iż na zawartość i pobranie azotu przez kukurydzę nie miała wpływu forma chemiczna zastosowanego selenu. Przy wszystkich poziomach dokarmiania roślin selenem najniższą zawartość azotu stwierdzono w roślinach, u których mikroelement ten był stosowany łącznie z magnezem (tab. 39), a najwyższym po łącznym zastosowaniu azotu i magnezu. Wyższa zawartość N w kukurydzy dokarmianej dawką 10 $\mu\text{g}/\text{wazon}$, niż stwierdzona przy niższym poziomie nawożenia, wskazuje na stymulujący wpływ tego mikroelementu na pobieranie azotu.

Tab.39 Zawartość oraz pobranie **azotu** przez suchą masę części nadziemnych kukurydzy

Dawka Se μgSe/ wazon	dodatek	Zawartość N g·kg ⁻¹ s.m		Pobranie N mg z wazonu	
		Na ₂ SeO ₃	Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃	Na ₂ SeO ₄
0	N	14,9		1,57	
	Mg	13,9		1,30	
	N + Mg	15,3		1,64	
5	N	15,1	15,2	1,60	1,61
	Mg	13,6	14,2	1,31	1,33
	N+ Mg	15,7	15,6	1,66	1,63
10	N	19,1	18,6	2,01	1,96
	Mg	14,6	15,0	1,47	1,45
	N + Mg	19,7	19,7	2,27	2,07
		średnia	NIR _{0,05}	średnia	NIR _{0,05}
dodatek	N	16,30		1,72	
	Mg	14,18	0,206	1,36	0,02
	N+Mg	16,88		1,81	
forma	Na ₂ SeO ₃	15,76	n.i.	1,62	n.i.
	Na ₂ SeO ₄	15,82		1,65	
dawka Se	O Se	14,71		1,50	
	5 Se	14,89	0,206	1,52	0,02
	10 Se	17,77		1,87	
NIR _{0,05} interakcja		0,505		0,104	

Nawożenie dolistne selenem wraz z dodatkami miało również wpływ na zawartość i pobranie **siarki** przez nadziemne części kukurydzy (tab. 40). Przy wszystkich poziomach dokarmiania roślin selenem najmniej siarki zawierała kukurydza nawożona mocznikiem, a najwięcej po łącznym zastosowaniu selenu z mocznikiem i siarczanem magnezu (tab. 40).

W porównaniu do roślin kontrolnych, wprowadzenie 5 i 10 μgSe/ wazon zarówno w postaci Na₂SeO₄, jak i Na₂SeO₃, spowodowało istotny wzrost zawartości oraz pobrania S u roślin dokarmionych mocznikiem.

Wprowadzenie selenu w dawce 5 μgSe/ wazon w obu postaciach chemicznych przy jednoczesnym nawożeniu dolistnym siarczanem magnezu spowodowało istotny spadek zawartości oraz pobrania siarki przez kukurydzę. Po zastosowaniu wyższej dawki (10 μgSe/

wazon) Se w postaci selenianu (IV) zawartość S kształtowała się na tym samym poziomie, co określona dla niższego poziomu nawożenia, natomiast po zastosowaniu selenianu (VI) była zbliżona do określonej dla roślin z obiektu kontrolnego.

W największym stopniu do wzrostu zawartości i pobrania siarki przyczyniło się dolistne zastosowanie 10 µgSe/wazon w postaci selenianu (VI) łącznie z dodatkiem mocznika i siarczanu magnezu.

Tab.40. Zawartość oraz pobranie **siarki** przez suchą masę części nadziemnych kukurydzy

Dawka Se µgSe/ wazon	dodatek	Zawartość S g·kg ⁻¹ s.m.		Pobranie S mg z wazonu	
		Na ₂ SeO ₃	Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃	Na ₂ SeO ₄
0	N	3,17		334	
	Mg	12,87		1206	
	N + Mg	12,62		1348	
5	N	5,17	4,92	548	523
	Mg	10,94	9,25	1057	904
	N+ Mg	10,56	14,53	1112	1497
10	N	4,17	6,58	439	694
	Mg	10,87	12,75	1095	1234
	N + Mg	12,62	15,25	1458	1498
		średnia	NIR _{0,05}	średnia	NIR _{0,05}
dodatek	N	4,53		479	
	Mg	11,59	0,62	1117	58
	N+Mg	13,03		1377	
forma	Na ₂ SeO ₃	9,22	0,50	955	48
	Na ₂ SeO ₄	10,22		1026	
dawka Se	O Se	9,55		962	
	5 Se	9,22	0,62	940	58
	10 Se	10,37		1070	
NIR _{0,05} interakcja		1,51		143	

Analizując zawartość **magnezu** w częściach nadziemnych roślin testowych można stwierdzić, że zastosowane dawki selenu zarówno w postaci selenianu (IV), jak i selenianu (VI) nie miały wpływu na zawartość i pobranie tego makroskładnika przez kukurydzę (tab. 41).

Wzrost zawartości Mg w kukurydzy dokarmianej Na_2SeO_4 z dodatkiem azotu i magnezu należy wiązać z oddziaływaniem tych dwóch makroskładników, bowiem nie stwierdzono zróżnicowania w zawartości magnezu pomiędzy dawką 5 i 10 $\mu\text{gSe/ wazon}$.

Tab.41 Zawartość oraz pobranie **magnezu** przez suchą masę części nadziemnych kukurydzy

Dawka Se $\mu\text{gSe/ wazon}$	dodatek	Zawartość Mg g kg^{-1} s.m.		Pobranie Mg mg z wazonu	
		Na_2SeO_3	Na_2SeO_4	Na_2SeO_3	Na_2SeO_4
0	N	1,46		154	
	Mg	1,94		182	
	N + Mg	1,84		197	
5	N	1,57	1,49	166	158
	Mg	2,03	1,83	195	172
	N+ Mg	1,88	2,21	208	231
10	N	1,47	1,56	155	164
	Mg	1,87	1,89	188	183
	N + Mg	2,04	2,25	236	237
		średnia	$\text{NIR}_{0,05}$	średnia	$\text{NIR}_{0,05}$
dodatek	N	1,50		158,7	
	Mg	1,92	0,09	183,8	8,81
	N+Mg	2,01		217,7	
forma	Na_2SeO_3	1,79	n.i.	186,9	n.i.
	Na_2SeO_4	1,83		186,6	
dawka Se	O Se	1,75		177,8	
	5 Se	1,84	0,09	188,6	
	10 Se	1,85		193,8	
$\text{NIR}_{0,05}$ interakcja		0,21		21,6	

Przeprowadzona analiza statystyczna wykazała, iż selen wprowadzony w tylko postaci selenianu (IV) sodu wpłynął na zwiększenie plonowania kukurydzy (tab. 42). Pierwiastek wprowadzony w obu formach chemicznych był dodatnio skorelowany z zawartością i pobraniem azotu oraz pobraniem magnezu przez rośliny. Ilość siarki w nadziemnych częściach kukurydzy była zależna od zawartości i pobrania selenu przez rośliny nawiezione tylko formą Na_2SeO_4 .

Tab. 42 Współczynnik korelacji pomiędzy zawartością i pobraniem selenu a plonem, zawartością i pobraniem azotu, siarki i magnezu przez nadziemne części kukurydzy

	Zawartość		Pobranie	
	Na ₂ SeO ₃	Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃	Na ₂ SeO ₄
plon	0,439	n.i.	0,518	n.i.
N	0,722	0,675	0,740	0,636
S	n.i.	0,475	n.i.	0,469
Mg	n.i.	0,624	0,434	0,705

różnice istotne p<0,05

n.i.- różnice nieistotne

IV. Dyskusja

Selen należy do grupy pierwiastków niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania organizmów zwierzęcych i ludzi. Jego niedobór w żywieniu zwierząt może doprowadzić do wystąpienia wielu groźnych schorzeń, takich jak: pokarmowa dystrofia mięśni [Gupta i Gupta, 2002; McDowell i in., 2002; Nielsen, 2004], zwyrodnienie wątroby, degeneracja mięśnia sercowego u świń, skaza wysiękowa u kurcząt [Gissel-Nielsen i in., 1984; Dębski, 1992; Wierzbička i in., 2007], wystąpienie komplikacji okołoporodowych [Sembratowicz i Grela, 1997; McDowell i in., 2002].

Badania prowadzone w Polsce w ostatnich latach wykazały znaczny udział gleb charakteryzujących się niską zawartością tego pierwiastka [Piotrowska 1984, Zabłocki 1991, Dębski 1992, Trafikowska 1992, Bożek 1997, Trafikowska i Kuczyńska 2000, Borowska i Koper 2000, 2006, 2007, 2008, 2011, Skoczyliński i Patorczyk-Pytlik 2006, Patorczyk-Pytlik i Kulczycki 2009]. Dodatkową przyczyną słabego pobierania tego mikroelementu przez rośliny będzie ich znaczne zakwaszenie [Eich-Geatorex i in. 2007, Dhillon i in. 2005, Butterman i Brown 2004, White i in. 2004, Gupta i Gupta 2002, Zabłocki 1991, Johnsson 1991, Ylaranta 1983].

W literaturze poświęconej optymalnej, z punktu widzenia jakości uzyskiwanych pasz, zawartości selenu w glebach podawane są różne wartości. Według Gupty i Gupty [2002] dopiero zawartość na poziomie $0,6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ gwarantuje produkcję pasz pokrywających zapotrzebowanie zwierząt na ten pierwiastek. Liczby graniczne podawane przez Tana [Hawkesford i Zhao, 2007] wskazują, że zawartość w glebie niższą niż $0,125 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ należy uznać za deficytową, $0,125\text{-}0,175 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ za marginalną (ang. *marginal*), $0,175\text{-}3,0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ za średnio-wysoką, a powyżej $3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ za nadmierną. W odniesieniu do tych wartości gleby wykorzystane do przeprowadzenia badań polowych wykazywały: piasek gliniasty mocny (kompleks żytni IVa) niską zawartość, a glina lekka (kompleks pszenno-butyński II) zawartość średnią. Głina lekka użyta do przeprowadzenia wegetacyjnych doświadczeń wazonowych charakteryzowała się niską zawartością selenu. Określone w badaniach własnych wartości były niższe niż podawane przez Piotrowską [1984] oraz Patorczyk-Pytlik i Kulczyckiego [2009] zarówno dla piasków gliniastych, jak i dla gliny lekkiej. Tak niska zawartość selenu w glebach była przyczyną stwierdzanej bardzo niskiej zawartości tego pierwiastka w kukurydzy z badań polowych, jak również zebranej z gleb kontrolnych w prowadzonych doświadczeniach wazonowych.

Selen nie należy do grupy pierwiastków niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania większości gatunków roślin [Zhu i in. 2009, Cartes i in. 2005, Hartikainen 2005, Terry i in. 2000]. Wykazany został jedynie udział tego pierwiastka w metabolizmie roślin zaliczanych do jego akumulatorów [Broyer i in. 1972].

W wielu badaniach stwierdzono, iż pierwiastek ten stosowany w niskich dawkach ($0,1-1,0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) korzystnie wpływa na wzrost i rozwój roślin. To oddziaływanie może wynikać z wpływu selenu na aktywność GSH-Px [Ramos i in. 2010, Hawrylak i Szymańska 2007, Hartikainen i in. 2000], zwiększenie odporności na stres wywołany zasoleniem [Hawrylak 2007], promieniowaniem UV [Germ i in. 2005, Xue i in. 2001, Hartikainen i in. 2000], suszą [Qiang-yun i in. 2008]. Pod wpływem dodatku selenu Rios i in. [2008] stwierdzili wzrost zawartości aminokwasów i białek w liściach sałaty, a Hawrylak-Nowak [2008c] zwiększenie zawartości antocyjanów i związków fenolowych w bazylii.

To korzystne oddziaływanie selenu na metabolizm roślin znajduje odzwierciedlenie w ich plonowaniu. W badaniach własnych stwierdzono, iż selen wpływał na plonowanie kukurydzy, a wielkość tego wpływu uzależniona była od zasobności gleb w ten pierwiastek, formy chemicznej, w jakiej został wprowadzony, fazy rozwojowej oraz właściwości odmianowych tego gatunku roślin. Dhillon i Dhillon [2009] podają, iż w warunkach uprawy roślin na glebach o niskiej zawartości selenu różnice w reakcji pomiędzy gatunkami są niewielkie. Zaznaczają się dopiero po wzbogaceniu gleb w ten składnik. Badania własne wykazały, że będą miały wpływ również właściwości odmianowe.

Brak wpływu nawożenia selenem zastosowanym w postaci Na_2SeO_4 w dawkach $0,1$ i $0,2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ na ilość zebranej w fazie BBCH 70 (rozwój ziarniaków) masy stwierdzono u takich odmian jak: Lober, Bielik i Bejm. Ograniczający plonowanie wpływ wyższej dawki Se ($0,2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) wystąpił u odmiany Tur, a pozytywny przy obydwu poziomach nawożenia u kukurydzy odmiany Wilga. W wielu badaniach autorzy wykazali, że selen stosowany w niskich dawkach korzystnie wpływał na wzrost roślin, natomiast wyższe dawki powodowały zaburzenie ich rozwoju. Stymulujący wpływ niskich dawek Se na plon rajgrasu stwierdzili Hartikainen i in. [2000], Rios i in. [2009] dla sałaty, Turakainen i in. [2004] dla ziemniaków, Patorczyk-Pytlik i Zimoch [2011] dla lucerny. W innych badaniach autorzy nie stwierdzili zmian w plonowaniu pod wpływem zastosowanych dawek Se. Brak wpływu nawożenia selenem na plonowanie pszenicy wykazali Broadley i in. [2010], Duscey i in. [2007], Curtin i in. [2008], Grant i in. [2007], a na ilość suchej masy kukurydzy Shanker i Srivastava [2001].

Wpływ selenu na plonowanie roślin zależny był nie tylko od właściwości odmianowych, ale również od fazy rozwojowej kukurydzy. Porównując reakcję odmiany

Lober i Bielik na nawożenie selenem w kolejnych fazach rozwojowych roślin stwierdzono, iż pierwiastek ten wpływał na wzrost plonowania kukurydzy odmiany Lober. Najsilniejsze plonotwórcze jego działanie ujawniło się u roślin młodych. W fazie BBCH 16, 19 i 51 wraz ze wzrostem dawki zastosowanego selenu zwiększała się ilość zebranej masy. W ostatniej z uwzględnionych w badaniach faz (BBCH 70) pod wpływem selenu nastąpił wzrost ilości uzyskanej masy, ale była to różnica nieudowodniona statystycznie. Natomiast w przypadku odmiany Bielik w ciągu całego okresu prowadzenia badań brak było wpływu zastosowanych dawek Se na jej plonowanie.

Hartikainen i in. [2000] w uprawie rajgrasu stwierdzili, iż wpływ wielkości zastosowanej dawki selenu na plonowanie roślin był uwarunkowany czasem uprawy. Dla pierwszego pokosu trawy większy plon autorzy ci stwierdzili po nawiezieniu gleb dawką $0,1 \text{ mgSe} \cdot \text{kg}^{-1}$, niż określony dla roślin kontrolnych. W II terminie zbioru roślin większy wpływ na wzrost plonu rajgrasu miała dawka $1,0 \text{ mgSe} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Na wielkość uzyskanego plonu kukurydzy może mieć wpływ również forma chemiczna, w jakiej selen został wprowadzony do gleby. W badaniach własnych wykazano, iż niezależnie od dawki zastosowanego Se biomasa roślin uprawianych na glebie z dodatkiem selenianu (VI) była istotnie wyższa, niż uzyskana po zastosowaniu selenianu (IV). Zastosowanie tego pierwiastka w postaci Na_2SeO_4 nie ograniczało wzrostu roślin, a plon kukurydzy uprawianej na glebie nawiezionej dawką $0,25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ był nawet istotnie wyższy, niż określony dla roślin z obiektu kontrolnego. Odmierna była reakcja roślin testowych na wprowadzony do gleby selenian (IV). W porównaniu do masy kukurydzy zebranej z gleby kontrolnej dodatek selenu w dawkach $0,1$ oraz $0,25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ w formie Na_2SeO_3 nie zmienił ilości wytworzonej biomasy, natomiast zwiększenie ilości zastosowanego Se w tej postaci ograniczyło rozwój kukurydzy.

Wyższy plon sałaty pod wpływem nawożenia selenianem (VI) sodu, niż selenianem (IV) stwierdzili Ramos i in. [2010]. W badaniach przeprowadzonych przez Sharma i in. [2010] rzepak w fazie kwitnienia wytworzył więcej masy w warunkach jego uprawy na glebie z dodatkiem selenianu (IV), niż selenianu (VI). Również Cartes i in. [2005] stwierdzili, iż zastosowanie dawek do $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}\text{Se}$ w postaci selenianu (IV) nie miało wpływu na plon życicy trwałej, a po wprowadzeniu selenu w formie selenianu (VI) już dawka $2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ spowodowała zahamowanie wzrostu roślin.

Na zawartość selenu w roślinach ma wpływ wiele czynników takich, jak zasobność gleb w ten pierwiastek, ich właściwości fizykochemiczne [Johnsson 1991, Mikkelsen i in., 1987, Terry i in. 2000, White i in., 2004], gatunek i odmiana danej rośliny oraz jej stadium

rozwojowe [Borowska, 1996; Laser, 2004; Zabłocki, 1994; Patorczyk-Pytlik, 2009]. Zazwyczaj rośliny uprawne zawierają niewielkie ilości tego pierwiastka, najczęściej waha się ona w granicach od 0,006 do 0,3 mg·kg⁻¹ [Jurkowska, 1993; Terry i in., 2000]. Zboża należą do grupy roślin charakteryzujących się małą zdolnością do pobierania selenu, jednak w warunkach ich uprawy na glebach o wysokiej zasobności w ten składnik oraz dużej przyswajalności rośliny te mogą nagromadzać znaczne jego ilości [Hartikainen i in., 2000].

W badaniach własnych wykazano, iż zawartość selenu w ziarnie kukurydzy uprawianej w warunkach polowych na glebie o naturalnej zasobności w ten składnik była znacznie zróżnicowana i wahała się od 4,0 do 111,9 µg·kg⁻¹s.m. Są to wartości niższe, niż podane przez Sembratowicz i Grela [1997], według których zawartość Se w ziarnie kukurydzy wynosi 30-300 µg·kg⁻¹s.m. Uzyskane w badaniach własnych niższe wartości mogą być związane z niską naturalną zasobnością gleb w ten pierwiastek. Zabłocki [1991] stwierdził, iż niska zawartość tego pierwiastka w glebach dawnego województwa szczecińskiego (0,123 mgSe·kg⁻¹) była powodem wystąpienia pokarmowej dystrofii u owiec z 21 owczarni położonych na badanym terenie.

Dzienne zapotrzebowanie zwierząt na selen wynosi 0,1- 0,3 mg·kg⁻¹s.m. i zależne jest od gatunku, wieku i kierunku użytkowania zwierzęcia [Preś i Kinal, 1996; Laser, 2004; Chałabis-Mazurek i in., 2008]. Stwierdzona w badaniach własnych średnia zawartość selenu w ziarnie 32 odmian kukurydzy nie spełniałaby wymaganych norm paszowych. Według wartości podawanych przez Tana, cytowanych przez Hawkesforda i Zhao [2007], zawartość w ziarnie niższą niż 25 µg·kg⁻¹s.m. należy uznać za deficytową, 25-40 µg·kg⁻¹s.m. jako niską, 40-1000 µg·kg⁻¹s.m. za średnią do wysokiej, a przy zawartości przekraczającej 1000 µg·kg⁻¹s.m. za nadmierną. Odnosząc uzyskane w badaniach własnych wartości do tych norm można stwierdzić, że spośród 32 ocenianych odmian obliczona średnia zawartość Se dla ziarna 13 odmian była deficytowa, 14 niska, a jedynie dla 5 średnia.

Na zawartość Se w ziarnie kukurydzy miała wpływ zarówno kategoria agronomiczna gleb, jak i właściwości odmianowe. Średnia zawartość tego pierwiastka w ziarnie kukurydzy zebranej z gliny lekkiej (kl. II) była około dwukrotnie większa, niż określona u roślin uprawianych na piasku gliniastym mocnym (kl. II). Wyższą zawartość selenu w lucernie i gorczycy uprawianych na glebie średniej, niż na lekkiej, stwierdzono również we wcześniejszych badaniach [Zimoch i Patorczyk-Pytlik, 2009, Patorczyk-Pytlik i Zimoch, 2011]. Odmiany Maksym, Tur, Bielik i Bejm zawierały istotnie więcej selenu w ziarnie, niż pozostałe mieszańce, a najmniej (średnia < 15 µg·kg⁻¹s.m.) Bosman, Wigo, Smh 220.

Porównując średnie zawartości Se w ziarnie trzech klas wczesności można je uszeregować w kolejności malejącej: FAO 230-240 > FAO do 230 > FAO > 240.

Zawartość selenu nie tylko w ziarnie, ale również w nadziemnych częściach kukurydzy uprawianej w warunkach polowych na glebie o naturalnej zasobności w Se zależała zarówno od kategorii agronomicznej podłoża, jak i od właściwości odmianowych oraz ich fazy rozwojowej roślin. W ciągu całego okresu rozwoju wegetatywnego wyższą średnią zawartością Se charakteryzowały się rośliny uprawiane na glebie klasy II, niż IV. W warunkach uprawy na glebie średniej różnice w zawartości Se w zależności od klasy wczesności były znacznie większe, niż określone dla klasy IVa. Najwyższą zawartością selenu charakteryzowały się rośliny młode- sprzątane w fazie 3-go liścia (BBCH 13). Wraz z rozwojem roślin zawartość tego mikroskładnika zmniejszała się, co jest związane z wystąpieniem efektu rozcieńczenia na wskutek intensywnego przyrostu masy. Podobne zależności stwierdzono w warunkach wazonowego doświadczenia wegetacyjnego. Najwyższą średnią zawartością selenu charakteryzowały się rośliny zebrane we wczesnej fazie rozwojowej (6-go liścia; BBCH 16), ale nawet w tej fazie żadna z ocenianych odmian uprawiana na glebie o naturalnej zasobności tego pierwiastka nie osiągnęła zawartości Se zbliżonej do $100 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$ - ilości minimalnej potrzebnej do pokrycia zapotrzebowania zwierząt na ten składnik. Podobne zależności, jak określone w badaniach własnych, Jin [2003] stwierdził w uprawie soi, u której zawartość tego pierwiastka malała w miarę wzrostu roślin: siewka > kwitnienie > dojrzałość.

Uzyskane wyniki badań wykazały, iż kukurydza uprawiana na glebie o naturalnej zasobności w selen zawierała bardzo mało tego pierwiastka, z punktu widzenia żywienia zwierząt. Wyniki te wskazują, iż podstawowe nawożenie kukurydzy powinno być wzbogacane dodatkiem selenowym, co pozwoliłoby zwiększyć podaż tego mikroskładnika w żywieniu zwierząt.

W badaniach własnych oceniono wpływ nawożenia selenem w zależności od wielkości dawki, formy chemicznej tego pierwiastka oraz metody aplikacji nawozu na możliwość wzbogacania kukurydzy w ten składnik.

Przeprowadzone badania potwierdziły dużą zdolność kukurydzy do nagromadzania selenu w warunkach jej uprawy na glebach wykazujących wysoką jego zawartość. Po wprowadzeniu do gleby $4 \text{ mgSe}\cdot\text{kg}^{-1}$ w formie selenianu (IV) wzrosła ona z $0,095 \text{ mgSe}\cdot\text{kg}^{-1}$ (obiekt kontrolny) do $1,774 \text{ mgSe}\cdot\text{kg}^{-1}$, a w wyniku dodania selenianu (VI) aż do $20,649 \text{ mgSe}\cdot\text{kg}^{-1}$. W pierwszym przypadku była to wartość tylko nieco niższa, niż górna tolerowana

zawartość w paszach dla bydła i trzody chlewnej, natomiast w kukurydzy zebranej z gleby z dodatkiem selenianu (VI) była to już zawartość toksyczna.

Porównując wpływ selenu wprowadzonego do gleby w postaci Na_2SeO_3 i Na_2SeO_4 można stwierdzić, iż po zastosowaniu selenianu (VI) średnia zawartość Se w nadziemnych częściach roślin była prawie 13 razy wyższa, a pobranie tego składnika 14 razy większe, niż określone średnie dla kukurydzy nawiezionej selenianem (IV). Podobną zależność wykazali również inni autorzy. Ylänta [1984a] stwierdził, że zawartość selenu w ziarnie pszenicy i jęczmienia uprawianych na glebie z dodatkiem selenianu (IV) była o blisko 75% niższa, niż po wprowadzeniu analogicznej dawki selenianu (VI). Podobne zależności dla sałaty głowiastej i szpinaku stwierdziły Hawrylak i Szymańska [2005]. W badaniach przeprowadzonych przez Cartesa i in. [2005] z życicą trwałą jako rośliną testową, po zastosowaniu $0,1 \text{ mgSe}\cdot\text{kg}^{-1}$ zawartość tego mikroelementu zwiększyła się z $0,07 \text{ mgSe}\cdot\text{kg}^{-1}$ do $5,72 \text{ mgSe}\cdot\text{kg}^{-1}$, a po wprowadzeniu $10 \text{ mgSe}\cdot\text{kg}^{-1}$ autorzy ci stwierdzili zawartość Se na poziomie $247 \text{ mgSe}\cdot\text{kg}^{-1}$. Dla roślin zebranych z gleb wzbogaconych w selen zastosowany w postaci selenianu (IV) wartości te wynosiły odpowiednio dla dawek $0,28 \text{ mgSe}\cdot\text{kg}^{-1}$ i $4,17 \text{ mgSe}\cdot\text{kg}^{-1}$. Znacznie większy wzrost zawartości tego pierwiastka po zastosowaniu SeO_4 , niż SeO_3 stwierdzili również Kovalevich i in. [2007] u kukurydzy i prosa, Sharma i in. [2010] dla rzepaku, Zayed i in. [1998] dla części nadziemnych gorczycy, brokułów, buraków cukrowych, a także ryżu oraz Ramos i in. [2010] u sałaty. Natomiast selenian (IV) był lepszym źródłem selenu, niż selenian (VI) u barwinka różowego (*Catharanthus roseus*), ale jest to roślina zaliczana do grupy akumulatorów tego pierwiastka [Arvy i in., 1995].

Przyczyną słabszego pobierania selenianu (IV), niż selenianu (VI) może być silna absorpcja tej formy w glebie [Eich-Greatorex i in., 2010, Dhillon i Dhillon, 2000, Barrow i Whelan, 1989]. Hawkesford i Zhao [2007] podają, iż seleniany (VI) charakteryzują się większą rozpuszczalnością i mobilnością w glebie, niż seleniany (IV), są bardziej dostępne dla roślin, ale jednocześnie są bardziej podatne na wymywanie w głąb profilu glebowego. Dodatkowo selenian (IV) jest gromadzony w roślinach głównie w korzeniach, natomiast selenian (VI) jest szybko transportowany do części nadziemnych [Hopper i Parker, 1999; Terry i in. 2000]. Hawrylak i Szymańska [2005] stwierdziły, iż zawartość selenu w liściach sałaty i szpinaku była wyższa po dodaniu selenianu (VI), niż (IV). Arvy [1993] badając transport selenu w fasoli stwierdził, iż w ciągu trzech godzin połowa selenianu (VI) przetransportowana została do części nadziemnych, a selenian (IV) został zatrzymany w korzeniach.

Wyniki uzyskane w badaniach własnych wskazują, iż z punktu widzenia żywienia zwierząt bezpieczniejszą formą chemiczną wzbogacania kukurydzy w selen jest selenian (IV), gdyż wzrastające dawki Se w glebie nie powodowały aż tak znacznych przyrostów zawartości tego składnika w tkankach roślin, jak w przypadku selenianu (VI). Nawożenie kukurydzy formą Na_2SeO_3 w dawkach 0,1 - 0,5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ gleby zapewniłoby produkcję paszy pokrywającej dzienne zapotrzebowanie zwierząt na ten mikroelement. Przy wykorzystaniu do nawożenia Na_2SeO_4 dawka powinna być niższa niż 0,100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ gleby.

W celu porównania wpływu metody aplikacji nawozu selenowego pod względem możliwości wzbogacania kukurydzy w ten pierwiastek, zastosowano ten składnik również dolistnie, przy czym nawożenie to uzupełniono również w azot i magnez. Stwierdzono, iż w nawożeniu dolistnym wyższą zawartością Se charakteryzowały się rośliny nawiezione selenianem (VI), niż selenianem (IV). Podobną zależność stwierdziła Hawrylak-Nowak [2008c] w nawożeniu dolistnym bazylii (*Ocimum basilicum* L.) oraz Kápola i in. [2009] u marchwi.

Porównując wpływ zastosowanego dodatku azotu, magnezu lub obu tych pierwiastków w nawożeniu dolistnym selenem można stwierdzić, iż zastosowanie jednocześnie mocznika oraz siarczanu magnezu było najskuteczniejszą metodą wzbogacania kukurydzy w ten mikroskładnik. Jednak tylko w przypadku roślin nawiezionych selenianem (VI) sodu zastosowanego w dawce 10 $\mu\text{g}\cdot\text{Se}/\text{wazon}$ z dodatkiem N + Mg uzyskano zawartość Se (110 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m), która pokryłaby dzienne zapotrzebowanie zwierząt na ten składnik. Laser [2007] stwierdził, iż aplikacja azotu wraz z nawożeniem Se może wpłynąć na zwiększenie zawartości tego mikroskładnika w nadziemnych częściach roślin uprawianych na pastwisku, ale zależność ta była uwarunkowana zarówno długością uprawy, jak i czynnikami glebowymi. Natomiast Hu i in. [2010] wykazali, iż azot stosowany równocześnie z selenem, może blokować pobieranie selenianów (IV) przez korzenie oraz nadziemne części ryżu.

Obecność selenu w glebie może różnicować pobieranie innych składników przez kukurydzę, z tym że mogą to być reakcje zarówno antagonizmu, jak i synergizmu jonowego [Filek i in. 2010, Feng i in. 2009, Hawrylak-Nowak 2008]. W badaniach własnych stwierdzono, iż selen wpływał na skład chemiczny części nadziemnych kukurydzy.

Przeprowadzone badania wykazały, iż wprowadzenie selenu do gleby miało ujemny wpływ zarówno na zawartość, jak i pobieranie azotu przez kukurydzę, przy czym stwierdzono, iż selenian (IV) znacznie silniej ograniczał nagromadzenie tego makroelementu, niż selenian (VI). Spadek zawartości N w gorczycy pod wpływem wzrastających dawek Na_2SeO_3 stwierdził również Singh [1979].

Selen w glebie może wchodzić w reakcje antagonizmu oraz synergizmu jonowego z innymi pierwiastkami takimi, jak fosfor czy siarka. Carter i in. [1972] podają, iż selen i fosfor rywalizują ze sobą w niektórych reakcjach zachodzących w glebie. Stwierdzono, iż seleniany (IV) są pobierane przez rośliny za pomocą tych samych mechanizmów, co fosforany [Hope i Parker, 1999; Li i in., 2008, White i in., 2004].

W badaniach własnych zaobserwowano, iż zawartość i nagromadzanie fosforu zależało od formy i dawki selenu. Pierwiastek ten wprowadzony w postaci selenianu (IV) wpłynął istotnie na wzrost zawartości i pobrania P przez kukurydzę. Podobne zależności stwierdził Carter i in. [1972] u lucerny, Singh [1979] w gorczycy, Singh i Malhotra [1976] u koniczyny oraz Hawrylak-Nowak [2008b] w kukurydzy. Natomiast pod wpływem niższych dawek Se ($0,1\text{--}2,0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) zastosowanych w postaci Na_2SeO_4 w roślinach zwiększała się ilość nagromadzonego fosforu. Dalsze zwiększanie stężenia tego pierwiastka w podłożu wpłynęło na zmniejszenie zawartości P, w porównaniu do określonej dla roślin kontrolnych. Spadek zawartości fosforu pod wpływem wzrostu ilości selenianu (VI) stwierdzili Kopsell i in. [2000] w kapuście warzywnej, a także Filek i in. [2010] w rzepaku.

Na zawartość oraz pobranie selenu przez kukurydzę może mieć wpływ nawożenie doglebowe siarką. Wraz ze wzrostem dawki wprowadzanego do gleby makroelementu zwiększała się ilość selenu w nadziemnych częściach kukurydzy. Natomiast pod wpływem najwyższej dawki siarki ($0,12\text{ gS}\cdot\text{kg}^{-1}$) wystąpił antagonizm pomiędzy S i Se, stwierdzono bowiem istotny spadek zawartości selenu w kukurydzy w porównaniu do ilości określonych u roślin uprawianych na glebie z dodatkiem $0,09\text{ gS}\cdot\text{kg}^{-1}$

W pracach poświęconych zagadnieniu wpływu siarki na pobieranie selenu autorzy podkreślają, że o wystąpieniu reakcji synergizmu bądź antagonizmu jonowego pomiędzy tymi pierwiastkami decyduje stosunek ich zawartości w glebie/pożywce oraz forma chemiczna, w jakiej selen został wprowadzony. Zayed i in. [1998] podają, że wprowadzenie do gleby siarczanów ogranicza nagromadzanie przez rośliny selenu z formy selenianu (VI), ma natomiast niewielki wpływ na pobieranie tego mikroelementu z formy selenianu (IV).

Hartikainen [2000], Terry i in. [2000] oraz Mikkelsen i in. [1989a] podają, iż rośliny wykazujące większe zapotrzebowanie na siarkę mogą zawierać równocześnie więcej selenu. W badaniach własnych odmiana Bielik charakteryzowała się wyższą zawartością S i Se, niż odmiana Lober.

O tym, który z jonów SeO_4^{2-} czy SO_4^{2-} zostanie pobrany decyduje stosunek obu pierwiastków w glebie. Przy stosunku Se: S równym 1:1 Kopsell i Randle [1997] wykazali, iż pobieranie i transport SO_4^{2-} i SeO_4^{2-} w cebuli miało charakter antagonizmu jonowego. Jeśli

natomiast stosunek ten wynosił 250-500:1, dodatek selenu powodował zwiększenie intensywności pobierania SO_4^{2-} . Badając w kulturach wodnych reakcje synergizmu/antagonizmu jonowego pomiędzy siarką i selenem u jęczmienia Ferrari i Renosto [1972] stwierdzili, że transport obu anionów z podłoża przez korzenie roślin przebiega na stałym poziomie, gdy stosunek S-Se wynosi 1,4:1.

W przeprowadzonych badaniach własnych stosunek S:Se w glebie był bardzo szeroki i kształtował się na poziomie 2168:1. Wprowadzone dawki selenu spowodowały znaczne zawężenie tej wartości i w glebie wzbogaconej w Se w dawce $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ wynosił on już tylko 75:1.

Selen wprowadzony w postaci selenianu (IV) silniej ograniczał nagromadzanie siarki przez nadziemne części roślin, niż selenian (VI). Porównując zmiany w zawartości siarki w częściach nadziemnych kukurydzy uprawianej na glebie nawiezionej selenianem (VI) można stwierdzić, że w porównaniu do roślin zebranych z gleby kontrolnej wraz ze wzrostem dawki Se do $0,5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ spadała zawartość tego makroskładnika. Po wprowadzeniu do gleby $0,75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ i $1,0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ zawartość Se była wyższa niż, określona dla roślin zebranych z gleby z dodatkiem $0,5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, ale istotnie niższa, niż oznaczona w kukurydzy zebranej z obiektu kontrolnego. Dopiero pod wpływem zwiększenia stężenia selenu w podłożu do poziomu 2,0; 3,0 i $4,0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ nastąpił wzrost zawartości oraz pobrania siarki przez nadziemne części kukurydzy. Odmienną reakcję zaobserwowano u kukurydzy nawiezionej selenem w formie Na_2SeO_3 . Wprowadzenie dawki $0,1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ spowodowało istotny wzrost zawartości oraz pobrania siarki przez rośliny w porównaniu do uprawianych na obiekcie kontrolnym. Przy dalszym wzroście dawek Se od 0,25 do $2,0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ zaobserwowano ograniczanie pobierania oraz istotne zmniejszenie się zawartości siarki w nadziemnych częściach kukurydzy.

Wzrost zawartości siarki w nadziemnych częściach kukurydzy pod wpływem zwiększania się dawki selenu w pożywce stwierdzili Huang i in. [2008]. Reakcje antagonistyczne pomiędzy Se i S wykazali Singh i in. [1980] w kapuście sitowatej, White i in. [2004] u roślin z rodzaju *Arabidopsis*, Hawrylak-Nowak [2008a] w korzeniach i pędach pomidora, White i in. [2007] w roślinach okrytonasiennych. Pod wpływem SeO_4^{2-} wzrosła zawartość S w bulwach cebuli („Granex 33”), natomiast zmalała w korzeniach roślin [Kopsell i Randle, 1997].

Relacje pomiędzy siarką i selenem w glebie oceniono również w doświadczeniu IV, którego celem było zbadanie wpływu zwiększających się dawek siarki przy jednakowej ilości selenu w glebie na plonowanie i skład chemiczny roślin. W badaniach własnych stwierdzono, iż równoczesne nawożenie Se i S może obniżyć plonowanie kukurydzy w porównaniu do

roślin uprawianych tylko z dodatkiem $0,1 \text{ mgSe} \cdot \text{kg}^{-1}$, bowiem wraz ze wzrostem dawki siarki następował spadek masy zarówno odmiany Lober, jak i Bielik. Wzbogacenie gleby w oba pierwiastki miało również wpływ na gromadzenie siarki w roślinach, a zróżnicowanie to było zależne od dawki S oraz właściwości odmianowej kukurydzy. Wraz ze wzrostem poziomu nawożenia siarką zwiększyła się zawartość siarki ogólnej oraz jej siarczanowej formy u obu odmian kukurydzy, z tym że wzrost u odmiany Bielik był istotnie większy, niż u Lober. Analiza statystyczna wykazała, iż ilość siarki była dodatnio skorelowana z zawartością Se w tkankach roślin. Pobranie selenu przez kukurydzę było również dodatnio skorelowane z pobraniem siarki ogólnej u obu mieszańców, a także z nagromadzeniem S-SO_4 u kukurydzy odmiany Lober.

Selen może wpływać na gromadzenie potasu przez nadziemne części roślin, a jego ograniczający wpływ zależy zarówno od ilości wprowadzonego Se, jak i zastosowanej formy tego pierwiastka. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, iż zawartość potasu w roślinach zebranych z gleb, do których wprowadzono $0,1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $0,25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ i $0,5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ w formie Na_2SeO_3 była niższa, niż oznaczona w roślinach z gleby kontrolnej, ale istotnie większa, niż w kukurydzy uprawianej na analogicznych dawkach Se zastosowanym w postaci Na_2SeO_4 . Przy wyższych poziomach nawożenia tym mikroelementem brak było wpływu formy chemicznej wprowadzonego selenu na zawartość potasu. Hawrylak-Nowak [2008b] również stwierdziła spadek K pod wpływem zastosowania Se w tej formie u kukurydzy, natomiast wzrost zaobserwowali Wang i in. [2006] u marchwi, Kopsell i in. [2000] w kapuście warzywnej, Kita i Pazurkiewicz-Kocot [2007] w różnych organach siewek kukurydzy, a w szczególności w korzeniach. W innych badaniach autorzy ci [2006] stwierdzili, iż akumulacja potasu w liściach kukurydzy wykazuje tendencje wzrostowe pod wpływem Se w szóstym dniu i spadek w siódmym dniu hodowli.

W zależności od formy oraz dawki zastosowanego selenu zmieniała się zawartość i pobranie wapnia, magnezu oraz sodu przez badane rośliny. Wyższą średnią zawartością oraz pobraniem wapnia oraz sodu charakteryzowały się rośliny uprawiane na glebie z dodatkiem selenianu (IV), niż selenianu (VI). W porównaniu do zawartości określonej w roślinach kontrolnych jedynie w kukurydzy zebranej z gleby wzbogaconej w selen wprowadzony w postaci Na_2SeO_4 w dawce $0,1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ oraz w postaci Na_2SeO_3 w dawce Se $0,25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ nastąpił wzrost zarówno zawartości, jak i pobrania wapnia. Wraz ze wzrostem dawki selenu zwiększała się zawartość i pobranie magnezu oraz sodu w nadziemnych częściach kukurydzy, przy czym wyższą średnią zawartością i pobraniem Na charakteryzowały się rośliny uprawiane z dodatkiem Na_2SeO_3 . Forma chemiczna selenu nie miała wpływu na zawartość

Mg w kukurydzy, natomiast większym jego pobraniem charakteryzowały się rośliny nawiezione Na_2SeO_4 .

Zwiększenie zawartości wapnia pod wpływem selenu stwierdzili także inni autorzy: Hawrylak-Nowak [2008b] w kukurydzy, a Wang i in. [2000] u marchwi. Spadek zawartości Ca i Na w siewkach kukurydzy pod wpływem selenu wykazali Kita i Pazurkiewicz-Kocot [2007]. Feng i in. [2009] podają, iż zawartość Ca i Mg w częściach nadziemnych paproci uprawianej na glebie z dodatkiem Se spadała wraz ze wzrostem dawki tego mikroelementu. Podobne zależności stwierdzili Filek i in. [2010] u rzepaku uprawianego na pożywcę wodnej z dodatkiem selenianu (VI) sodu, a nie zaobserwowali wpływu Se na zawartość Ca i Mg u uprawianej w tych warunkach pszenicy. Modyfikacja przez selen pobierania, transportu i akumulacji niektórych metali w roślinach być może jest wynikiem oddziaływania Se na błony komórkowe. Pierwiastek ten, w zależności od stężenia i czasu działania, może zmieniać przepuszczalność błon komórkowych dla niektórych jonów, wpływając w ten sposób na akumulację pierwiastków w tkankach roślin [Kita i Pazurkiewicz-Kocot, 2006].

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono również, iż selen może różnicować nagromadzanie przez kukurydzę takich pierwiastków, jak cynk, miedź, żelazo, mangan, czy nikiel. Wpływ selenu na zawartość i pobieranie mikroskładników było zależne zarówno od dawki wprowadzonego do gleby Se, jak i zastosowanej formy chemicznej tego pierwiastka. Wyższą średnią zawartością i średnim pobraniem Zn, Fe i Ni w porównaniu do roślin z obiektu kontrolnego charakteryzowała się kukurydza nawieziona selenianem (IV) sodu. Odminną reakcję zaobserwowano w przypadku manganu i miedzi, gdyż więcej tych pierwiastków zawierały rośliny uprawiane na glebie z dodatkiem selenianu (VI) sodu.

W literaturze niewiele jest prac poświęconych oddziaływaniem różnych form i dawek Se na zawartość mikroskładników w roślinach. Według Kity i Pazurkiewicz-Kocot [2006] selen ogranicza pobieranie metali śladowych, a zwłaszcza Mn, Zn, Cu i Cd. Autorzy ci stwierdzili zależność pomiędzy pobieraniem, dystrybucją i akumulacją cynku w roślinach kukurydzy, a obecnością selenu w środowisku zewnętrznym- jego formą i stężeniem. Podobne zależności stwierdzono w badaniach własnych, przy czym wpływ ten wystąpił jedynie po zastosowaniu selenianu (IV) sodu.

Na podstawie analizy statystycznej stwierdzono, iż zawartość Se w kukurydzy była ujemnie skorelowana z ilością i pobraniem Mn przez kukurydzę. Dodatnią korelację stwierdzono w przypadku zawartości Cu po zastosowaniu selenianu (IV) sodu oraz dla Fe u roślin uprawianych na glebie z dodatkiem selenianu (VI) sodu. Natomiast pobieranie selenu było ujemnie skorelowane z pobraniem żelaza i niklu u roślin nawiezionych Na_2SeO_3 , a także

z miedzią u kukurydzy uprawianej z dodatkiem Na_2SeO_4 . Dhillon i in. [2010] stwierdzili dodatnią korelację pomiędzy zawartością selenu w nadziemnych częściach kukurydzy, a zawartością manganu oraz żelaza, a ujemną dla cynku. Pozytywną korelację pomiędzy akumulacją Se, a nagromadzonym Mn, Zn, Ni oraz Co stwierdził Arvy [1992] u roślin *Helminthia echinoides*. Wyższą zawartość żelaza w koniczynie białej pod wpływem nawożenia selenem stwierdzili Wu i Huang [1991].

Zawartość całkowita selenu w glebie po zakończeniu doświadczenia była zależna zarówno od formy, jak i ilości wprowadzonej o mikroskładnika w glebie. Istotnie więcej Se zawierało podłoże, z dodatkiem selenianu (IV) sodu, co wynikać może ze znacznie mniejszego pobierania tego pierwiastka przez kukurydzę z tej formy chemicznej.

Przeprowadzone badania wykazały, że w czasie wegetacji kukurydzy zachodziły straty tego pierwiastka z wazonów. Ich wielkość zależała od ilości zastosowanego selenu, czasu, jaki upłynął od wykonania zabiegu nawożenia oraz odmiany kukurydzy. Bilans obliczony dla obiektów kontrolnych (bez nawożenia selenem) wykazał, że w ciągu pierwszych 19 dni wegetacji kukurydzy ilość selenu w wazonie zmniejszyła się, w zależności od uprawianej odmiany, o 6,9% do 13,9%. Ubytek tego pierwiastka na drodze pobierania przez rośliny wynosił jedynie 1 – 0,7%. Zastosowanie nawożenia selenianem (VI) przyczyniło się do zwiększenia ubytku ilości selenu w wazonie. Po 19 dniach od wschodów roślin ubyło, w zależności od uprawianej odmiany, 28-39% wyjściowej ilości Se. Powodem takiego zjawiska może być ulatnianie się lotnych form selenu. Wielu autorów podaje, iż selen pobrany przez roślin zostaje przekształcany lotne związki, takie jak dimetyloselenek (DMSe), dimetylo diselenek (DMDSe), a także inne organiczne związki tego pierwiastka [Lin i in. 1999, Zayed i in. 1998, Doran, 1982]. Proces ulatniania się selenu jest powiązany nie tylko z zawartością i formą występowania, Se, ale także gatunkiem roślin, rodzajem i bioaktywnością mikroorganizmów [Terry i in., 1992, Frankenberger, Karlson, 1994] oraz właściwościami glebowymi, jak pH, zawartością C-organicznego w glebie, temperaturą, wilgotnością, jej przewietrzeniem [Terry, Zayed, 1994, Zhang, Moore, 1997]. W badaniach Terry’ego i Zayed [1994] ulatnianie się selenu z brokułu było 4 razy szybsze z korzeni i 60% szybsze z nadziemnych częściach po zastosowaniu selenianu (IV), niż selenianu (VI). Intensywniej zachodzącą metylację prowadzącą do strat selenu pod wpływem selenianu (IV), niż (VI) u kapusty sitowatej stwierdzili De Souza i in. [1998]. Autorzy ci stwierdzili, iż rośliny uprawiane z dodatkiem selenianu (IV) gromadziły ten pierwiastek głównie w formie selenometioniny, natomiast wprowadzenie selenianu (VI) spowodowało akumulację SeO_4^{2-} .

Zayed i in. [1998] wykazali, że ulatnianie się selenu z korzeni brokułów, gorczycy, buraków cukrowych i ryżu uprawianych na pożywcę z dodatkiem Na_2SeO_4 zachodziło od 5 do 48 razy szybciej, niż z części nadziemnych tych roślin.

Badania własne potwierdziły, iż nawożenie selenem kukurydzy jest niezbędne do otrzymania roślin o wystarczającej, z punktu widzenia żywienia zwierząt, ilości selenu w nadziemnych częściach. Ze względu na wysoką zdolność tego gatunku do nagromadzania Se oraz na wpływ tego mikroskładnika na różnicowanie składu chemicznego roślin, nawożenie tym pierwiastkiem kukurydzy powinno być zawsze poprzedzone badaniami nad zasobnością gleby w Se. Powinna być również uwzględniana zdolność danej odmiany do nagromadzania tego mikroelementu.

V. Wnioski

1. Na zawartość selenu w ziarnie oraz nadziemnych częściach kukurydzy uprawianej w warunkach naturalnej zasobności gleb w ten pierwiastek miała wpływ zarówno kategoria agronomiczna gleby, jak i właściwości odmianowe roślin. Ilość nagromadzonego Se była wyższa u roślin uprawianych na glebie kl. II, niż IV, a wpływ klasy wczesności odmian przedstawiał się następująco: FAO 230-240 > FAO do 230 > FAO > 240.
2. Średnia zawartość selenu w ziarnie ($31,5 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$) oraz częściach nadziemnych ($29,4 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$ w fazie BBCH 67) badanych odmian kukurydzy uprawianych w warunkach naturalnej zasobności w ten pierwiastek była bardzo niska pod względem wartości paszowej.
3. Nawożenie selenem wpływało na plonowanie roślin. Niezależnie od wielkości dawki zastosowanego Se biomasa roślin uprawianych na glebie z dodatkiem selenianu (VI) była istotnie wyższa, niż uzyskana po zastosowaniu selenianu (IV).
4. Wraz ze wzrostem roślin zmniejszała się zawartość selenu w nadziemnych częściach kukurydzy- najwyższą średnią zawartością selenu charakteryzowały się rośliny zebrane we wczesnej fazie rozwojowej (6-go liścia; BBCH 16).
5. Ilość selenu pobrana dziennie przez jedną roślinę kukurydzy zależała od właściwości odmiany, jej fazy rozwojowej oraz ilości wprowadzonego selenu. U obu badanych odmian (Lober i Bielik) względna szybkość nagromadzania Se wzrastała w czasie osiągając maksimum w fazie 9-go liścia (BBCH 19). W ciągu kolejnych dni wegetacji wartość tego parametru nagromadzania uległa zmniejszeniu.
6. Nawożenie selenem wpływało na skład chemiczny roślin. Wpływ tego mikroskładnika na zawartość makro- i mikroskładników był zależny od dawki, formy chemicznej Se oraz relacji synergizmu/antagonizmu z innymi pierwiastkami w glebie.
7. Kukurydza należy do grupy roślin, które w określonych warunkach są zdolne do nagromadzania wysokich ilości tego pierwiastka w nadziemnych częściach. Bezpieczniejszą formą chemiczną selenu w nawożeniu roślin jest selenian (IV) sodu.
8. Przeprowadzone badania wykazały, że w czasie wegetacji kukurydzy zachodziły straty tego pierwiastka na drodze ulatniania się lotnych form Se. Ich wielkość zależała od ilości zastosowanego selenu, czasu, jaki upłynął od wykonania zabiegu nawożenia oraz odmiany kukurydzy.

9. Nawożenie roślin w dwóch wariantach: formą Na_2SeO_3 w dawkach $0,1-0,5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ zastosowanego doglebowo oraz Na_2SeO_4 w dawce $10 \text{ }\mu\text{gSe/ wazon}$ z dodatkiem mocznika i siarczanu magnezu zastosowanym dolistnie zwiększało zawartość selenu w kukurydzy w stopniu wystarczającym do pokrycia dziennego zapotrzebowania zwierząt na ten składnik.

VI. Wykaz literatury

- Anonim 1985. Liczby graniczne do wyceny zawartości w glebach makro- i mikroelementów. IUNiG, cz. I, ss.34;
- GUS 2011
- Aro A., Kumpulainen J., Alfthan G., Voshchenko A.V., Ivanov V.N. 1994. Factors affecting the selenium intake of people in Transbaikalian Russia. *Biol. Trace Elem. Res.*, 40: 277–285;
- Arvy M.P. 1989. Some factors influencing the uptake and distribution of selenite in the bean plant (*Phaseolus vulgaris*). *Plant and Soil*, 117: 129–133;
- Arvy M.P. 1992. Some aspects of selenium relationships in soil and plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 23, (13&14): 1397–1407;
- Arvy M.P. 1993. Selenate and selenite uptake and translocation in bean-plants (*Phaseolus vulgaris*). *J. Exp. Bot.*, 44: 1083–1087;
- Azaizeh H.A., Salhani N., Sebesvari Z., Emons H. 2003. The potential of rhizosphere microbes from constructed wetland to biomethylate selenium. *J. Environ. Qual.* 32:55-62.
- Azza A.M.M., Sahar, M.Z., Yassen A.A. 2010. Studies on the effect of selenium and organic residues on Chamomile (*Metrickaria chamomilla* L.) plants. *New York Science Journal*, 3(11): 158–164;
- Badora A. 2000. Selen pierwiastek znany i nieznan. *J. Elementol.*, 5(3): 214–221;
- Badora A. 2007. Wpływ selenu na ograniczanie toksyczności kadmu i jakość plonów roślin grochu siewnego. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 32: 57–60;
- Balistreri L.S., Chao T.T. 1990. Adsorption of selenium by amorphous iron oxyhydroxide and manganese dioxide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54, 3: 739–751, abstract;
- Bañuelos G.S., Mead R., Phene C.J., Meek D.W. 1990. Relations between phosphorus in drip irrigation water and selenium uptake by wild mustard. *J. of Environ.Sci. and Health, Part A*, vol.27: 283–297;
- Barrow N.J., Whelan B.R. 1989. Testing a mechanistic model. VIII. The effect of time and temperature of incubation on the sorption and subsequent desorption selenite and selenate by a soil. *J. Soil Sci.*, 40: 29–37;
- Beach L.M. 1992. Determination of As, Sb and Se in difficult environmental sample by hybryde generation. *Varian Optical Spectroscopy Instruments Wood. Dale Uinois, USA. AA-105. Instruments at work* 1–7;
- Bisbjerg B., Gissel-Nielsen G. 1969. The uptake of applied selenium by agricultural plants. I The influence of soil type and plant species. *Plant and Soil*. 31. 2: 287-298.
- Biernacka E., Małuszyński M. 2006. The content of cadmium, lead and selenium in soils from selected sites in Poland. *Polish J. Environ. Stud.* 15, 2a: 7–9;
- Borowska K. 1994. Selen w glebach i roślinach wybranych plantacji lucerny. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 414: 57–62;
- Borowska K., Koper J. 2000. The effect of long-term organic fertilization on the selenium content in lessive soil. *Pol. J. Soil Sci.*, 33/2: 21–27;
- Borowska K., Koper J. 2006. The effect of manure on the selenium content in soil and potato tubers. *Polish J. Environ. Stud.*, 15(2a): 17–19;
- Borowska K., Koper J. 2008. Zmiany zawartości selenu w glebie i koniczynie czerwonej (*Trifolium pratense* L.) wywołane wieloletnim nawożeniem mineralno-organicznym. X Sympozjum „Pierwiastki śladowe w środowisku-problemy

- ekologiczne i medyczne, pierwiastki śladowe w łańcuchu żywieniowym*”, Koszalin-Mielno: 47–48, abstract;
- Borowska K., Koper J., Tykwińska T. 2007. Zawartość selenu w wybranych typach gleb mineralnych regionu Kujaw i Pomorza na tle aktywności oksydoreduktaz. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 31: 18–22;
- Borowska K., Koper J. 2011. Dynamics of changes of selenium content in soil and red clover (*Trifolium pratense* L.) affected by long-term organic fertilization on the background of selected soil oxidoreductases. *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 20, No 6: 1403–1410.
- Bożek U. 1997. Porównanie zasobności w selen gleb o różnym stopniu zanieczyszczenia kadmem i ołowiem. Pozyskano: www.lublin.pl 2009/05/11;
- Broadley M.R., White P.J., Bryson R.J., Meacham M.C., Bowen H.C., Johnson S.E., Hawkesford M.J., McGrath S.P., Zhao F.J., Breward N., Harriman M., Tucker M. 2006. Biofortification of UK food crops with selenium. *Proceedings of the Nutrition Society*, 65: 169–181;
- Broadley M.R., Alock J., Alford J., Cartwright P., Foot I., Fairweather-Tait S., Hart D.J., Hurst R., Knott P., McGrath S.P., Meacham M.C., Norman K., Mowat H., Scott P., Stround J.L., Tovey M., Tucker M., White P.J., Young S.D., Zhao F.-J. 2010. Selenium biofortification of high-yielding winter wheat (*Triticum aestivum* L.) by liquid or granular Se fertilisation. *Plant Soil*. 332:5–18;
- Broyer T.C., Lee D.C., Asher C.J. 1966. Selenium nutrition of green plants. Effect of selenite supply on growth and selenium content of alfalfa and subterranean clover. *Plant Physiol.*, 41: 1425–1428;
- Broyer T.C., Johnson C.M., Huston R.P. 1972. Selenium and nutrition of *Astragalus*. II. Ionic sorption interactions among selenium, phosphate, and the macro- and micronutrient cations. *Plant and Soil*, 36: 651–669;
- Burk R.F., Hill K.E., Motley A.K. 2003. Selenoprotein metabolism and function: evidence for more than one function for selenoprotein P. *The Journal of Nutrition*, 133, 5: 1517S–1520S;
- Butterman W.C., Brown R.D. 2004. Selenium. Mineral Commodity Profiles. Report U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey: 1–20;
- Carter D.L., Robbins C.W., Brown M.J. 1972. Effect of phosphorus fertilization on the selenium concentration in alfalfa (*Medicago sativa*). *Soil Sci.Soc.Amer.Proc.* vol. 36: 624–628;
- Cartes P., Gianfreda L., Mora M.L. 2005. Uptake of selenium and its antioxidant activity in ryegrass when applied as selenite and selenate forms. *Plant and Soil*, 276: 359–367;
- Cartes P., Shene C., Luz Mora M. 2006. Selenium distribution in ryegrass and its antioxidant role as affected by sulfur fertilization. *Plant Soil*, 285: 187–195;
- Chałabis-Mazurek A., Wałkuska G., Kurska K. 2008. Zawartość selenu w organizmie owiec na tle zasobności w ten pierwiastek gleb i roślinności łkowej makroregionu lubelskiego. *X Sympozjum Trace Elements in the Environment*, 5: 57–58;
- Chang J.C., Gutenmann W.H., Reid C.M., Lisk D.J. 1995. Selenium content of Brazil Nuts from two geographic locations in Brazil. *Chemosphere*, 30(4): 801–802;
- Cooke T.D., Bruland K.W. 1987. Aquatic chemistry of selenium: Evidence of biomethylation. *Environ. Sci. Technol.*, 21: 1214–1219;
- Cruz-Jimenez G., Peralta-Videa J.R., Rosa G., Meitzner G., Parsons G., Gardea-Torresdey J.L. 2005. Effect of sulfate on selenium uptake and chemical speciation in *Convolvulus arvensis* L. *Environ. Chemistry*, 2(2): 100–107, abstract;
- Curtin D., Hanson R., Lindley T.N., Butler R.C. 2006. Selenium concentration in wheat (*Triticum aestivum*) grain as influenced by method, rate and timing of sodium

- selenate application. *New Zealand J. of Crop and Horticultural Science*, 34: 329–339;
- Čuvardić M.S. 2003. Selenium in soil. *Proceedings of Natural Sciences, Matica Srpska Novi Sad*, 104: 23–37;
- De Souza M.P., Pilon-Smits, E.A.H., Lytle C.M., Hwang S., Tai J., Honma T.S.U., Yeh L., Terry N. 1998. Rate-limiting steps in selenium assimilation and volatilization by Indian Mustard. *Plant Physiol.*, 117(4): 1487–1494;
- De Souza M. P., Lytle C.M., Mulholland M.M., Otte M.L., Terry N. 2000. Selenium assimilation and volatilization from dimethylselenoniopropionate by Indian Mustard. *Plant Physiology*. 122, 4:1281-1288.
- Dębski B. 1992. Wskaźnikowa rola mleka w ocenie hiposelenozy u bydła. *Praca habilitacyjna SGGW Warszawa*, 37ss.;
- Dharma, S., Bansal, A., Chillon, S.K., Chillon, K.S. 2009. Comparative effects of selenate and selenite on growth and biochemical composition of rapeseed (*Brassica napus* L). *Plant and Soil*. 329.1–2: 339-348
- Dhillon K.S., Dhillon S.K. 1991. Selenium toxicity in soils, plants and animals in some parts of Punjab, India. *Int. J. Environ. Studies*, 37 (1-2): 15–21, abstract;
- Dhillon K.S., Dhillon S.K. 1999. Adsorption-desorption reactions of selenium in some soils of India. *Geoderma*, 93, 1-2: 19–31, abstract;
- Dhillon K.S., Rani N., Dhillon S.K. 2005. Evaluation of different extractants for estimation of bioavailable selenium in seleniferous soils of Northwest India. *Australian Jour. of Soil Research*, 43, 5: 639–645;
- Dhillon K.S., Dhillon S.K. 2009. Accumulation and distribution of selenium in some vegetable crops grown in selenate- Se treated clay loam soil. *Front.Agric. China*, 3(4): 366–373;
- Dhillon K.S., Dhillon S.K., Dogra R. 2010. Selenium accumulation by forage and grain crops and volatilization from seleniferous soils amended with different organic materials. *Chemosphere*, 78 (2010): 548–556;
- Dietrych-Szóstak D., Burda S. 1999. Występowanie i rola przeciwutleniaczy w żywności. *Biul. Inform., Instytut Uprawy, Nawożenia i Gleboznawstwa, Puławy*, 11: 18–22;
- Djanaguiraman M., Devi D., D., Shanker A., K., Sheeba J., A., Bangarusamy U. 2005. Selenium- an antioxidative protectant in soybean during senescence. *Plant and Soil*, 272: 77–86;
- Doran J.W. 1982. Microorganisms and the biological cycling of selenium. *Adv.Microb.Ecol.*, 6: 1–32;
- Ducsay L., Ložek O., Varga L., Lošák T. 2007. Effects of winter wheat supplementation with selenium. *Ecological Chemistry and Engineering*, vol.14, nr 3-4: 289–294;
- Ducsay L., Ložek O., Varga L. 2009. The influence of selenium soil application on its content in spring wheat. *Plant Soil Environ.*, 55(2): 80–84;
- Eich-Greathorex S., Sogn T.A., Øgaard A.F., Aasen I. 2007. Plant availability of inorganic and organic selenium fertilizers as influenced by soil organic matter content and pH. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 79, 3: 1314–1385;
- Eich-Greathorex S., Krogstad T., Sogan T.A. 2010. Effect of phosphorus status of the soil on selenium availability. *J. Plant Natur. Soil Sci.* 173: 337–344;
- Eurola M.H., Ekholm P.I., Ylinen M.E., Varo P.T., Koivistoinen P.E. 1991. Selenium in Finnish foods after beginning the use of selenate-supplemented fertilisers. *J. Sci. Food Agric.*, 56(1): 57–70;
- Eurola M.H., Ekholm P., Venäläinen E-J. 2005a. Selenium supplemented fertilization-effects on the selenium content of food and the selenium intake in Finland. *Essential trace elements for plants, animals and humans*, 370: 49–51;

- Eurola M.H., Ketoja E., Laine A., Kangas A., Vuorinen M., Matomäki J., Hovinen S. 2005b. Trace elements content of rye (*Secale cereal L.*) cultivars in official trials in Finland during 1998-2002. Essential trace elements for plants, animals and humans, 370: 55–56;
- Feng R., Wei C., Tu S., Wu F. 2009. Effects of Se on the uptake of essential elements in *Pteris vittata* L. *Plant Soil*, 325: 123–132;
- Ferrari G., Renosto F. 1972. Regulation of sulfate uptake by excised barley roots in the presence of selenate. *Plant Physiol.*, 49: 114–116;
- Filek M., Zembala M., Kornaś A., Walas S., Mrowiec H., Hartikainen H. 2010. The uptake and translocation of macro- and microelements in rape and wheat seedlings as affected by selenium supply level. *Plant Soil*, 336: 303–312;
- Frankenberger W.T., Karlson, U. 1994. Microbial volatilization of selenium from soil and sediments. *Selenium in the environment*, Marcel Dekker, New York, p. 369–387;
- Galeas M.L., Zhang L.H., Freeman J.L., Wegner M., Pilon-Smits E.A.H. 2007. Seasonal fluctuations of selenium and sulfur accumulation in selenium hyperaccumulators and related non-accumulators. *New Phytologist* 173: 517–525;
- Germ M., Kreft I., Osvald J. 2005. Influence of UV-B exclusion and selenium treatment on photochemical efficiency of photosystem II, yield and respiratory potential in pumpkins (*Cucurbita pepo* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 43: 445–448;
- Gissel-Nielsen 1973. Uptake and distribution of added selenite and selenite by barley and red clover as influenced by sulphur. *J. Sci. Fd. Agric.*, 24: 649–655;
- Gissel-Nielsen G., Gupta U. C., Lamand M., Westermarck T. 1984. Selenium in soils and plants and its importance in livestock and human nutrition. *Adv. Agron.* 37: 397–460 ;
- Govarsmark E., Steen A., Strøm T., Hansen S., Bakken A.K. 2005. Trace element status of soil and organically grown herbage in relation to animal requirement. Essential trace elements for plants, animals and humans, 370: 43–46;
- Góral T. 2005. Selen- jego rola w komórce i działanie insulino-podobne. Pozyskano z <http://bioinfo.mol.uj.edu.pl/articles/Goral05>, 2007/08/29;
- Grant C.A., Buckley W.T., Wu R. 2012. Effect of selenium fertilizer source and rate on grain yield and selenium and cadmium concentration of durum wheat. *Can. J. Plant.Sci.* 703-708;
- Grzesiuk W. 1968.: Nefelometryczne oznaczanie siarki siarczanowej w roślinach. *Rocz. Glebozn.* XIX, 2, 1, 167-172;
- Gupta U.C., Gupta S.C. 2002. Quality of animal and human life as affected by selenium management of soil and crops. *Soil Sci. and Plant Anal.*, 33, 15-18: 2353–2555;
- Hahn M.H., Kuennen R.W., Roig W., Caruso J.A. Fricke F.L. 1981. Determination of trace amounts of selenium in corn, lettuce, potatoes, soybeans and wheat by hydride generation/condensation flame atomic absorption spectrometry. *J. Agric. Chem.*, 29, 792–796;
- Hajiboland R., Amjad L. 2008. The effects of selenite and sulphate supply on the accumulation and volatilization of Se by cabbage, kohlrabi and alfalfa plants grown hydroponically. *Agricultural and Food Science*, 17: 177–190;
- Haremza T., Nieradzik A., Matyka S. 1988. Substancje szkodliwe w surowcach i mieszkach paszowych. *Zesz.Nauk.AR Wroc. Se.Wet.* 173: 23–28;
- Hartfiel W., Bahners N. 1988. Selenium deficiency in the Federal Republic of Germany. *Biol. Trace Elem. Res.*, 15: 1–12, abstract;
- Hartikainen H., Xue T. 1999. The promotive effect of selenium on plant growth quality and human health. *J. of Trace Elements in Medicine and Biology*, 18: 309–318;

- Hartikainen H. 2005. Biogeochemistry of selenium and its impact on food chain quality and human health. *J. Trace Elem. Med. Biol.*, 18 (4): 309–318;
- Hartikainen H., Xue T., Piironen V. 2000. Selenium as an anti-oxidant and pro-oxidant in ryegrass. *Plant and Soil*, 225: 193–200;
- Hawkesford M.J., Zhao F.J. 2007. Strategies for increasing the selenium content of wheat. *J. of Cereal Sci.*, 46, 3: 282–292;
- Hawrylak B. 2007. Fizjologiczna reakcja ogórka na stres zasolenia w obecności selenu. *Rocz. AR w Poznaniu, CCCLXXXIII. Ogrodn.* 41: 483–486;
- Hawrylak B., Szymańska M. 2005. Wpływ pH środowiska na zawartość i translokację selenu w warzywach liściowych. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Rolnictwo*, LXXXVI, 515: 187–193;
- Hawrylak B., Szymańska M. 2007. Wybrane aspekty antyoksydacyjnej i prooksydacyjnej aktywności selenu w korzeniach kukurydzy (*Zea Mays* L.). *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, CCCLXXXIII*: 487 – 491;
- Hawrylak-Nowak B. 2008a. Zawartość siarki w roślinach pomidora warunkowana obecnością różnych form selenu. *X Sympozjum Pierwiastki śladowe w środowisku*, 124–125;
- Hawrylak-Nowak B. 2008b. Effect of selenium on selected macronutrients in maize plants. *J. Elementol.*, 13(4): 513–519;
- Hawrylak-Nowak B. 2008c. Enhanced selenium content in sweet basil (*Ocimum Basicicum* L.) by foliar fertilization. *Vegetable crops research bulletin*, 69: 63–72;
- Hopper J.L., Parker D.R. 1999. Plant availability of selenite and selenate as influence by the competing ions phosphate and sulfate. *Plant and Soil* 210, 199–207;
- Huang Z.Z., Wu L. 1991. Species richness and selenium accumulation of plants in soils with elevated concentration of selenium and salinity. *Ecotoxicol Environ. Saf.*, 22(3): 251–266, abstract;
- Huang Y-Z., Hu Z., Liu Y-X. 2008. Interactions between sulfur and selenium uptake by corn in solution culture. *J. Plant Nutrition*, 31, 1: 43–54/abstract;
- Hu, Y, McIntosh, GH, Le Leu, RK & Young, GP 2010, 'Selenium-enriched milk proteins and selenium yeast affect selenoproteins activity and expression differently in mouse colon,' *British Journal of Nutrition*, vol. 104, pp. 17-23;
- Institute of Medicine. Dietary Reference Intakes: vitamin C, vitamin E, selenium and carotenoids. Washington, DC: National Academies Press, 2000;
- Jakubus M. 2002. Kształtowanie się zawartości siarki ogólnej i siarczanowej w poziomie próchnicznym gleb uprawnych w zależności od odczynu. *Zesz.Probl.Post. Nauk Rol.*, 482: 205–214;
- Jin C. 2003. The Dynamics of Bioavailability of Se in Soil-soybean System. /abstract/ <http://www.dissertationtopic.net/doc/1249495>
- Johnsson L. 1991. Selenium uptake by plants as a function of soil type, organic matter content and pH. *Plant and Soil*, 133: 57– 64;
- Johnsson C.C., Ge X., Green K.A., Liu X. 2000. Selenium distribution in the local environment of selected villages of the Keshan Disease belt, Zhangjiakou District, Hebei Province, People's Republic of China. *Appl. Geochem.*, 15, 3: 385–401 (abstract);
- Johnsson L. 2005. Essential trace elements and food quality. NFJ Seminar no 370. Essential trace elements for plants, animals and humans. 15-17.08.2005. Reykiavik, Iceland:15-17.
- Jurkowska H. 1996. Selen w glebach i roślinach. *Wszechświat*, t.97, 2: 29–32;
- Jůzl M., Hlušek J., Elzner P., Lošák T. 2007. Effect of increased levels of selenium in soil on selected yield-forming potato components. *Ecological Chemistry and Engineering*, 14, 5-6: 473–478;

- Kápola Hileström P.R., Laursen K.H., Husted S., Larsen E.H. 2009. Effect of foliar application of selenium on its uptake and speciation in carrot. *Food Chemistry*, 115: 1357–1363;
- Karlson U., Frankenberger WT Jr. 1990. Volatilization of selenium from agricultural evaporation pond sediments. *Sci. Total Environ.* 92: 41–54;
- Kirchman H., Thorvaldsson G., Björnsson H., Mattsson L. 2005. Trace elements in crops from Swedish and Icelandic long-term experiments. *Essential trace elements for plants, animals and humans*, 370: 30–33;
- Kita A., Pazurkiewicz-Kocot K. 2006. Zależność pomiędzy akumulacją cynku w siewkach *Zea mays* L., a rodzajem i stężeniem związku selenu zastosowanego w uprawie. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 509: 231–238;
- Kita A., Pazurkiewicz-Kocot K. 2007. Oddziaływanie selenu na kumulację K^+ , Na^+ , Ca^{2+} w roślinach *Zea mays* L. poddanych działaniu ABA*. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 32: 97–102;
- Kopsell D.A., Randle W.M. 1997. Selenate concentration affects selenium and sulphur uptake and accumulation by „Granex 33” onions. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 122, 5: 721–726;
- Kopsell D.A., Randle W.M., Mills H.A. Nutrient accumulation in leaf tissue of Rapid-Cycling Brassica *leracea* responds to increasing sodium selenite concentrations. *J. Plant Nutrition*, 23(7): 927–935;
- Korol W., Mojek E., Grabowski C. 1992. Zawartość selenu w ziarnie zbóż. *Biul. Inf. Przem. Pasz. Lublin*, Nr 2: 37–44;
- Kovalevich Z.S., Golovatyj S.E. 2007. Accumulation of selenium in green mass of maize and millet at different forms of selenic fertilizers. *Pochvovedenie i Agrokimiya*, 2: 158–164;
- Kwiatkowska-Stenzel R. 2010. Rola selenu w żywieniu świń. <http://www.portalhodowcy.pl/hodowca-trzody-chlewnej/156-numer-32010/1593-rola-selenu-w-zywieniu-swin/> [26.11.2010];
- Lakin H.W. 1972. Selenium accumulation in soils and its adsorption by plants and animals. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 83, 181–190;
- Laser H. 2004. Pflanzenbauliche Ansätze zur Selen-Versorgung von Mutterkühen und Fleischrindern in Weidesystemen. *Habilitationsschrift. Universität Gießen*, 213 ss;
- Laser H. 2007. Effects of liming and nitrogen application on the trace element concentrations of pastures in low mountain range. *Plant Soil Environ.*, 53(6): 258–266;
- Lauchli A. 1993. Selenium in plants: uptake, functions, and environmental toxicity. *Bot. Acta*, 106: 455–468;
- Li H.F., McGrath S.P., Zhao F.J. 2008. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate and selenite. *New Phytol.*, 178: 92–102;
- Lipiński W., Terelak H., Motowicka-Terelak T. 2003. Propozycja liczb granicznych zawartości siarki siarczanowej w glebach mineralnych na potrzeby doradztwa nawozowego. *Rocz. Glebozn.* 54(3): 79–84;
- Lin Z.-Q., Hansen D., Zayed A., Terry N. 1999. Biodegradation and Bioremediation. Biological selenium volatilization: Method of measurement under field condition. *J. Environ. Qual.*, 28: 309–315;
- Liu Q., Wang D.J., Jiang X.J., Cao Z.H. 2004. Effect of the interactions between selenium and phosphorus on the growth and selenium accumulation in rice (*Oryza Sativa*). *Geochem. Health* 26: 325–330;
- Loganathan P., Hedley M.J. 2006. Spatial and time dependent patterns of selenium (Se) release from selected Se fertilizer granules. *Australian Journal of Soil Research*, 44: 155–163;

- Lyons G.H., Lewis J., Lorimer M.F., Holloway R.E., Brace D.M., Stangoulis J.C.R., Graham R.D. 2004. Agriculture. High-selenium wheat: agronomic biofortification strategies to improve human nutrition. *Food, Agriculture and Environment*, 2(1): 171–178;
- Lyons G.H., Genc Y., Soole K., Stangoulis J.C.R., Liu F., Graham R.D. 2009. Selenium increases seed production in Brassica. *Plant Soil*, 318: 73–80;
- Lyons G. 2010. Selenium in cereals: improving the efficiency of agronomic biofortification in the UK. *Plant Soil*, 332, 1–4;
- Mackowiak C.L., Amacher M.C. 2008. Soil sulfur amendments suppress selenium uptake by alfalfa and western wheatgrass. *J. Environ. Qual.* 37:772–779;
- Maćkowiak C. 1994. Zasady stosowania gnojowicy. IUNG, Puławy, ss 40;
- Markiewicz R., Borawska M.H., Socha K., Roszkowska M. 2006. Content of selenium and lead in some tissues of animals from Podlasie as an indicator of environmental conditions. *Polish J. Environ. Stud.*, 15, 2a: 135–138;
- Martínez M., Giménez J., de Pablo J., Rovira M., Duro L. 2006. Sorption of selenium (IV) and selenium (VI) onto magnetite. *Applied Surface Science*, 252: 3767–3773;
- Masset S., Monteil-Rivera F., Dupont L., Dumonceau J., Aplincourt M. 2000. Influence of humic acid on sorption of Co(II), Sr(II), and Se(IV) on goethite. *Agron. Sustain. Dev.*, 20, 5: 525–535, abstract;
- Mayland, H.F., James L.F., Panter K.E., Sonderegger J.L. 1989. Selenium in seleniferous environments. *SSSAJ Special Pub. Selenium in Agriculture and the Environment*, Soil Sci. Soc. Am. and Am. Soc. of Agronomy, 677, 23: 15–50;
- McDowell L.R., Valle G., Cristaldi L., Davis P.A., Rosendo O., Willinson N.S. 2002. Selenium availability and methods of selenium supplementation for growing ruminants. *Proc. 13 Annual. Florida Ruminant Nutrition Symp.*, 86–102.
- Mikkelsen R.L., Haghinia G.H., Page A.L. 1987. Effects of pH and selenium oxidation stage on the selenium accumulation and yield of alfalfa. *J. of Plant Nutrition*, 10: 937–950;
- Mikkelsen R.L., Haghina G.H., Page A.L., Bingham F.T. 1989a. Factors affecting selenium accumulation by agricultural crops. In: Jacobs L.W. *Selenium in agriculture and the environment*, Amer. Soc. of Agron. Soil Sci. Soc. Amer: 65–94;
- Mikkelsen R.L., Page A.L., Bingham F.T. 1989b. Uptake and accumulation of selenium by agricultural crops. *Selenium in irrigated agriculture*. Ed. L.W. Jacobs. Soil Sci. Soc. Amer. Spec. Publ., 23: 65–94;
- Mikkelsen R.L., Wan H.F. 1990. The effect of selenium on sulfur uptake by barley and rice. *Plant and Soil*, 121: 151–153;
- Motowicka-Terelak T., Terelak H. 2000. Siarka w glebach i roślinach Polski. *Folia Univ. Agric. Stetin.* 204, *Agricultura* 81: 7–16;
- Murphy M.D., Quirke W.A. 1997. The effect of sulphur/nitrogen/selenium interactions on herbage yield and quality. *Irish J. of Agricultural and Food Research*, 36,1: 31–38/abstract;
- Neal R.H. 1995. Selenium. *Heavy Metals in Soils*, ed. Alloway, Blackie Academic&Professional, 12: 260–283;
- Niedzielski P., Siepak M., Siepak J. 2000. Występowanie i zawartość arsenu, antymonu i selenu w wodach i innych elementach środowiska. *Rocznik Ochrony Środowiska*, 2: 317–341;
- Nielsen F.H. 2004. Micronutrients and animal nutrition. *IFA Inter. Symp. of Micronutrients*. 23-25.02.2004, New Delhi, India, 3–13;
- Nowosielski O. (1974): *Metody oznaczania potrzeb nawożenia*. PWRiL, Warszawa: 1-91;
- Oldfield J.E. 2002. *Selenium world atlas*. Selenium-Tellurium development Association (STDA); www.stda.org /10.06.2011;

- Patorczyk-Pytlik B. 2009. The content of selenium in some species of meadow plants. *J. Elementol.*, 14(4): 745–753;
- Patorczyk-Pytlik B., Kulczycki G. 2009. Content of selenium in arable soils near Wrocław. *J. Elementol.* 14(4), 755–762;
- Patorczyk-Pytlik B., Zimoch A., Szumińska E. 2009a. Wpływ nawożenia gleby siarką na zawartość selenu w lucernie. *Zesz.Nauk. UP Wroc., Rol., XCIV*, 573: 65–72;
- Patorczyk-Pytlik B., Zimoch A., Szumińska E., Rybicki R. 2009b. Wpływ nawożenia fosforem na zawartość selenu w kukurydzy i lucernie. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* z. 538: 181–189;
- Patorczyk-Pytlik B., Zimoch A. 2011. Effect of selenium on alfalfa Fielding and the content of his element in alfalfa in relation to the type of soil the plant was cultivated in. *Ecological Chemistry and Engineering*, 18: 9–10: 1313–1320;
- Pazurkiewicz-Kocot K., Galas W., Kita A. 1999. Oddziaływanie selenu na akumulację potasu w roślinach *Zea mays* L. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 469: 465–471;
- Pazurkiewicz-Kocot K., Kita A., Bąk A. 2006. Oddziaływanie selenu na siewki *Zea mays* L. rosnące w środowisku skażonym ołowiem. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 40: 278–285;
- Pezarossa, B.D., Piccotino C., Shennan C., Malorgio F. 1999. Uptake and distribution of selenium in tomato plants as affected by genotype and sulfate supply. *J. Plant Natur.* 22:1613-1635.
- Pickering I.J., Prince R.C., Salt D.E., George G.N. 2000. Quantitative, chemically specific imaging of selenium transformation in plants. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 97: 10717–10722;
- Piotrowska M. 1984. Zawartość selenu w uprawnych glebach Polski. *Rocz. Glebozn.*, T. XXXV, 1: 23–31;
- Piotrowska M. 1985. Występowanie selenu w uprawnych glebach Polski. *Rocz. Glebozn.* T. XXXVI, 1: 147–149;
- Preś J., Kinal S. 1996. Aktualne spojrzenie na sprawę zaopatrzenia zwierząt w mikroelementy. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 434: 1043–1061;
- Puzanowska-Tarasiewicz H., Kuźmicka L., Tarasiewicz M. 2009. Funkcje biologiczne pierwiastków i ich związków. II. Selen, seleniany, związki selenoorganiczne. *Pol. Merk. Lek.* XXVII, 159: 249–252;
- Pyrzyńska K. 2000. Związki selenu w środowisku naturalnym. *Wiad. Chem.*, 54(1/2): 139–150;
- Qiang-yun S., Turakainen M., Seppänen M., Mäkelä P. 2008. Effects of selenium on maize ovary development at pollination stage under water deficits. *Agricultural Sciences in China*, 7, 11: 1298–1307;
- Quinn C.F., Galeas M.L., Freeman J.L., Pilon-Smits E.A.H. 2007. Selenium: Deterrence, toxicity, and adaptation. *Inter. Environ. Assess Man*, 3: 460–462;
- Ramos S.J., Faquin V., Guilherme L.R.G., Castro E.M., Ávila F.W., Carvalho G.S., Bastos C.E.A., Oliveira C. 2010. Selenium biofortification and antioxidant activity in lettuce plants fed with selenate and selenite. *Plant Soil Environ.*, 56(12): 584–588;
- Reid M.E., Stratton M.S., Lillico A.J., Fakih M., Natarajan R., Clark L.C., Marshall J.R. 2004. A report of high-dose selenium supplementation: response and toxicities. *J. of trace Elements in Medicine and Biology*, 18: 69–74;
- Ríos J.J., Blasco B., Cervilla L.M., Rubio-Wilhelmi M.M., Ruiz J.M., Romero L. 2008. Regulation of sulphur assimilation in lettuce plants in the presence of selenium. *Plant Growth Regul.*, 56: 43–51;
- Rogała B., Szczerbowski M., Żegleń S. 1999. Znaczenie selenu w zjawiskach immunopatologicznych. *Alergia Astma Immunologia*, 4(4): 239–243;

- Rosen B.P., Liu Z. (2009). Transport pathways for arsenic and selenium: a minireview. *Environmental International*, 35: 512-515.
- Rotruck J.T., Ganther H.E., Swanson A.B., Hafeman D.G., Hoekstra W.G. 1972. Selenium biochemical role as a component of glutathione peroxidase. *Science*, 179, 588-590.
- Rovira M., Giménez J., Martínez M., Martínez-Lladó X., de Pablo J., Martí V., Duro L. 2008. Sorption ofelenium (IV) and selenium (VI) onto natural iron oxides: Goethite and hematite. *J. of Hazardous Materials*, 150, 2: 279-284;
- Rutkowska B., Szulc W., Łabętowicz J. 2004. Wpływ trzech sposobów nawożenia selenem na zawartość tego pierwiastka w pszenicy w warunkach doświadczenia wazonowego. *Zesz.Probl.Post. Nauk Rol.*, 502 :325-331;
- Schwarz K., Foltz C.M. 1957. Selenium as an integral part of factor 3 against dietary necrotic liver degeneration. *J.Amer.Chem.Soc.*, 79: 3292;
- Sembratowicz L., Grela E.1997. Selen w żywieniu zwierząt. *Post. Nauk Rol.* 1/97: 97-106;
- Seppänen M., Turakainen M., Hartikainen H. 2006. Selenium effects on oxidative stress in potato. *Plant Science*, 165: 311-319, abstract;
- Shanker K., Mishra S., Srivastava S., Srivastava R., Dass S., Prakash S., Srivastava M.M. 1996. Study of mercury-selenium (Hg-Se) interactions and their impact on Hg uptake by the radish (*Raphanus sativus*) plant. *Food and Chemical Toxicology*, 34: 883-886;
- Shanker K., Srivastava M.M. 2001. Uptake and translocation of selenium by maize (*Zea mays*) from its environmentally important forms. *J. Environ.Biol.* 22(3): 225-228;
- Sharma S., Bansal A., Dhillon S.K., Dhillon K.S.2010. Comparative effects of selenate and selenite on growth and biochemical composition of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Plant and Soil*, 329, 1-2:339-348.
- Singh M., Malhotra P.K. 1976. Selenium availability in berseem (*Trifolium alexandrinum*) as affected by selenium and phosphorus application. *Plant and Soil*, 44: 261-266;
- Singh M. 1979. Effect of selenium and phosphorus on the growth and chemical composition of Raya (*Brassica juncea* cos.). *Plant and Soil*, 51: 485-490;
- Singh, M., and N. Singh. 1978. Selenium toxicity and detoxification by phosphorus. *Soil Sci.* 126: 255-262
- Singh M., Singh N., Bhandari D.K. 1980. Interaction of selenium and sulfur on the growth and chemical composition of Raya. *Soil Sci.*, 129, 4: 238-244;
- Skoczyński M., Patorczyk-Pytlik B. 2006. Zawartość selenu w glebach użytków zielonych okolic Wrocławia. *Fragmenta Agronomia (XXIII)*, 4/92: 156-164;
- Sors T.G., Ellis D.R., Salt D.E. 2005. Selenium uptake, translocation, assimilation and metabolic fate in plants. *Photosynthesis Research*, 86: 373-389;
- Strączyk D., Drobnica L. 2001. Selen w roślinach i jego wpływ na zdrowie. *Ekopartner*, 5(115)/2001: 14;
- Sun G.X., Liu X., Williams P.N., Zhu Y.G. 2010. Distribution and translocation of selenium from soil to grain and its speciation in Paddy Rice (*Oryza sativa* L.). *Environ.Sci.Technol.*, 44(17): 6706-6711;
- Terry N., Carlson C., Raab, T.K., Zayed A. 1992. Rates of Se volatilization among crop species. *J. Environ. Qual.*, 143(1): 341-344;
- Terry N., Zayed A. 1994. Selenium volatilization by plants. *Selenium in the environment*, Marcel Dekker, New York, p. 343-367;
- Terry N., Zayed M., De Souza M.P., Tarun A.S. 2000. Selenium in higher plants. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 51: 401-432;
- Trafikowska U. 1992. The effect of different doses ofelenium supplementation onelenium level and glutathione peroxidase activity in ovine tissues [PhD. Thesis]. Bydgoszcz, Poland: Medical University;

- Trafikowska U., Kuczyńska I. 2000 Zawartość selenu w glebie pól uprawnych i łąk okolic Bydgoszczy. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 471, 567–572;
- Turakainen M., Hartikainen H., Sarjala T., Seppänen M.M. 2008. Impact of selenium enrichment on seed potato tubers. *Agricultural and Food Science*, 17: 278–288;
- Ulewicz-Magulska B. 2008. Selen w roślinnych surowcach leczniczych, zawartość, rozmieszczenie i wzajemne relacje z innymi pierwiastkami, (rozprawa doktorska). Pozyskano z pbc.gda.pl/Content/4936, 2011/07/15;
- Wang J., Zhao Z., Li G. 2006. Effects of selenium application on the selenium content, yield and qualities of carrot. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 12(2): 240–244;
- Washington F.C. 1983. Selenium in Nutrition. Revised Edition. National Academy Press, Chapter 3 Distribution, 10–39;
- Watkinson J.H. 1962. Soil selenium and animal health. *Trans. Int. Soc. Soil Sci. Comm.* IV and V: 149–154;
- Wawer I. 2007. W stronę „gender medicine”- suplementacja selenem dla mężczyzn. *Essentia Medica*, 38(2): 64–69;
- Wesołowski M. 2006. Selen-pierwiastek życia. *Panacea*, Nr 3(16), lipiec-wrzesień 2006, pozyskano z: www.panacea.pl 19/07/2009;
- White P.J., Bawen H.C., Parmaguru P., Fritz M., Spracklen W.P., Spiby R.E., Meacham M.C., Meam A., Harriman M., Trueman L.J., Smith B.M., Thomas B., Broadley M.R. 2004. Interactions between selenium and sulfur nutrition in *Arabidopsis thaliana*. *J. of Exp. Bot.* 55, 404: 1927–1937;
- White P.J., Bowen H.C., Marshall B., Broadley M.R. Extraordinarily high leaf selenium to sulfur ratios define “Se-accumulator” plants. *Annals of Botany*, 100: 111–118;
- Wierzbicka M., Bulska E., Pyrżyńska K., Wysocka J., Zachary B.A. 2007. Selen. Pierwiastek ważny dla zdrowia, fascynujący dla badacza. ss 312;
- Witkiewicz K. 2008. Jakie znaczenie w żywieniu drobiu ma witamina E i selen? Katedra Hodowli i Użytkowania Drobiu UP w Poznaniu, pozyskano z : www.portalhodowcy.pl/hodowca-drobie/42/49 2010/11/26;
- Włodarczyk R., Birkle B. 2010. Selen chroniony – najbardziej efektywna forma podaży selenu w żywieniu przeżuwaczy. *Życie Weterynaryjne*, 85, 3, 238–242.
- Wu L., Huang Z-Z. 1991. Selenium assimilation and nutrient element uptake in White clover and Tall fescue under the influence of sulphate concentration and selenium tolerance of the plants. *J. Experimental Botany*, 43(4): 549–555, abstract;
- Wu, L., Xun G., Bañuelos G.S. 1997. Accumulation of seleno-amino acids in legume and grass plant species grown in selenium-laden soils. *Environ. Toxicology and Chemistry*, 16(3): 491–497, abstract;
- Valdez-Barillas J.R., Quinn C.F., Pilon-Smits E.A.H. 2011. Selenium Accumulation in Plants—Phytotechnological Applications and Ecological Implications. *International Journal of Phytoremediation*, 13(S1): 166–178;
- Xu W.F., Chen Q.X., Shi W.M. 2010. Effects of nitrate supply site on selenite uptake by rice roots. *J. Agric. Food Chem.*, 58(20): 11075–11080, abstract;
- Yang G.Q., Chen J.S., Wen Z.M., Ge K.Y., Zhu L.Z., Chen X.C., Chen X.S. 1984. The role of selenium in Keshan disease. *Adv. Nutr. Res.*, 6: 203–31;
- Xue T., Hartikainen H., Piironen V. 2001. Antioxidative and growth-promoting effect of selenium in senescing lettuce. *Plant and Soil*, 270: 55–61;
- Yang F., Chen L., Hu Q., Pan G. 2003. Effect of the application of selenium on selenium content of soybean and its products. *Biological trace element research*, 93(1-3): 249–256;
- Ylärinta T. 1983. Selenium in Finnish agricultural soils. *Ann. Agric. Fenn.* 22, 2:122–136;

- Ylärinta T. 1984a. Raising of selenium content of spring wheat and barley using selenite and selenate. *Ann. Agric. Fenn.* 23, 2: 75–84;
- Ylärinta T. 1984b. Wpływ nawożenia selenem oraz opryskiwania nim roślin w różnych stadiach rozwojowych na zawartość selenu w pszenicy jarej i jęczmieniu. *Ann. Agric. Fenn.*, 23 (2): 85–95;
- Zabłocki Z. 1991. Selen w powierzchniowych poziomach gleb oraz w lucernie obszarów niedoborowych. *Mat. VII Symp. "Mikroelementy w rolnictwie"*, 9-10.09.1987, Wrocław: 109–113;
- Zagrodzki P. 2000. The role of selenium in iodine metabolism in children with goiter (rozprawa doktorska). *Environmental Health Perspectives*, vol. 108: 67–71;
- Zayed A., Lytle C.M., Terry N. 1998. Accumulation and volatilization of different chemical species of selenium by plants. *Planta*, 206:284-292.
- Zhang Y.Q., Moore J.N. 1997. Environmental conditions controlling selenium volatilization from a wetland system. *Environ. Sci. Technol.*, 31(2): 511–517;
- Zhu Y.G., Pilon-Smits E.A.H., Zhao F.J., Williams P.N., Meharg A.A. 2009. Selenium in higher plants: understanding mechanisms for biofortification and phytoremediation. *Trends in Plant Science*, vol. 14(8): 436–442;
- Zimoch A., Patorczyk-Pytlik B. 2009. Zawartość selenu w gorczycy białej w zależności od zastosowanej dawki Se i kategorii agronomicznej gleby. *Wyd. Nauk UAM Poznań. Na pograniczu chemii i biologii*, XXIII: 315–323;
- Zimoch A., Patorczyk-Pytlik B. 2010. Wpływ siarki na plon oraz zawartość selenu w gorczycy białej. *Wyd. Nauk UAM Poznań. Na pograniczu chemii i biologii*, XXV: 113–122;

Dz.U. 66, poz 614

WHO/HSE/WSH/10.01/14

VII. Materiały źródłowe

Tab.I. Zawartość selenu [$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$] w kolejnych fazach rozwojowych badanych odmian kukurydzy (doświadczenie I polowe)

Lp.	Odmiana	FAO	pszenny bardzo dobry(II)			żytni dobry (IVa)			średnia		
			BBCH								
			13	17-19	67	13	17-19	67	13	17-19	67
1	Wilga	<230	37	29	18	33	23	16	35	26	17
2	Cedr		56	23	20	68	48	41	65	35	31
3	Wiarus		42	38	22	62	36	28	52	36	25
4	Jawor		97	69	31	48	32	30	72	51	30
5	Smolitop		76	28	16	32	24	21	54	26	19
6	Reduta	230-240	119	44	27	39	32	34	79	38	30
7	Glejt		50	37	29	30	23	20	40	30	24
8	Piorun		69	36	34	47	31	21	58	33	27
9	Smok		30	22	21	39	33	22	34	28	22
10	Smh 220		39	32	24	48	37	32	44	34	28
11	Dumka		71	61	42	34	28	22	53	44	32
12	Tur		73	59	49	46	32	35	60	45	42
13	Bielik		73	64	55	40	36	28	56	50	42
14	Bejm		70	60	42	41	31	29	56	46	36
15	Smolik		72	33	31	46	38	34	59	36	33
16	Rataj		41	36	12	42	35	43	42	36	28
17	Malibu		75	74	53	48	39	32	61	57	43
18	Maksym		98	67	54	76	42	36	86	54	45
19	Opoka		84	53	43	72	41	32	78	47	37
20	Lober	>240	48	45	20	38	37	31	43	41	25
21	Narew		58	36	28	44	40	34	51	38	31
22	Kresowiak		74	46	40	57	64	38	66	55	39
23	Fmb10		51	40	28	36	31	25	43	36	27
24	Juhas		72	45	35	35	33	24	54	39	30
25	San		78	44	33	51	46	25	64	45	29
26	Vitras		39	31	23	56	29	21	47	30	22
27	Popis		42	33	28	62	44	19	52	38	23
28	Smh27008		55	28	26	46	28	20	50	28	23
29	Blask		42	37	18	49	33	22	46	35	20
30	Bosman		88	44	43	38	34	20	63	39	31
31	Wigo		42	33	29	37	32	28	39	33	29
32	Kozak		46	36	34	52	38	21	49	37	27
Średnia			62,7	42,6	31,2	46,6	35	27,6	54,7	38,9	29,4
SD			21,3	14	11,5	11,6	7,8	7,2	12,7	8,2	7,2
V (%)			34	33	37	25	22	26			
NIR _{0,05}			7,37	4,85	3,98	4,01	2,7	2,5	4,39	2,84	2,5
Min			30	22	12	30	23	17	34	26	17
Max			119	74	55	76	64	43	86	57	48

Tab.II. Zawartość selenu [$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$] w ziarnie odmian kukurydzy uprawianych na kompleksie pszennym dobrym oraz żytnim bardzo dobrym, zebranej w fazie BBCH 89 (doświadczenie II polowe)

Lp.	Odmiana	FAO	kompleks		Średnia dla gleb		Średnia dla odmiany
			Pszenny b. dobry (II)	Żytni dobry (IVa)	klasa II	klasa IV	
1	Wilga	<230	24,5	21,5	34,3	17	23,0
2	Cedro		31,8	24,0			27,9
3	Wiarus		30,0	16,5			23,2
4	Jawor		49,5	17,5			33,5
5	Smolito		36,0	5,5			20,8
6	Opoka	230-240	78,0	18,5	54,6	23,75	48,2
7	Reduta		38,2	20,5			29,3
8	Glejt		45,7	12,0			28,8
9	Piorun		41,3	16,5			28,9
10	Smok		37,0	22,0			29,5
11	Smh220		18,5	10,5			14,5
12	Dumka		57,5	18,0			37,8
13	Tur		85,5	47,0			66,2
14	Bielik		78,5	34,0			56,2
15	Bejm		54,5	32,0			43,2
16	Smolik		40,0	23,0			31,5
17	Rataj		30,5	10,0			20,2
18	Malibu		47,0	25,3			36,1
19	Maksym		111,9	43,2			77,6
20	Lober	>240	27,5	14,5	30,7	13,3	21,0
21	Narew		42,5	12,6			27,6
22	Kresowiak		46,5	21,5			34,0
23	Fmb10		31,0	19,3			25,1
24	Juhas		47,5	15,5			31,5
25	San		41,0	10,5			25,8
26	Vitras		37,5	4,0			20,8
27	Popis		26,0	15,5			20,8
28	Smh27008		17,0	13,5			15,2
29	Blask		26,5	10,0			18,2
30	Bosman		11,6	11,5			11,6
31	Wigo		20,0	8,5			14,2
32	Kozak		28,5	16,5			22,5
			kl.II	kl.IV			dla obu klas
Średnia			42,4	20,6	31,5		30,1
SD			20,8	9,8	19,5		14,7
V (%)			49	48	62		
NIR _{0,05}			7,22	3,41	4,78		5,10
Min			11,6	4,0	4,0		11,6
Max			111,9	47	111,9		77,6

Tab. III Zawartość selenu w nadziemnych częściach kukurydzy [$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$]
(doświadczenie I)

Dawka Se [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	LOBER	BIELIK	TUR	BEJM	WILGA	Średnia dla dawki
0	10	30	47	28	25	28,0
0,1	332	365	473	375	308	370,6
0,2	686	890	1034	920	714	848,7
Średnia dla odmiany	342,6	428,0	517,9	441,0	348,9	-
NIR _{0,05}	Odmiana	31,39	Dawka Se	24,31	Interakcja	54,37

Tab. IV Plon suchej masy nadziemnych części kukurydzy odmiany Lober i Bielik w kolejnych fazach rozwojowych [g z wazonu] (doświadczenie II)

Dawka Se [mg·kg ⁻¹]	LOBER	BIELIK	Średnia dla dawki
BBCH 16			
0	8,4	9,4	8,9
0,1	9,4	9,4	9,3
0,2	10,3	9,8	10,0
Średnia dla odmiany	9,3	9,5	-
NIR _{0,05}	Odmiana n.i.		
	Dawka Se 0,65		
	Interakcja 0,96		
BBCH 19			
0	35,0	37,3	36,2
0,1	38,6	39,0	38,8
0,2	39,7	36,8	38,2
Średnia dla odmiany	37,8	37,7	-
NIR _{0,05}	Odmiana n.i.		
	Dawka Se 1,17		
	Interakcja 2,04		
BBCH 51			
0	105,4	101,8	103,6
0,1	113,9	102,9	108,4
0,2	117,7	101,1	109,4
Średnia dla odmiany	112,4	100,6	-
NIR _{0,05}	Odmiana 2,49		
	Dawka Se 3,06		
	Interakcja 4,33		
BBCH 70			
0	150,0	139,0	144,5
0,1	152,6	135,8	144,2
0,2	154,1	133,6	143,9
Średnia dla odmiany	152,2	136,2	-
NIR _{0,05}	Odmiana 2,38		
	Dawka Se n.i.		
	Interakcja 3,88		

Tab. V Względna szybkość nagromadzania masy przez kukurydzę odmiany Lober i Bielik g p.s.m./roślinę/ dzień (doświadczenie II)

Faza	BBCH 16	BBCH 19	BBCH 51	BBCH 70
Dni wegetacji	19	16	25	21
Lober				
0	0,0743	0,277	0,469	0,354
0,1 mg Se·kg ⁻¹	0,0825	0,304	0,502	0,307
0,2 mg Se·kg ⁻¹	0,0903	0,306	0,520	0,289
Bielik				
0	0,0824	0,291	0,430	0,295
0,1 mg Se·kg ⁻¹	0,0824	0,308	0,426	0,293
0,2 mg Se·kg ⁻¹	0,0860	0,281	0,429	0,258

Tab.VI Zawartość [$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$] oraz pobranie [μg z wazonu] selenu przez nadziemne części kukurydzy odmiany Lober i Bielik w kolejnych fazach rozwojowych (doświadczenie II)

Dawka Se[mg·kg ⁻¹]	Zawartość		Średnia dla dawki	Pobranie		Średnia dla dawki
	LOBER	BIELIK		LOBER	BIELIK	
BBCH 16						
0	58	75	66	0,5	0,7	0,6
0,1	1215	1610	1412	11,3	15,1	13,2
0,2	2595	2740	2668	26,7	26,8	26,8
Średnia dla odmiany	1289	1475	-	12,8	14,2	-
NIR _{0,05}	Odmiana 54,6			Odmiana 1,24		
	Dawka Se 66,3			Dawka Se 1,51		
	Interakcja 93,8			Interakcja 2,17		
BBCH 19						
0	35	54	44	1,2	2,0	1,6
0,1	970	1277	1124	37,4	49,9	43,6
0,2	2252	2406	2329	89,4	88,4	88,9
Średnia dla odmiany	1086	1246	-	42,7	46,8	-
NIR _{0,05}	Odmiana 89,2			Odmiana 3,61		
	Dawka Se 109,2			Dawka Se 4,42		
	Interakcja 154,5			Interakcja 6,26		
BBCH 51						
0	25	45	35	2,6	4,6	3,6
0,1	451	674	562	51,4	66,6	59,0
0,2	1398	1737	1568	164,7	175,8	170,2
Średnia dla odmiany	625	819	-	72,9	82,3	-
NIR _{0,05}	Odmiana 61,7			Odmiana 8,58		
	Dawka Se 75,5			Dawka Se 10,50		
	Interakcja 106,8			Interakcja 14,86		
BBCH 70						
0	10	30	19	1,5	4,1	2,8
0,1	332	365	349	50,7	49,6	50,1
0,2	686	890	788	105,7	118,9	112,3
Średnia dla odmiany	343	428	-	52,6	57,6	-
NIR _{0,05}	Odmiana 21,5			Odmiana 2,61		
	Dawka Se 26,3			Dawka Se 3,20		
	Interakcja 37,2			Interakcja 4,53		

Tab. VII Względna szybkość pobieranie selenu przez kukurydzę odmiany Lober i Bielik $\mu\text{g Se/roślinę/dzień}$ (doświadczenie II)

Faza	BBCH 16	BBCH 19	BBCH 51	BBCH 70
Dni wegetacji	19	16	25	21
Lober				
0	0,0043	0,0437	0,0145	-0,087
0,1 mg Se $\cdot\text{kg}^{-1}$	0,0991	0,2718	0,0933	-0,0055
0,2 mg Se $\cdot\text{kg}^{-1}$	0,2342	0,6531	0,5006	-0,4666
Bielik				
0	0,0061	0,0135	0,0173	-0,0039
0,1 mg Se $\cdot\text{kg}^{-1}$	0,1324	0,3625	0,1293	-0,1563
0,2 mg Se $\cdot\text{kg}^{-1}$	0,2350	0,6416	0,5813	-0,4500

Tab. VIII Plon suchej masy części nadziemnych kukurydzy (doświadczenie III)

Dawka Se [mg $\cdot\text{kg}^{-1}$]	Forma selenu		Średnia dla dawki
	Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃	
0	217,3		217,3
0,1	219,2	220,2	219,7
0,25	232,2	218,5	225,4
0,50	215,0	212,0	213,5
0,75	211,5	201,8	206,7
1,0	213,7	195,6	204,7
2,0	212,4	185,7	199,1
3,0	210,6	186,0	198,3
4,0	209,6	185,0	197,3
Średnia dla formy	215,7	202,5	-
NIR _{0,05}	Forma 2,32	Dawka Se 8,04	Interakcja 7,8

Tab. IX Zawartość [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] i pobranie [μg z wazonu] selenu przez suchą masę części nadziemnych kukurydzy (doświadczenie III)

Dawka Se [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	Zawartość selenu		Średnia dla dawki	Pobranie selenu		Średnia dla dawki
	Na_2SeO_4	Na_2SeO_3		Na_2SeO_4	Na_2SeO_3	
0	0,095		0,095	21		21
0,1	0,758	0,184	0,47	166	40	21
0,25	1,524	0,215	0,87	354	47	103
0,5	2,573	0,246	1,41	553	52	200
0,75	3,842	0,303	2,07	812	61	303
1,0	5,061	0,448	2,75	1082	88	437
2,0	10,780	0,645	5,71	2289	120	585
3,0	18,796	1,050	9,92	3959	195	1205
4,0	20,469	1,774	11,12	4290	328	2077
Średnia dla formy	7,100	0,551	-	1503	106	-
NIR _{0,05}	Forma 0,060			Forma 15		
	Dawka Se 0,21			Dawka 70		
	Interakcja 0,28			Interakcja 95		

Tab. X Plon powietrznie suchej masy części nadziemnej kukurydzy [g z wazonu] (doświadczenie IV)

Dawka S [$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$]	LOBER	BIELIK	Średnia dla dawki
0	150,6	135,9	143,2
0,03	140,8	127,1	133,9
0,06	135,6	121,6	128,6
0,09	129,4	120,2	124,8
0,12	128,5	114,5	121,5
Średnia dla odmiany	137,0	126,4	-
NIR _{0,05}	Odmiana 3,1		
	Dawka S 4,9		
	Interakcja 6,9		

Tab. XI Plon suchej masy nadziemnych części kukurydzy [g z wazonu] (doświadczenie V)

Dawka Se μgSe/ wazon	dodatek	Na ₂ SeO ₃	Na ₂ SeO ₄	Średnia
0	N	105,2	105,2	105,2
	Mg	93,7	93,7	93,7
	N + Mg	107,1	107,1	107,1
	Średnia	102,0	102,0	-
5	N	106,0	106,4	106,2
	Mg	96,6	93,9	95,3
	N+ Mg	105,3	104,6	104,9
	Średnia	102,6	101,6	-
10	N	105,3	105,4	105,4
	Mg	100,8	96,8	98,8
	N + Mg	115,6	105,5	110,6
	Średnia	107,2	102,6	-
NIR _{0,05} dodatek	2,07		N	105,6
			Mg	95,9
			N+Mg	106,0
			Na ₂ SeO ₃	102,1
NIR _{0,05} forma	1,69		Na ₂ SeO ₄	104,0
			O Se	102,0
			5 Se	102,1
			10 Se	104,9
NIR _{0,05} dawka Se	2,07		średnia	103,0
NIR _{0,05} interakcja	5,07			

Tab.XII. Zawartość oraz pobranie selenu przez suchą masę części nadziemnych kukurydzy (doświadczenie V)

Dawka Se μgSe/ wazon	dodatek	Zawartość Se μg* kg ⁻¹ s.m		Pobranie Se mg z wazonu	
		Na ₂ SeO ₃	Na ₂ SeO ₄	Na ₂ SeO ₃	Na ₂ SeO ₄
0	N	13,8		1,462	
	Mg	17,3		1,633	
	N + Mg	15,5		1,671	
5	N	36	41	3,813	4,362
	Mg	34	40	3,296	3,734
	N+ Mg	50	86	5,268	9,005
10	N	64	53	6,732	5,588
	Mg	54	48	5,445	4,650
	N + Mg	75	110	8,639	11,586
		średnia	NIR _{0,05}	średnia	NIR _{0,05}
dodatek	N	39,9		3,903	
	Mg	33,9	6,40	3,398	0,656
	N+Mg	58,6		6,307	
forma	Na ₂ SeO ₃	40,0		4,218	
	Na ₂ SeO ₄	47,2	5,22	4,854	0,536
dawka Se	0 Se	15,6		1,589	
	5 Se	47,8	6,40	4,913	0,656
	10 Se	67,3		7,107	
NIR _{0,05} interakcja		15,67		1,608	